



**CONTRIBUTION À LA COMMANDE PAR SMA D'UN SYSTÈME HYBRIDE ÉOLIEN-
DIESEL AVEC STOCKAGE PAR AIR COMPRIMÉ (SHEDAC)**

Par

Richard Lepage

Sous la direction du Dr. Mohand Ouhrouche (UQAC) et du Dr. Adrian Ilinca (UQAR)

**Thèse présentée à l'Université du Québec à Chicoutimi en vue de l'obtention du
grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.) en ingénierie**

Soutenue le 11 décembre 2020

Jury :

M. Issouf Fofana, UQAC, Président du Jury

M. Hussein Ibrahim, ITMI, Membre externe

M. Mohamed Yasser Hayyani, UQAR, Membre interne

M. Issouf Fofana, UQAC, Membre interne

Québec, Canada

© Richard Lepage, 2021

RÉSUMÉ

Au Canada, selon un rapport de 2011 produit par le Gouvernement du Canada, environ 194,000 personnes qui vivent dans près de 292 communautés isolées ne sont pas reliées aux réseaux électriques provinciaux ou territoriaux. La majorité de ces communautés sont alimentées en électricité via des groupes électrogènes (GED) qui consomment, chaque année, des millions de litres de carburant diesel émettant par le fait même des gaz toxiques (NOX, SOX) et particulaire ainsi qu'un gaz indésirable contribuant au réchauffement climatique (CO₂). Cette méthode de production d'énergie électrique est également fortement affectée par le prix du carburant qui ne cesse d'augmenter; les communautés subissant ainsi des coûts élevés tant environnementaux, économiques et sociaux. Cette problématique a notamment intéressé plusieurs chercheurs et des esquisses de solutions ont été proposées. On pense notamment à l'ajout de sources renouvelables jumelées au GED, à la prévision de la ressource éolienne, à des innovations technologiques limitant au maximum la consommation des moteurs diesels comme la suralimentation, l'utilisation d'une technologie comme le Genset-Synchro, des technologies de captage des gaz d'échappement (NO_x, SO_x et CO₂) ou l'hybridation du moteur diesel en moteur à air comprimé. Les énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire pour ne nommer que les plus importantes, constituent un potentiel important pour réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. Cependant, l'intermittence de l'énergie éolienne empêche la transformation des réseaux autonomes en réseau uniquement alimenté en énergie renouvelable, ce qui permettrait l'élimination du GED en tout temps. Dans les sites isolés qui sont paradoxalement très riches en cette ressource naturelle, à cause de cette intermittence, le GED est sans cesse sollicité pour soutenir l'énergie renouvelable. On rencontre également une inadéquation entre la ressource éolienne et la consommation énergétique.

Pour diminuer la sollicitation du GED, nous devons passer par une technologie de stockage de l'énergie qui permettra de soutenir le réseau lors des fluctuations de la puissance éolienne. A la lecture des articles scientifiques sur le contrôle des systèmes hybrides avec stockage d'énergie, une tendance se dessine aujourd'hui montrant la voie vers les micro-réseaux constitués de différentes sources d'énergies gérées par diverses méthodes de contrôle. Le domaine de la gestion de l'énergie est de plus en plus étudié et la plupart des solutions sont conceptualisées autour d'un système centralisé qui rencontrent à peine des critères tels que la tolérance aux pannes ou l'adaptabilité. De plus, ces systèmes sont difficiles à concevoir en raison d'une approche descendante qui a été implémentée lors de la conception: le concepteur sait généralement comment chaque composant doit répondre séparément, mais un système de gestion centralisé concentre son attention uniquement sur la réaction globale du système et non comment interagissent chacun des composants si l'un est en défectuosité par rapport à un autre composant. La technologie de stockage d'énergie utilisée dans cette recherche repose sur le stockage d'énergie par air comprimé que l'on retrouve dans le SHEDAC (Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage à Air Comprimé). Ce système est à la base de cette recherche. De plus, nous ajoutons au SHEDAC le stockage d'énergie électrique par supercondensateur.

Le banc de supercondensateur participera en tout temps à la conduite du réseau CC afin d'éviter toute fluctuation dû aux fluctuations des sources renouvelables dépendantes des variations météorologiques comme l'énergie éolienne ou l'énergie solaire.

Dans cette thèse, nous proposons une solution de gestion d'énergie distribuée qui est basée sur le paradigme des systèmes multi-agents (SMA). C'est une approche de conception qui est nouvelle pour le SHEDAC et une approche "ascendante" a été utilisée lors de la conception du SMA, approche permettant d'assurer une meilleure fiabilité du système et qui permet, entre autres, l'ajout ou la suppression à froid ou à chaud d'une source d'énergie renouvelable sans affecter la stabilité du réseau. L'objectif du SMA est d'effectuer une redistribution adéquate de la puissance tout en respectant les privilèges de la ressource primaire (GED), le contrôle n'étant pas centralisé car pouvant se trouver sur n'importe laquelle des sources, pourvu que cette source puisse rencontrer 50% de la charge, les autres sources partageant le reste de la charge libérant ainsi le GED. L'avantage principal de ce type de contrôle est de permettre l'arrêt et le départ du GED sans affecter la tenue du réseau et la rencontre des objectifs primaires.

Pour stocker l'énergie excédentaire provenant des sources renouvelables, nous abordons le stockage d'énergie sous forme d'air comprimé qui est une option prometteuse pour les applications SHED (Système Hybride Éolien-Diesel) autonomes compte tenu du coût, de la densité énergétique, de la densité de puissance, de la durabilité, de l'efficacité et de la faible empreinte écologique de cette technique de stockage. Le système SHEDAC considéré dans cette recherche est constitué d'un ensemble de réservoirs à air comprimé pour le stockage de l'énergie éolienne et d'un MAC générateur réversible (Moteur à Air Comprimé) pour la production de l'électricité d'une part et de l'autre pour la production de l'air comprimé. Cette ressource a pour objectif de stabiliser le réseau le temps que le GED atteigne sa température de fonctionnement nominale durant le processus de redémarrage. La technologie des supercondensateurs est également utilisée pour un stockage rapide de l'énergie électrique avec comme particularité de soutenir une densité de puissance très élevée doublé d'une empreinte écologique très faible pour un cycle de stockage/restauration de l'énergie très élevée. Cette source d'énergie permettra de soutenir l'étape de redémarrage du GED avec le MAC générateur et permettra également de corriger rapidement les fluctuations du réseau CC provoquée par la variabilité de la ressource éolienne. La simulation et l'expérimentation ont démontré que la stratégie de contrôle par SMA est une option viable pour le contrôle du SHEDAC rencontrant les objectifs de recherche de la présente thèse. Pour éviter une dissipation d'énergie dans des charges secondaires, on prendra soin de dimensionner adéquatement le micro-réseau pour rencontrer les pics de puissances; on utilisera pour ce faire des algorithmes d'optimisation tels que les algorithmes génétiques ou évolutionnaires afin de composer un système hybride dont le coût et la puissance disponible de chacune des sources sera optimisée selon des critères spécifiques.

L'originalité de cette recherche réside dans l'utilisation d'un SMA comme gestionnaire de puissance pour un SHEDAC dont la littérature ne fait aucunement mention. L'intérêt d'utiliser le SMA dans cette recherche est dans la facilité d'ajouter ou d'enlever une source sans affecter le fonctionnement et la stabilité du SHEDAC. Si un ou des composants venait à être défectueux, le système demeurerait opérationnel car le GED

demeure la source primaire du système. Si le GED présentait un problème quelconque, un autre GED prendrait la relève sans affecter la stabilité du système. Cette technologie associée au MAC et aux supercondensateurs permet également de conserver la stabilité du réseau lors du redémarrage du GED ou lors d'un mauvais fonctionnement. Le SMA permet également de se greffer à d'autres micro-réseaux sans modifications quelconques du système tout en rencontrant les spécifications demandées. La majorité des systèmes de gestion de puissance rencontrée dans la littérature sont de nature électromécanique, dont le contrôle est centralisé et très peu adaptable tandis que le système de gestion de puissance qui a été conçu dans cette recherche est un contrôle décentralisé agissant principalement sur le réseau électrique par le biais de convertisseurs CA-CC/CC dont la tension ou le courant est contrôlé par un agent informatique. On retrouve néanmoins un certain contrôle électromécanique dans la gestion de l'air comprimé et dans la protection des sources lors des surtensions ou des court-circuit provoqués par des événements extérieurs au SHEDAC.

La présente thèse se divise en 6 chapitres. Le chapitre 1 introduit le sujet de recherche avec ses problématiques, les objectifs fixés et la méthodologie suivie pour les atteindre. Le chapitre 2 est consacré à une revue de la littérature concernant les systèmes de contrôle existant pour les systèmes hybrides SHED et SHEDAC, ce qui a permis de tracer la direction à prendre pour cette recherche, soit une hybridation micro-réseau et agents logiciels. Le chapitre 3 discute du paradigme des agents logiciels ainsi que l'utilisation de ceux-ci pour le contrôle des systèmes complexes. On utilise la plateforme SPADE pour l'implémentation de la gestion de communication entre les agents logiciels. Le chapitre 4 présente la modélisation et la simulation d'un système hybride SHEDAC contrôlé par des agents logiciels. Cette modélisation a été réalisée avec la plateforme Stateflow et Simulink de Matlab. Le chapitre 5 décrit le banc d'essai d'un système hybride dont la puissance de chacune des sources est contrôlée par un agent logiciel implémenté dans un microcontrôleur, le programme est conçu en langage python. Pour la communication entre les agents sources, le mode WI-FI a été considéré en premier lieu dans cette expérimentation. Si la communication par la voie des airs s'avérait impossible, il y a possibilité de communiquer par le mode filaire (mode CAN), un mode de communication qui est très prisé dans le domaine de l'automobile, tant pour la vitesse de communication que pour son faible taux d'erreur. Ce système de communication permet à plusieurs microcontrôleurs de communiquer entre eux des informations permettant de maintenir le bon fonctionnement du système. Finalement, la thèse se termine par les conclusions et les recommandations (chapitre 6) dégagées du sujet de recherche. On retrouvera en annexes des informations supplémentaires au niveau technique qui ont servi lors de l'expérimentation.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	I
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	XVI
DÉDICACE	XX
REMERCIEMENTS	XXI
AVANT-PROPOS	XXII
CHAPITRE 1.....	1
1. INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Contexte général de l'étude.....	1
1.2 Problématique.....	15
1.3 Objectifs de recherche.....	18
1.3.1 Objectif principal	18
1.3.2 Objectifs spécifiques	19
1.3.3 Hypothèses liées au fonctionnement du système :	20
1.4 Contribution à la recherche	22
1.5 Méthodologie	24
1.6 Plan de la thèse	26
CHAPITRE 2.....	28
2. REVUE DE LITTÉRATURE	28
2.1 Introduction.....	28
2.2 Stratégie de gestion de puissance	28
2.2.1 Stratégies de gestion de puissance pour les systèmes hybrides.....	28
2.2.2 Stratégies de gestion de puissance pour le SHEDAC.	35
2.3 CONCLUSION.....	57

CHAPITRE 3.....	59
3. LA TECHNOLOGIE DES AGENTS LOGICIELS	59
3.1 <i>Introduction</i>	59
3.2 <i>Le paradigme des systèmes multi-agents (SMA)</i>	60
3.2.1 Modes de gestion de l'énergie par SMA	71
3.2.2 La plateforme SPADE	73
3.2.3 Le répartiteur de messages	74
3.2.4 L'envoi et la réception des messages	76
3.2.5 Procédure de comportement pour machine à états finis	80
3.3 <i>Comportement des agents en simulation</i>	82
3.4 <i>Conclusion</i>	83
CHAPITRE 4.....	85
4. MODÉLISATION ET SIMULATION	85
4.1 <i>Introduction</i>	85
4.2 <i>Matériels et méthodes</i>	85
4.2.1 La modélisation du vent	85
4.2.2 Emplacement du site pour la provenance des données expérimentales	88
4.2.3 Modélisation du profil de la charge électrique et du vent	90
4.2.4 Modélisation de l'éolienne et du groupe électrogène	91
4.2.5 Modélisation du banc de supercondensateur.....	96
4.2.6 Modélisation du stockage et de la détente de l'air comprimé	101
4.2.6.1 Le stockage de l'air comprimé	101
4.2.6.2. La détente de l'air comprimé.....	104
4.2.7 Modélisation du SHEDAC avec des convertisseurs CC-CC	107
4.2.8 Modélisation des convertisseurs élévateur de tension (Boost converter).....	115
4.2.9 Modélisation des convertisseurs abaisseur de tension (Buck converter)	116
4.2.10 Modélisation du convertisseur CA-CC	117
4.2.11 Modélisation du convertisseur CC-AC 60 Hz.	118

4.2.12 Contrôleur PI pour le contrôle du rapport cyclique	120
4.2.13 Communication inter-agents	121
4.2.14 Modélisation du système électrique du SHEDAC	124
4.2.15 Stratégie de contrôle du SHEDAC par SMA.	128
4.2.16 Simulation du contrôleur proportionnel-intégral du convertisseur.	129
4.3 Résultats de la simulation.....	137
4.4 Comparaison du SMA avec un système hybride existant	141
4.5 Discussion des résultats.....	150
4.6 Conclusion	151
CHAPITRE 5.....	154
5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE	154
5.1 Introduction	154
5.2 La plateforme SMA.....	155
5.2.1 Implémentation des agents logiciels avec SPADE.....	156
5.2.2 Le choix du lien de communication	157
5.3 Le choix du microcontrôleur	159
5.4 Programmation des agents logiciels.....	169
5.5 Résultats et discussion de l'expérimentation.....	173
5.6 Conclusion	174
CHAPITRE 6.....	175
6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	175
6.1 Conclusion	175
6.2 Recommandations et perspectives	176
6.3 Listes des articles acceptés par les pairs et en révision	179
BIBLIOGRAPHIE.....	180
ANNEXE A.....	188
La carte de développement PocketBeagle.....	188

<i>Exemple de communication par mode CAN.....</i>	<i>190</i>
<i>Programmation du PID en langage python</i>	<i>194</i>
<i>Expérimentation sur la suralimentation en air comprimé du GED.....</i>	<i>198</i>

LISTE DES TABLEAUX

TABLE 5-1 COMPARAISON DES PROTOCOLES ZIGBEE, BLUETOOTH ET WI-FI POUR LA COMMUNICATION INTER-AGENTS.	157
TABLE 5-2 - TABLEAU COMPARATIF DES DIFFERENTES CARTES DE MICROCONTROLEUR POUVANT SERVIR A L'IMPLEMENTATION DES AGENTS LOGICIELS DU SYSTEME DE GESTION DE PUISSANCE DU SHEDAC. SOURCE : RICHARD LEPAGE.....	161
TABLE 5-3 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CARTE WIFI LINKIT SMART 7688 DUO. [103].....	163

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1-1- GROUPE ELECTROGENE POUR LA GENERATION D'ELECTRICITE. CO-AUTEUR [7].....	3
FIGURE 1-2- COMMUNAUTES ISOLEES ET MICRO-RESEAUX. [6].....	4
FIGURE 1-3 – ÉTUDE COMPARATIVE SUR L'ELECTRICITE FOURNIE SUR LES SITES ISOLES. [8].....	4
FIGURE 1-4 – VARIABILITE DU VENT POUR UNE JOURNEE [9]	5
FIGURE 1-5 - CONFIGURATION FAIBLE TAUX DE PENETRATION DE L'ENERGIE EOLIENNE. [10].....	6
FIGURE 1-6 - CONFIGURATION TAUX DE PENETRATION MOYEN DE L'ENERGIE EOLIENNE. [10].....	7
FIGURE 1-7 - CONFIGURATION TAUX DE PENETRATION ELEVE DE L'ENERGIE EOLIENNE. [10].....	8
FIGURE 1-8 - COMPARATIF SUR LES TYPES D'ACCUMULATEURS D'ENERGIES [20].	10
FIGURE 1-9 – COMPARAISON DES DIFFERENTS MOYENS DE STOCKAGE D'ENERGIE EN FONCTION DE LEUR COUT [8].	10
FIGURE 1-10 - INDICE STATISTIQUE SUR LES TECHNOLOGIES DE STOCKAGE [21].....	11
FIGURE 1-11 - REDUCTION DU DIOXYDE DE CARBONE PAR SURALIMENTATION. CO-AUTEUR [7].....	12
FIGURE 1-12 - COURBE D'EFFICACITE DE L'ENGIN DIESEL EN FONCTION DU RAPPORT AIR/CARBURANT. CO-AUTEUR [3].....	13
FIGURE 2-1 -SCHEMA BLOC D'UN JUMELAGE EOLIEN-DIESEL SANS STOCKAGE (SOURCE : IREQ) [25].....	30
FIGURE 2-2 - SYSTÈME HYBRIDE AVEC STOCKAGE PAR BATTERIES D'ÉNERGIE EXCÉDENTAIRE. [28].....	32
FIGURE 2-3 - CENTRALE HUNTORF (ALLEMAGNE). [38].....	37
FIGURE 2-4 – EXEMPLE DE PRODUCTION D'ENERGIE PENDANT UNE JOURNEE A LA CENTRALE HUNTORF. [38].....	38
FIGURE 2-5 – SCHEMATISATION SOMMAIRE D'UN SYSTEME HYBRIDE SHEDAC. @RICHARD LEPAGE	39
FIGURE 2-6 – ADMISSION DIRECTE DANS UN DES CYLINDRES DU MOTEUR DIESEL. [37].	40

FIGURE 2-7 – EXPANSION DE L’AIR COMPRIME DANS UN MOTEUR/ALTERNATEUR. [21] ...	41
FIGURE 2-8 – CONCEPT PNEUMATIQUE DU MOTEUR DIESEL. [37]	43
FIGURE 2-9 - PRINCIPE D'OPERATION D'UN CONCEPT HPCE. [37]	45
FIGURE 2-10 - MOTEUR A AIR COMPRIME JUMELE A UN ALTERNATEUR. [20].....	46
FIGURE 2-11 - SURALIMENTATION DU MOTEUR DIESEL AVEC L'AIR COMPRIME. [20].....	47
FIGURE 2-12 - RAPPORT INDICE D'EFFICACITE VS AIR/CARBURANT. CO-AUTEUR [3]	48
FIGURE 2-13 – STRATEGIE DE CONTROLE D'UN SYSTEME SHEDACME. [8]	48
FIGURE 2-14 - MOTEUR MHPD. [8]	49
FIGURE 2-15 - STOCKAGE HYDROPNEUMATIQUE POUR GENERATION D'ELECTRICITE DANS LES SITES ISOLES. [15]	50
FIGURE 2-16 -PARTIE DE L'ORGANIGRAMME DE GESTION DE PUISSANCE POUR $\Delta P < 0$. [57].....	54
FIGURE 2-17 - PARTIE DE L'ORGANIGRAMME DE GESTION DE PUISSANCE POUR $\Delta P > 0$. [57].....	55
FIGURE 3-1 - LA CLASSE AGENTS A REFLEXE SIMPLE. [75]	62
FIGURE 3-2 - AGENT REFLEXE A BASE DE MODELE. [75].....	63
FIGURE 3-3 - CLASSE D'AGENT BASE OBJECTIF A BASE DE MODELE. [75].....	64
FIGURE 3-4 - CLASSE D'AGENT BASE UTILISATION, A BASE DE MODELE. [75].....	65
FIGURE 3-5 - CLASSE D'AGENT D'APPRENTISSAGE. [75]	66
FIGURE 3-6 - EXEMPLE DE PROGRAMME CONCURRENT. [77]	69
FIGURE 3-7 - RESULTATS DU PROGRAMME CONCURRENT POUR LE CONTROLE D'UN REFRIGERATEUR. [77].....	70
FIGURE 3-8 - MODES DE GESTION DE PUISSANCE. [79].....	71
FIGURE 3-9 CLASSE MESSAGE SERVANT A LA COMMUNICATION INTER-AGENTS. @RICHARD LEPAGE	75
FIGURE 3-10 EXEMPLE DE PROCEDURE D'ENVOI D'UN MESSAGE. @RICHARD LEPAGE...	76
FIGURE 3-11 PROCEDURE D'ENVOI DE MESSAGE PAR UN AGENT. @RICHARD LEPAGE ..	77
FIGURE 3-12 RESULTAT DE L'ENVOI DE MESSAGE DANS LA FENETRE DE SORTIE. @RICHARD LEPAGE	77

FIGURE 3-13 PROCEDURE D'ENVOI ET DE RECEPTION DE MESSAGES. @RICHARD LEPAGE	78
FIGURE 3-14 PROCEDURE DE RECEPTION D'UN MESSAGE. @RICHARD LEPAGE	79
FIGURE 3-15 RESULTAT DE LA PROCEDURE D'ENVOI ET DE RECEPTION DE MESSAGE PROVENANT D'UN AUTRE AGENT. @RICHARD LEPAGE	79
FIGURE 3-16 EXEMPLE DE COMPORTEMENT DE L'ETAT UN. @RICHARD LEPAGE	80
FIGURE 3-17 CODAGE DES ETATS DEUX ET TROIS. @RICHARD LEPAGE	81
FIGURE 3-18 RESULTAT DE LA PROCEDURE DE MACHINE A ETATS FINIS. @RICHARD LEPAGE	82
FIGURE 4-1 - SIGNAL DE VENT ALEATOIRE SUR LA BASE D'UN SPECTRE KAIMAL. @MATHWORK.....	86
FIGURE 4-2 - MODELE KAIMAL DE SIMULATION DE VENT. @MATHWORK.....	87
FIGURE 4-3 – MODELES DE COMPOSANTS ELECTRIQUES DE LA LIBRAIRIE SIMSCAPE POWER SYSTEM. @MATHWORK	87
FIGURE 4-4 - EMLACEMENT DU SITE DE TUKTOYAKTUK. [15].....	88
FIGURE 4-5 COURBE ANNUELLE DE TEMPERATURE A TUKTOYAKTUK [15]	89
FIGURE 4-6 VITESSE MOYENNE DU VENT POUR JANVIER 2019 A TUKTOYAKTUK [15]	90
FIGURE 4-7 - PROFIL DE LA CHARGE ELECTRIQUE DU VILLAGE POUR L'ANNEE 2007. [15]	90
FIGURE 4-8 - PROFIL DE VITESSE MOYENNE DE VENT DU VILLAGE DE TUKTOYAKTUK. [15]	91
FIGURE 4-9 - COURBE DE PUISSANCE DE L'EOLIENNE ENERCON E44. [15]	93
FIGURE 4-10 - CONSOMMATION DE CARBURANT VS DEBIT D'AIR D'ADMISSION. [15]	94
FIGURE 4-11 - PRESSION D'ADMISSION VS LA CHARGE APPLIQUEE.[15].....	94
FIGURE 4-12 - COURBE DE CONSOMMATION VS PRESSION D'ADMISSION [15]	95
FIGURE 4-13 - TEMPERATURE D'ADMISSION SELON LA CHARGE APPLIQUEE [15].....	95
FIGURE 4-14 - COURBE DE CONSOMMATION DE CARBURANT VS TEMPERATURE D'ADMISSION. [15]	96
FIGURE 4-15 – TABLEAU COMPARATIF DE DENSITE DE PUISSANCE. @RICHARD LEPAGE	97
FIGURE 4-16 - TABLEAU COMPARATIF DE STOCKAGE D'ENERGIE PAR SUPERCONDENSATEUR. [17].....	98

FIGURE 4-17 - REPONSE TYPIQUE EN TENSION D'UN SUPERCONDENSATEUR LORS DE LA RESTITUTION D'UN COURANT CONSTANT. [91]	99
FIGURE 4-18 - CONTROLE DE LA CHARGE D'UN SUPERCONDENSATEUR [91]	100
FIGURE 4-19 - VARIATION DU TEMPS DE CHARGE D'UN RESERVOIR DE 300 L EN FONCTION DU TAUX DE COMPRESSION ET DU NOMBRE D'ETAGES D'UN COMPRESSEUR DE 5 KW DE PUISSANCE. [37].....	103
FIGURE 4-20 - VARIATION DU TEMPS DE CHARGE D'UN RESERVOIR DE 300 L EN FONCTION DU TAUX DE COMPRESSION ET DE LA PUISSANCE CONSOMMEE PAR UN COMPRESSEUR DE 5 ETAGES. [37].....	104
FIGURE 4-21 - VARIATION DE LA PRESSION DU RESERVOIR (225 L) EN FONCTION DE LA PRESSION MAXIMALE DE STOCKAGE ET DU TEMPS DE DECHARGE POUR 5 ETAGES DE DETENTE. [8]	106
FIGURE 4-22 - VARIATION DE LA PRESSION DU RESERVOIR (225 L) EN FONCTION DU TEMPS DE DECHARGE ET DU NOMBRE D'ETAGES POUR UN MAC DE 8 KW DE PUISSANCE. [8]	106
FIGURE 4-23 - CONTROLEUR CENTRALISE AVEC BUS CA. @RICHARD LEPAGE	108
FIGURE 4-24 - CONFIGURATION D'UN SHEDAC PAR BUS MIXTE CC-CA. @RICHARD LEPAGE	110
FIGURE 4-25 - CONTROLEUR CENTRALISE AVEC BUS CC. @RICHARD LEPAGE	110
FIGURE 4-26 - CONFIGURATION DU SYSTEME MULTI-AGENTS (SMA). @RICHARD LEPAGE	112
FIGURE 4-27 SCHEMA DESCRIPTIF DES CONVERTISSEURS SOUS CONTROLE SMA. @RICHARD LEPAGE	114
FIGURE 4-28 – CONVERTISSEUR DC-DC ELEVATEUR DE TENSION. MATHWORKS®	115
FIGURE 4-29 - MODULE SIMSCAPE DU CONVERTISSEUR CC-CC. MATHWORKS®	116
FIGURE 4-30 – CONVERTISSEUR ABAISSEUR DE TENSION. MATHWORKS®.....	117
FIGURE 4-31 - CONVERTISSEUR AC/DC. MATHWORKS®	118
FIGURE 4-32 - BLOC DE SIMULATION DU CONVERTISSEUR CC-AC. MATHWORKS®.....	119
FIGURE 4-33 - DESCRIPTION DU BLOC CONVERTISSEUR CC-CA. MATHWORKS®	119
FIGURE 4-34 - CONTROLE PI APPLIQUE AU CONVERTISSEUR CC/CC. [79]	120
FIGURE 4-35 - INTEGRATION D'UN AGENT DANS LE SYSTEME HYBRIDE. [79].....	121
FIGURE 4-36 - EXEMPLE DE COMMUNICATION INTER-AGENTS. @RICHARD LEPAGE	122

FIGURE 4-37 - ALGORITHME DE PASSAGE DU JETON VERS UN AUTRE AGENT. @RICHARD LEPAGE	123
FIGURE 4-38 - GESTION D'ENERGIE PAR CONTROLE DES CONVERTISSEURS. @RICHARD LEPAGE	128
FIGURE 4-39 - CONTROLEUR PI POUR LE SIGNAL A RAPPORT CYCLIQUE "DUTY CYCLE". @RICHARD LEPAGE	130
FIGURE 4-40 - UNE PARTIE DU MODULE DE COMMUNICATION ENTRE L'ELEMENT DIESEL ET L'ELEMENT SC (SUPERCONDENSATEUR). @RICHARD LEPAGE	131
FIGURE 4-41 - ALGORITHME GENERALISE DE PRISE DE JETON PAR L'AGENT SC. @RICHARD LEPAGE	132
FIGURE 4-42 - ALGORITHME DE LESTAGE DE JETON PAR L'AGENT GED. @RICHARD LEPAGE	134
FIGURE 4-43 - MODELE DE L'EOLIENNE AVEC CONVERTISSEUR CA-CC. MATHWORKS®	135
FIGURE 4-44 - MODELE DU GED AVEC SORTIE CC. MATHWORKS®	136
FIGURE 4-45 - DESCRIPTION DU MODULE MAC-GENERATEUR SOUS SIMSCAPE. MATHWORKS®	137
FIGURE 4-46 - ÉVOLUTION DU COURANT FOURNI PAR LE DIESEL POUR UNE CHARGE DONNEE. @RICHARD LEPAGE.....	139
FIGURE 4-47 - ÉTAT DE CHARGE DU SUPERCONDENSATEUR. @RICHARD LEPAGE.....	139
FIGURE 4-48 - ÉTAT DE CHARGE DU RESERVOIR AIR COMPRI ME DU MOTEUR-GENERATEUR. @RICHARD LEPAGE	140
FIGURE 4-49 - ÉVOLUTION DE LA TENSION DU RESEAU CC. @RICHARD LEPAGE.....	140
FIGURE 4-50 - SCHEMA BLOC MATLAB/SIMULINK DE REFERENCE POUR LA VALIDATION DU SMA. [93].....	143
FIGURE 4-51 - TENSION DE LIGNE ET PHASE DU COURANT. [93]	144
FIGURE 4-52 COURANT ET TENSION CC DU BANC DE SUPERCONDENSATEURS. [93]	144
FIGURE 4-53 COURANT, TENSION ET ETAT DE CHARGE DE LA BATTERIE. [93]	145
FIGURE 4-54 COURBES DE PUISSANCES DE TOUTES LES SOURCES ET DE LA CHARGE. [93].....	145
FIGURE 4-55 COURBES D'EVOLUTION DE LA PILE A COMBUSTIBLE. [93].....	146
FIGURE 4-56 MODELE MATLAB/SIMULINK DU SHEDAC AVEC CONTROLE SMA DISTRIBUE. @RICHARD LEPAGE	147

FIGURE 4-57 - ÉVOLUTION DE LA TENSION EN MODE SIMULATION. @RICHARD LEPAGE	148
FIGURE 4-58 ÉVOLUTION DU COURANT EN MODE SIMULATION. @RICHARD LEPAGE.....	149
FIGURE 4-59 ÉVOLUTION DE LA CHARGE EN FONCTION DU TEMPS DE SIMULATION. @RICHARD LEPAGE	149
FIGURE 4-60 – STABILITE DE LA TENSION DE SORTIE AC SOUS CHARGE. @RICHARD LEPAGE	150
FIGURE 5-1 - LE POINT D'ACCES CORRESPONDANT AU MODE STATION ET AU MODE CLIENT. @RICHARD LEPAGE	158
FIGURE 5-2 – LIEN FILAIRE BOUCLE DU MODE CAN. @RICHARD LEPAGE	159
FIGURE 5-3 - A) LA CARTE "POCKETBEAGLE" B) LA CARTE WIFI LINKIT SMART 7688 DUO. [101].....	162
FIGURE 5-4 - CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CARTE "POCKETBEAGLE". [102]	164
FIGURE 5-5 UN EXEMPLE DE PROGRAMME CODE EN C++ CONÇU AVEC CLOUD9. [106].	166
FIGURE 5-6 COMPILATION DU CODE C++ ET RESULTATS DANS LA FENETRE DE SORTIE. [106].....	167
FIGURE 5-7 CONFIGURATION DE PUTTY POUR ACCEDER A LINUX. [101]	168
FIGURE 5-8 ENVIRONNEMENT LINUX SUR TERMINAL PUTTY. [101]	169
FIGURE 5-9 - SCHEMA SYNOPTIQUE DU SHEDAC. @RICHARD LEPAGE	170
FIGURE 5-10 - CARTE D'EXPERIMENTATION POUR LA VALIDATION DE LA COMMUNICATION INTER-AGENTS. @RICHARD LEPAGE	172
FIGURE A-1 - MODULE POCKETBEAGLE COTE PROCESSEUR [102].....	188
FIGURE A-2 - MODULE POCKETBEAGLE COTE CONNECTEUR [102]	189
FIGURE A-3 - DETAIL DE LA PREMIERE COUCHE DE SIGNAUX DE LA CARTE CONTROLEUR [101].....	189
FIGURE A-4 - DETAIL DE LA SECONDE COUCHE DE SIGNAUX DE LA CARTE CONTROLEUR [101].....	190
FIGURE A-5 EXEMPLE D'ENVOI DE MESSAGE PAR MODE CAN CODE EN PYTHON. @RICHARD LEPAGE	191
FIGURE A-6 EXEMPLE DE RECEPTION DE MESSAGE EN MODE CAN CODE EN PYTHON. @RICHARD LEPAGE	192

FIGURE A-7 BRANCHEMENT DU CONNECTEUR USB EXTERNE POUR DONGLE WIFI. @RICHARD LEPAGE	193
FIGURE A-8 BRANCHEMENT DU CONNECTEUR USB1 SUR CARTE POCKETBEAGLE. @RICHARD LEPAGE	193
FIGURE A-9 DONGLE WIFI QUI SE BRANCHE DANS LE PORT USB. @RICHARD LEPAGE..	193
FIGURE A-10 DIAGRAMME PAR BLOCS D'UN CONTROLEUR PID. @RICHARD LEPAGE	194
FIGURE A-11 SECTION D'INITIALISATION DES PARAMETRES DE CONTROLE. @RICHARD LEPAGE	195
FIGURE A-12 VERIFICATION ENTRE LA SORTIE ET LA CONSIGNE. @RICHARD LEPAGE .	195
FIGURE A-13 - PROGRAMME PRINCIPAL DU CONTROLEUR PID. @RICHARD LEPAGE	196
FIGURE A-14 ÉVOLUTION DE LA SORTIE SELON LA CONSIGNE APPLIQUEE, @RICHARD LEPAGE	197
FIGURE A-15 – BANC D'ESSAI POUR LA SURALIMENTATION DU GED. CO-AUTEUR [3].....	198
FIGURE A-16 – NIVEAUX DE CO VS CHARGES ET PRESSIONS DE SURALIMENTATION. CO- AUTEUR [3].....	199
FIGURE A-17 – NIVEAUX DE SO2 VS CHARGES ET PRESSIONS DE SURALIMENTATION. CO- AUTEUR [3].....	199
FIGURE A-18 – NIVEAU DE CO2 VS CHARGES ET PRESSIONS DE SURALIMENTATION. CO- AUTEUR [3].....	200
FIGURE A-19 – NIVEAUX DE NOX VS CHARGES ET PRESSIONS DE SURALIMENTATION. CO- AUTEUR [3].....	200

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

ABRÉVIATIONS

GES :	Gaz à Effet de Serre
SMA :	Système Multi-Agents
SHED :	Système Hybride Éolien-Diesel
SHEDAC :	Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage d'Air Comprimé
SHEDAC-MHPD :	Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage d'Air Comprimé combiné avec le concept Moteur Hybride Pneumatique-Diesel
MHPD :	Moteur Hybride Pneumatique-Diesel
TPP :	Taux de Pénétration instantané en Puissance éolienne
TPE :	Taux de Pénétration en Énergie éolienne
CAES :	Compressed Air Energy Storage
SOCac :	État de charge du réservoir d'air comprimé
SOCsc :	État de charge du banc de supercondensateur
CC:	Courant Continu
MAC :	Moteur à Air Comprimé
CA :	Courant Alternatif
GED :	Groupe Electrogène diesel
Mac-Gen:	Moteur à air comprimé + Générateur électrique
TR :	Temps de Réponse

PHS:	Pile à combustible
SMES :	Superconducting Magnetic Energy Storage
BES :	Batteries Electrochemical Stockage
RBES :	Redox Batteries Energy Storage
PHS :	Pumped-Hydraulic Storage
FES :	Flywheel Energy Storage
HES :	Hydrogen Energy Storage
TES :	Thermic Energy Storage
SCES:	Supercapacitor Energy Storage
NMPC	Modèle prédictif multi-variable non linéaire
SPADE	Plateforme logiciel de communication multi-agents (Smart Python Agent Development Environment)

SYMBOLES

t_{ch}	Temps de charge d'un réservoir d'air comprimé (s)
τ_{ch}	Constante de temps durant la phase de charge
V_p	Volume d'air produit (m ³)
c_p	Chaleur massique de l'air (1000 J/kg·K)
P_c	Puissance consommée par le compresseur (Watts)
t_{disch}	Temps de restitution d'un réservoir d'air comprimé (s)
P_{CAE}	Puissance produite (Watts) par le moteur à air comprimé (MAC)
V_r	Volume du réservoir à air comprimé (m ³)
$t_{disch_P_1 \rightarrow P_2}$	Temps de restitution entre deux niveaux de pression (s)
N_C	Nombre d'étages de compression
n_C	Exposant polytropique de compression
P_S	Pression de sortie du réservoir (Bars)
P_a	Pression atmosphérique (kPa)
r	Constante des gaz parfait (J/mole·K)
N_{CAE}	Nombre d'étages de détente du MAC
n_C	Coefficient polytropique de détente

τ_{disch}

Constante de temps durant la phase de décharge

DÉDICACE

Je tiens à remercier ma conjointe de vie, Sylvie, qui m'a toujours soutenu et encouragé tout au long de cette longue aventure et qui m'a offert le plus beau des cadeaux : son amour et nos enfants Gabriel et Samuel. Je dédie humblement ce travail à ma tendre épouse et à nos enfants.

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé au sein du laboratoire LREE de L'UQAR. Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à messieurs les professeurs Mohand Ouhrouche et Adrian Ilinca, directeur du laboratoire LICOME et du laboratoire LREE respectivement, pour m'avoir accueilli dans leurs unités et pour avoir dirigé et codirigé ce travail de recherche. Je les remercie de m'avoir soutenu durant toutes ces années, de m'avoir assuré de leur soutien et de leur engagement tout au long de ce travail, et de la confiance qu'ils m'ont témoigné en me laissant pleine autonomie pour mes recherches sur un sujet aussi passionnant et complexes que sont les énergies renouvelables.

Je remercie également les membres du comité d'évaluation et le président du jury pour leur temps en ayant accepté d'évaluer et de juger ce travail de recherche.

Je remercie enfin mes co-équipiers de travail Philippe Beaulac, Mohamad Issa et Fahed Martini pour leurs présences très constructives ainsi que leurs dynamismes. Je les remercie également pour l'agréable ambiance qu'ils ont su créer dans le local des doctorants en ingénierie. Les conversations m'ont aidé à peaufiner mon travail de recherche. Je remercie en particulier Mohamad « Doddi » Issa pour son aide précieuse dans la relecture des articles en tant qu'auteur que co-auteur et à son dynamisme hors du commun.

Je remercie également Dieu de m'avoir donné le courage et la force de continuer sur cette route sinueuse et exigeante qu'est la recherche scientifique.

Pour ma conjointe Sylvie et mes enfants Gabriel et Samuel, qu'ils trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude pour leur patience et leur amour.

AVANT-PROPOS

Pourquoi avoir choisi ce sujet de recherche? Au premier abord, par ma conscientisation sur l'effet que peut avoir certaines technologies sur l'environnement. De savoir que des millions de tonnes de carburant sont brûlé chaque année par des groupes électrogènes pour produire de l'électricité tout en produisant des gaz à effet de serre ainsi que des problèmes environnementaux et sociaux, il n'en fallait pas plus pour me convaincre de la nécessité de me diriger vers le champ de la recherche sur les énergies renouvelables. Au début, je ne croyais pas que l'énergie éolienne allaient inonder le marché des énergies renouvelables autant que l'énergie solaire, même si l'industrie des cellules solaires semble florissante malgré une efficacité encore très faible. Il demeure néanmoins qu'au niveau de l'efficacité, ce sont les éoliennes qui dominent actuellement le marché.

Cela m'a pris quelques années avant de trouver un moyen efficace de réduire la consommation en carburant des groupes électrogènes diesel tout en augmentant la fiabilité et la qualité de l'énergie consommée par un réseau autonome. C'est à la lecture d'un article passionnant que l'idée m'est venue d'utiliser le SMA (Système Multi-Agents) afin de commander la puissance des sources d'un SHEDAC (Système Hybride Éolien-Diesel avec stockage par Air Comprimé) afin de rencontrer la demande en tout temps.

Pour ce faire, j'ai effectué des recherches sur le SMA et dans la manière de simuler le système hybride au niveau modélisation et simulation. J'ai également touché à la programmation pour implémenter le SMA dans la partie simulation et expérimentation, en utilisant Simulink avec SimPower System et la programmation par machines à états finis avec l'outil StateFlow. Pour la partie expérimentale sur microcontrôleur, il fallut acquérir des connaissances sur la programmation en langage Python pour implémenter le SMA ainsi que les procédures servant à la gestion des sources.

Finalement, je me suis trouvé une véritable passion pour les énergies renouvelables et le contrôle des systèmes par intelligence distribuée. J'espère de tout cœur apporter une contribution à la science par mes efforts et ma persévérance au développement de nouvelles technologies et de nouveaux concepts qui aideront l'humanité à se développer en adéquation avec la nature et son environnement. Pour faire suite à cette thèse, je compte améliorer le contrôle par SMA d'un SHEDAC afin que l'on puisse un jour se départir ou sinon diminuer l'utilisation du pétrole dans la production d'énergie électrique pour les communautés isolées dans le monde, ce qui permettra une meilleure qualité de vie et un respect total sur notre environnement. D'ici à ce que nous puissions produire des batteries pouvant emmagasiner efficacement l'énergie électrique avec un cycle respectable tout en respectant l'environnement et le recyclage des composants, il nous faudra utiliser le pneumatique ou l'hydraulique comme moyen alternatif pour emmagasiner de l'énergie sans affecter l'environnement tout en améliorant la qualité de vie de l'être humain.

CHAPITRE 1

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Contexte général de l'étude

Jusqu'à tout récemment, le moteur diesel jumelé à une génératrice synchrone appelé communément groupe électrogène diesel (GED) (Figure 1-1) était la seule source d'énergie apte à alimenter un réseau électrique isolé en région éloignée [1]. Uniquement au Canada, c'est près de 194000 personnes disséminées dans 292 régions distinctes qui ne sont pas reliés au réseau de distribution national [2], soit parce que les communautés appartiennent à des régions éloignées difficiles d'accès ou parce que les coûts d'installation d'un réseau de distribution électrique relié au réseau de distribution national s'avère trop onéreux par rapport au nombre de personnes habitant ses régions (Figure 1-2). La province de Québec et les territoires du Nord-Ouest sont les deux plus grands consommateurs de carburant diesel utilisé comme source primaire d'énergie électrique pour les sites isolés (Figure 1-3). À l'échelle de la planète, c'est près de 2 milliards de personnes qui vivent dans cette situation.

L'utilisation du GED est une méthode de génération d'électricité qui est très fonctionnelle, fiable mais dont l'efficacité est très faible, en particulier lorsque le GED fonctionne en dessous de sa puissance nominale; lorsque le GED fonctionne au ralenti, le moteur diesel consomme environ 50% du carburant à puissance

nominale [3]. Cette source d'énergie électrique est assez stable en tension et en fréquence en respectant une certaine plage de fonctionnement et présente une fiabilité suffisante pour rencontrer rapidement les variations de la charge mais on retrouve néanmoins des inconvénients majeurs tel que l'utilisation de combustibles fossiles, des coûts prohibitifs en frais de transport de carburant, des coûts de maintenance élevés liés aux modes d'opérations du GED et des rejets importants de gaz à effet de serre (GES), des gaz nocifs pour la santé (NOx, SOx...) ainsi que des émanations particulières. Uniquement au Québec, selon des données pour l'année 2019, c'est 240 000 tonnes de GES par année qui sont relâchés dans l'atmosphère, due à l'utilisation des groupes électrogènes dans les régions isolées [4] tandis qu'au Canada, pour l'ensemble des réseaux autonomes, on compte près de 400 000 tonnes de GES par année [5] qui sont rejetés dans l'atmosphère, la tendance étant heureusement à la baisse par hybridation du GED avec l'ajout d'énergies renouvelables [6]. De plus, l'utilisation des groupes électrogènes a un effet nuisible sur la croissance économique et le développement de la communauté car l'achat d'un groupe électrogène doit être justifié par rapport au nombre de personnes étant installé et pouvant s'installer dans la communauté. On retrouve fréquemment un surdimensionnement du GED pour rencontrer les surcharges du réseau entraînant des coûts plus élevés en maintenance et des risques plus élevés de contamination de l'environnement.

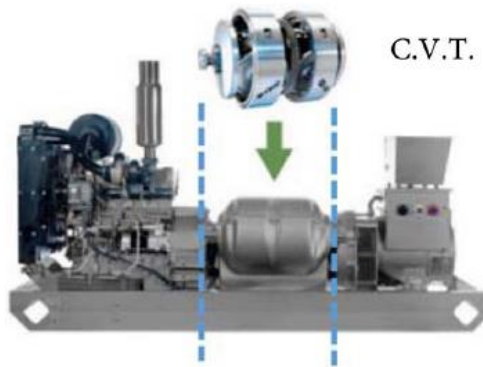


Figure 1-1- Groupe électrogène pour la génération d'électricité. Co-auteur [7]

L'urgence environnementale de diminuer les GES et l'augmentation croissante des coûts en carburant ont contribué aux développements de nouvelles sources d'énergie moins polluantes et à un coût raisonnable utilisé à grande échelle. La ressource éolienne est l'une de ces sources d'énergie. Elle est renouvelable, gratuite et surtout sans émission de GES. On retrouve, néanmoins, une énorme variabilité dans la ressource éolienne qui est autant spatiale que temporelle et qui pose des défis de taille quant à la gestion de puissance d'un réseau isolé ou branché au réseau domestique; en effet, la puissance éolienne demeure toujours changeante et difficilement prévisible à court terme pour un site donné. Selon la courbe de distribution en fréquence de la vitesse du vent de Weibull pour un site donné, l'estimation du potentiel éolien pour une année peut varier de 15 % à 30 % dépendant de la valeur modale qui correspond à la vitesse moyenne des vents. On retrouve souvent une vitesse moyenne qui s'étend de 5 m/s à 7 m/s. La plupart des éoliennes fonctionnent entre 5 et 15 m/s.

Dans une année, 33% du temps, on retrouve une vitesse moyenne de près de 5,5 m/s pour la vitesse du vent. Il est évident que la source primaire doit demeurer le GED si nous voulons que le réseau autonome rencontre la demande en tout temps sans perturbation sur la qualité de l'onde tant en amplitude qu'en fréquence.

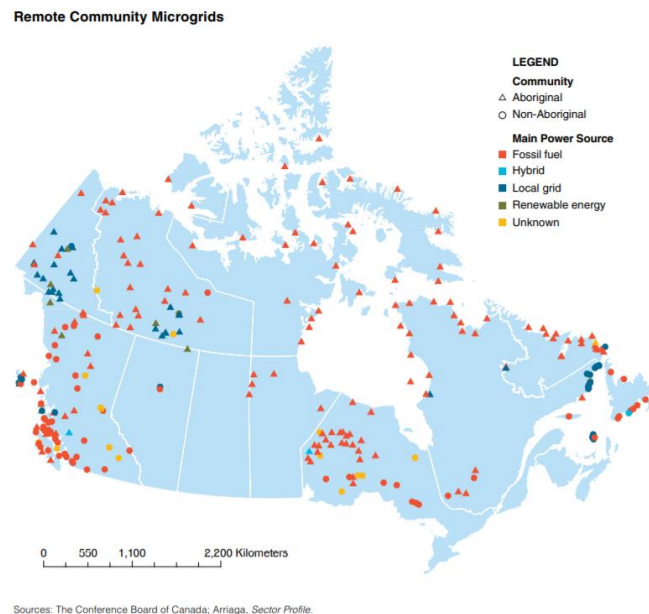


Figure 1-2- Communautés isolées et micro-réseaux. [6]

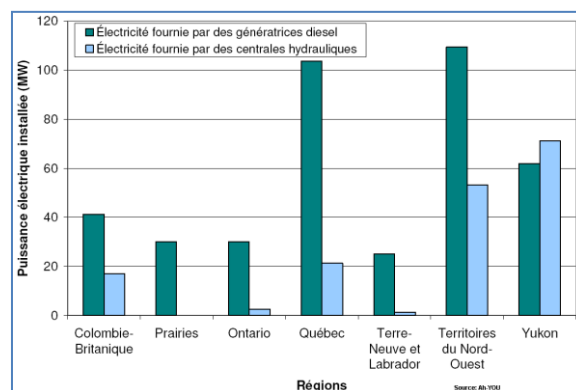


Figure 1-3 – Étude comparative sur l'électricité fournie sur les sites isolés. [8]

Cette ressource, malgré sa variabilité, demeure une alternative intéressante pour diminuer la consommation en carburant des GED et par le fait même, diminuer les GES. La Figure 1-4 présente un exemple de variabilité de la ressource éolienne pour une journée de 24 heures.

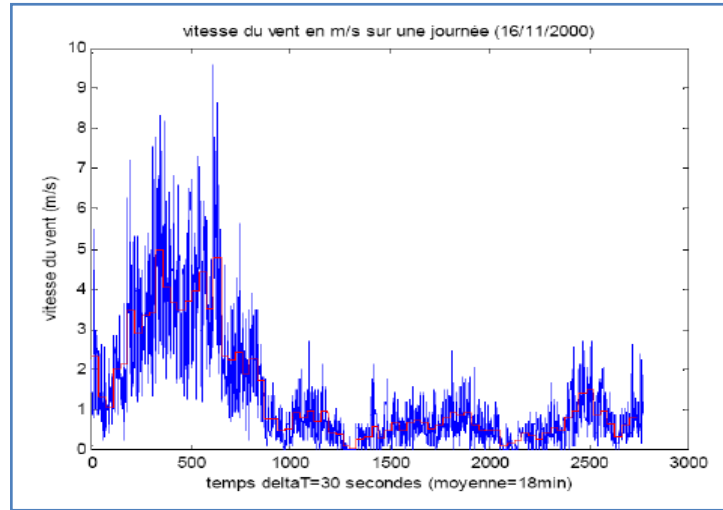


Figure 1-4 – Variabilité du vent pour une journée [9]

Pour quantifier le degré de pénétration de l'éolien associé au GED, on a défini le TPP comme le taux de pénétration instantanée en puissance éolienne et celui-ci s'évalue selon l'équation 1-1.

$$TPP = \frac{\text{Puissance des éolienne (kW)}}{\text{Charges électrique (kW)}} \times 100 \quad (1-1)$$

Une autre métrique d'importance est le taux de pénétration en énergie éolienne qui s'évalue selon l'équation 1-2.

$$TPE = \frac{\text{énergie annuelle produite par les éoliennes (kWh)}}{\text{énergie totale consommée par la charges électrique (kWh)}} \times 100 \quad (1-2)$$

On retrouve trois cas de figure qui se présentent selon l'évolution du TPP et du TPE. Dans le premier cas, on retrouve une configuration à taux de pénétration faible de l'énergie éolienne avec un $TPP < 50\%$ et un $TPE < 20\%$ (Figure 1-5). Dans cette configuration, les éoliennes agissent comme des sources secondaires. Le groupe électrogène fonctionne sans arrêt afin d'être la source de référence en tension et en fréquence. On enregistre alors une économie d'environ 15% sur la consommation de carburant selon l'emplacement géographique. Comme les variations de tension et fréquence sont gérées par le GED, il est pratiquement inutile d'avoir recours à un système superviseur de contrôle. En effet, si l'éolienne subit des variations dans sa puissance produite, le groupe électrogène adaptera la vitesse du moteur pour conserver la fréquence et la tension constante à la charge.

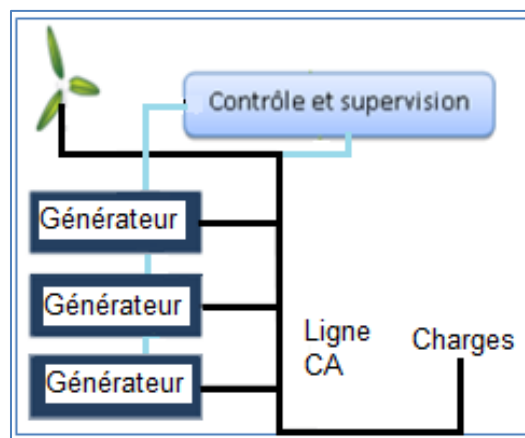


Figure 1-5 - Configuration faible taux de pénétration de l'énergie éolienne. [10]

Dans le second cas, pour la configuration à taux de pénétration moyen de l'énergie éolienne, pour un TPP se situant entre 50% et 100% et un TPE se situant entre 20% et 50% (Figure 1-6), les éoliennes agissent comme des sources

primaires ou secondaires dépendant de la disponibilité en ressource éolienne. Ici encore, le groupe électrogène fonctionne sans arrêt afin d'être la source de référence en tension et en fréquence. On enregistre une économie qui se situe entre 15% et 40% sur la consommation de carburant selon l'emplacement géographique. Pour obtenir un maximum d'économie, il est nécessaire de disposer d'une technologie de contrôle simple de la tension et de la fréquence. Pour disposer de l'excès de puissance éolienne, on ajoute des charges secondaires telles des résistances ou des éléments dissipateurs de chaleur servant au chauffage des bâtiments. On peut également réduire la production éolienne en contrôlant la vitesse des pâles au moyen d'un frein.

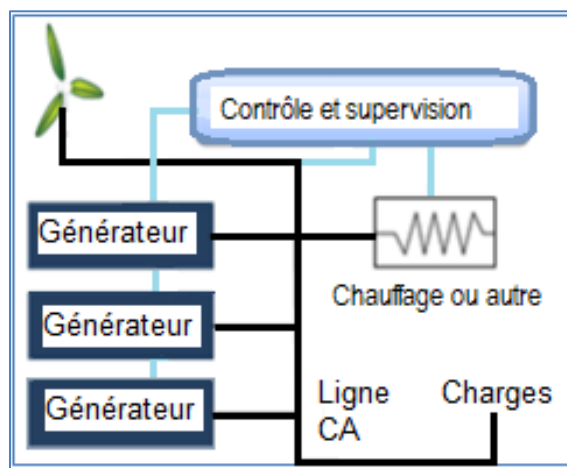


Figure 1-6 - Configuration taux de pénétration moyen de l'énergie éolienne. [10]

Dans le dernier cas, pour la configuration à taux de pénétration élevé de l'énergie éolienne, pour un TPP se situant entre 100% et 400% et un TPE se situant entre 20% et 150% (Figure 1-7), les éoliennes agissent comme des sources primaires ou secondaires dépendant de la disponibilité en ressource

éolienne. Contrairement au deux premier cas, le groupe électrogène sera mis à l'arrêt lorsque la disponibilité de la ressource éolienne sera suffisante pour rencontrer la demande [11]. On enregistre une économie qui se situe entre 50% et 90% sur la consommation de carburant selon l'emplacement géographique. Pour obtenir un maximum d'économie, il est nécessaire de disposer d'une technologie de contrôle un peu plus complexe que pour les deux premiers cas. Pour disposer de l'excès de puissance éolienne, on ajoute également des charges secondaires telles des résistances ou des éléments dissipateurs de chaleur. On peut également réduire la production éolienne en diminuant la vitesse des pâles au moyen d'un frein.

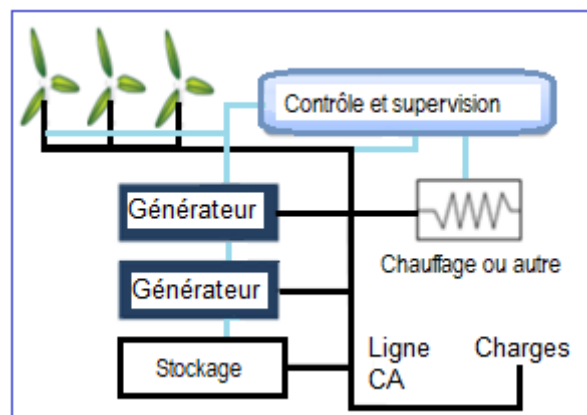


Figure 1-7 - Configuration taux de pénétration élevé de l'énergie éolienne. [10]

Pour obtenir un taux de pénétration élevé, le système doit être en mesure de stocker de l'énergie sous une forme quelconque et utilisable lorsque la ressource éolienne est au plus bas [12]. Le stockage par batteries n'est pas le seul moyen d'emmagasiner de l'énergie. Malgré leur forte densité d'énergie, les

batteries n'ont pas la cote auprès des environmentalistes et des économistes car le cycle de charge des accumulateurs chimiques est très faible (entre 500 et 1000 cycles pour les batteries li-ion dans de très bonne condition d'opération), utilise des ressources non renouvelables (lithium, plomb, ...) et sont très dommageables pour l'environnement car la plupart des matériaux ne sont pas recyclables [13] comme le lithium par exemple. Pour le moment, le stockage par batteries est un moyen à court terme pour obtenir un taux de pénétration élevé [14]. On retrouve d'autres alternatives telles que le stockage hydraulique [15], stockage de l'hydrogène pour être utilisé dans les piles à combustibles [16], stockage dans des supercondensateurs [17, 18], stockage par roue inertielle [19], stockage par air comprimé [20] pour n'en nommer que quelques-unes. À la Figure 1-8, nous présentons un résumé des différents types d'accumulateurs selon la puissance et l'énergie accumulée. On peut voir que les supercondensateurs ont une faible capacité en énergie mais une très forte capacité en puissance disponible pour un temps donné. L'utilisation des supercondensateurs s'avérera une alternative intéressante dans cette recherche lorsque nous modéliserons le SHEDAC avec le contrôle par SMA. Les méthodes de conception des supercondensateurs évolue rapidement à tel point qu'un banc de supercondensateur de 20 kW deviendra très abordable avec une durée de vie de plus de dix ans, très supérieure à celle des batteries.

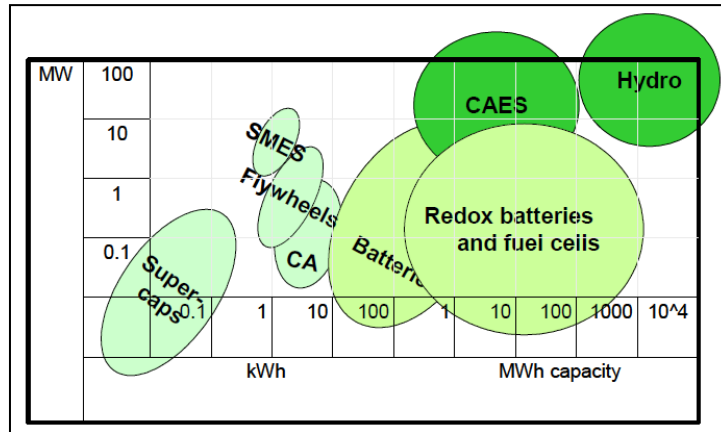


Figure 1-8 - Comparatif sur les types d'accumulateurs d'énergies [20].

La Figure 1-9 montre les différents types d'accumulateurs selon le coût en capital par unité d'énergie vs le coût en capital par unité de puissance.

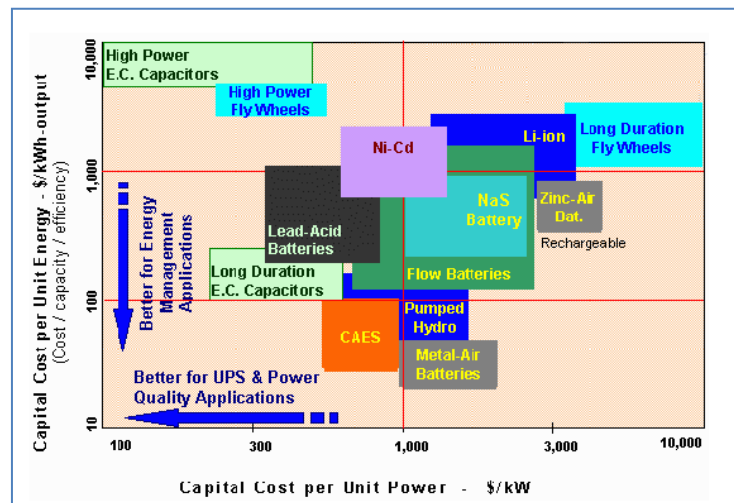


Figure 1-9 – Comparaison des différents moyens de stockage d'énergie en fonction de leur coût [8].

Une récente analyse [8] sur les types de stockage en fonction de plusieurs paramètres a donné comme résultat le stockage par air comprimé (CAES), solution permettant d'augmenter efficacement le TPP tout en étant sain pour

l'environnement, économique sur le long terme avec une efficacité s'échelonnant entre 70% et 85% lorsque des échangeurs de chaleurs sont ajoutés au système. On notera une augmentation des coûts de maintenance mais ceux-ci demeurent négligeables étant donné le nombre de cycles très élevé de cette méthode de stockage et, de plus, la maintenance que l'on retrouvait pour le GED conserve ou crée des emplois supplémentaires pour la communauté. On donne ci-après une définition pour chacun des acronymes apparaissant dans le graphique de la Figure 1-10: volant d'inertie (FES), stockage hydraulique (PHS), stockage sous forme d'air comprimé (CAES), batteries redox (RBES), batteries électrochimiques (BES), stockage d'hydrogène (HES), stockage thermique (TES), supercondensateurs (SCES), supraconductrice (SMES), Pile à combustible (PHS).

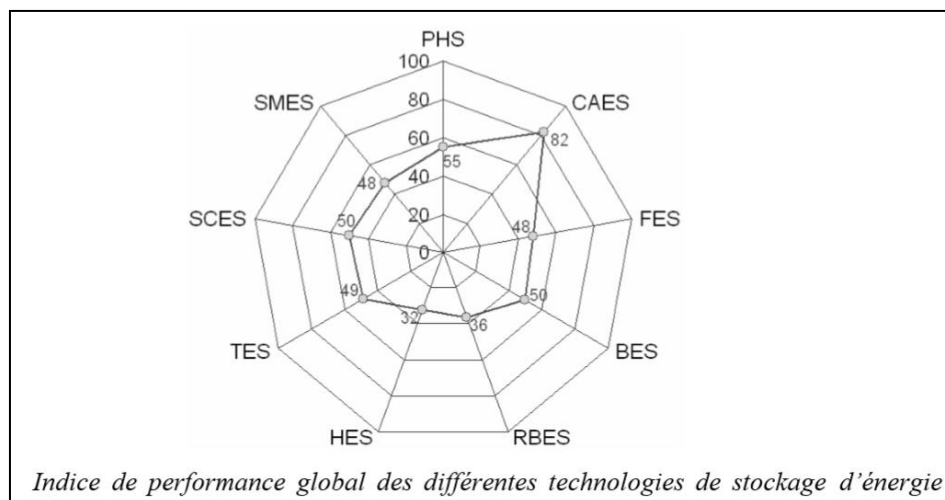


Figure 1-10 - Indice statistique sur les technologies de stockage [21]

De plus, le choix d'utiliser l'air comprimé comme méthode de stockage entraîne une amélioration des conditions d'opérations du GED par l'entremise de la

suralimentation [3]. En effet, il a été prouvé, hors de tout doute, par une expérience réalisée au LIMA à l'Université du Québec à Chicoutimi, qu'en appliquant une pression de suralimentation entre 2.3 et 2.8 bars, on obtenait des économies sur la consommation de carburant d'environ 5% à 50% de charge et de 10% à 100% de charge [7]. On notait, de plus, une amélioration notable sur la qualité de l'air indépendamment de la charge appliquée sur la génératrice [3]. On peut voir à la Figure 1-11 que le niveau de CO₂ décroît considérablement sur l'ensemble des charges appliquées et qu'à cette valeur de pression, les taux sont les plus bas.

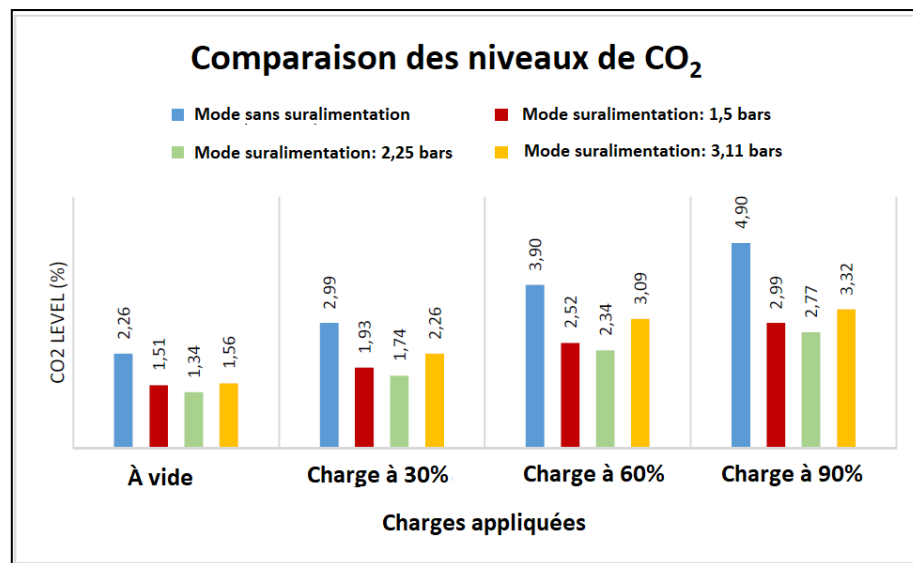


Figure 1-11 - Réduction du dioxyde de carbone par suralimentation. Co-auteur [7]

On retrouve également sur la Figure 1-12 la courbe d'efficacité du rapport air/carburant qui a été estimée à partir des données recueillies lors de l'expérimentation sur la suralimentation du moteur diesel. On peut voir que l'efficacité est maximale lorsque la pression de suralimentation se situe entre 2.3 et 2.83 bars. Cette donnée sera utilisée lors de la conception de l'agent informatique

qui fera la gestion du GED. L'agent GED surveillera en permanence la pression des réservoirs qui sert à stocker l'air comprimé pour que l'agent puisse activer la suralimentation en air du GED à une pression constante de 2.5 bars lorsque la situation se présentera selon la charge appliquée au GED. Cela aura pour effet de diminuer la consommation de carburant et la production de gaz à effet de serre et, par le fait même, une diminution des cycles de maintenance. Il est possible de suralimenter en continu le GED mais il sera intéressant dans une future étude de comparer entre une suralimentation en continu et une suralimentation lorsque le GED est en opération à 30% de sa charge.

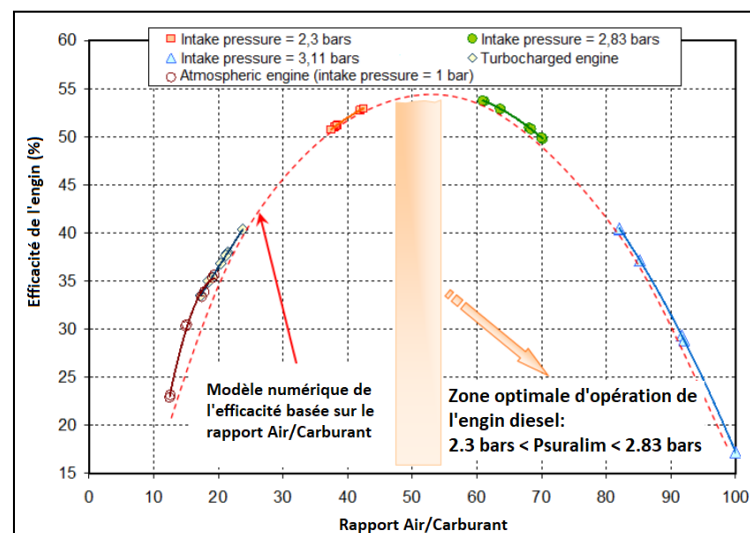


Figure 1-12 - Courbe d'efficacité de l'engin diesel en fonction du rapport air/carburant.
Co-auteur [3]

On imagine facilement que lorsque le GED se remettra en opération optimale, la valve de suralimentation qui sera réglée à une pression constante de 2.5 bars sera mise en fonction de manière continue lorsque la charge sera

minimale, soit vers les 30% de charges. À ce niveau de charge, la suralimentation assurera sa fonction qui est de minimiser la maintenance, la consommation et une diminution des gaz de combustion du moteur diesel. Lorsque le GED sera en dehors de cette zone, la valve se fermera et le GED fonctionnera sans suralimentation. De cette manière, il serait possible de disposer de moins de réservoir de stockage pour la suralimentation en air du GED. Cela pourrait jouer un grand rôle lors du dimensionnement des sources renouvelables et du GED.

1.2 Problématique

Nous avons dit plus haut que pour une augmentation du TPP, on se retrouvait avec un système de contrôle plus complexe pour éviter des cycles d'arrêt-marche du GED trop fréquent amenant une forte diminution de la durée de vie du GED. Le système de gestion de puissance représente une problématique intéressante car il faut trouver une stratégie de contrôle ou un algorithme qui permettra de rencontrer en tout temps la demande en puissance tout en optimisant l'économie en carburant du GED. La stratégie de contrôle qui en découle devra être modélisée et simulée dans l'environnement Matlab/Simulink. Par la suite, ce modèle sera implémenté dans une carte d'expérimentation et testé en site réel sur un système SHEDAC. Comme nous sommes en présence d'un système non linéaire, on devra choisir judicieusement une méthodologie de contrôle qui modulera la stratégie de contrôle selon la contrainte appliquée. À ce jour, il existe une panoplie de méthode de contrôle tant linéaire que non linéaire dont le rôle est de contrôler des processus variés mais seulement quelques-unes peuvent contrôler un système non linéaire indépendamment des perturbations engendrées sur le système. La plupart des méthodes de contrôle ne sont applicable que pour des systèmes ayant une constante de temps plus grande que pour notre système à l'étude. Dans cette thèse, nous avons effectué une revue de littérature sur la gestion d'énergie des systèmes hybrides autonomes et la conclusion qui en émane est qu'un système multi-agents (SMA) à comportement autonome intelligent serait en mesure de contrôler des convertisseurs de puissances pour rencontrer la

demande en électricité tout en diminuant la consommation de carburant diesel du GED. Pour améliorer la fiabilité et la qualité de l'énergie distribuée au réseau électrique autonome, un convertisseur statcom alimenterait les charges tout en respectant le facteur de puissance proche de l'unité.

Dans cette recherche, nous avons utilisé comme modèle de départ un système de commande multi-agents qui a été développé pour un système hybride branché sur un réseau électrique existant. Le système étudié fonctionne en bus CC avec convertisseur CC/CA triphasé (Statcom) pour les charges primaires. Le contrôle de puissance s'effectue en ajustant la sortie de chacun des convertisseurs CC/CC ou CA/CC, provenant de chacune des sources, au moyen d'un signal à rapport cyclique « Duty Cycle ». Le contrôle sur chacun des convertisseurs représente un pourcentage de puissance disponible de chacune des sources : valeur évoluant entre 0 et 5 V de tension moyenne au moyen d'un rapport cyclique sur la commande du convertisseur CC/CC ou CA/CC. Dans la partie simulation, il sera discuté de cette méthode de contrôle avec plus de détail. Le compresseur sera vu comme une charge supplémentaire qui n'affectera pas la gestion de puissance du système hybride, de même que pour le banc de supercondensateurs en mode charge lorsque l'état de charge (SOC) sera à 20% de charge. La stabilité du réseau électrique CA sera garantie par le maintien de la tension constante sur le bus CC qui alimentera le convertisseur CC/CA triphasé (onduleur ou STATCOM) tout en fournissant la puissance demandée. Le convertisseur triphasé CC/CA maintiendra en tout temps la fréquence du réseau et apportera la

puissance nécessaire à la charge primaire. Si l'onduleur présentait une défectuosité quelconque, le GED prendrait la relève en mode CA au moyen d'un contacteur qui le débrancherait du convertisseur CA/CC du réseau et d'un contacteur qui le brancherait sur le réseau CA à la sortie du STATCOM. Initialement, c'est le convertisseur STATCOM qui sera la référence en fréquence et en tension; le GED servant comme source primaire principale si l'ensemble des autres sources étaient incapables de rencontrer l'objectif principal de la commande.

Dans ce travail, on s'occupera exclusivement de la problématique du contrôle du système hybride de manière à optimiser la distribution des sources pour rencontrer l'objectif commun qui est l'utilisation minimale du GED. Le contrôle de l'air comprimé dans les injecteurs sera en activité lors de l'opération du GED à une pression constante de 2,5 bars. Un agent spécifique relié au compresseur vérifiera la disponibilité de l'air comprimé dans les réservoirs. On utilisera également une approche ascendante plutôt que descendante lors de la conception par SMA. Il est beaucoup plus simple de travailler avec des sous-systèmes dont on connaît très bien le fonctionnement qu'avec un système dont on ne sait pas comment il réagira si on agit sur un ou plusieurs de ses éléments. Dans la méthode descendante traditionnelle, on s'occupe du comportement global pour résoudre le problème tandis que la méthode ascendante prend bien soin de contrôler chaque élément avant de s'occuper du comportement global.

On adjoint également un condensateur qui sera lié au bus CC afin d'atténuer les variations de haute-fréquence qui se produiront inlassablement lors du partage de puissance des sources et qui servira à construire le modèle mathématique pour l'injection du courant dans le réseau tandis qu'un banc de supercondensateurs apportera l'énergie nécessaire au bus CC le temps que le GED reparte pour réalimenter le bus ou pour stabiliser rapidement le bus CC lors des variations rapides de vent (turbulences). L'élément moteur à air comprimé plus générateur (MAC-GEN) participera également à cette fonction. Dépendant du temps que prendra la ressource à se renouveler, il faudra redimensionner la capacité de stockage autant pour l'air comprimé que pour la charge du banc de supercondensateur afin de diminuer les cycles arrêt-marche du GED, ce dont nous reparlerons dans la partie expérimentation et qui sera abordée uniquement sous l'aspect théorique car le sujet de la thèse ne portant pas sur l'optimisation des sources et des capacités de stockage de l'énergie.

1.3 Objectifs de recherche

1.3.1 Objectif principal

L'objectif principal est la modélisation et l'implémentation d'un contrôleur multi-agents pour un système SHEDAC dont la demande en puissance sera rencontrée en tout temps indépendamment de la charge, en conservant la tension et la fréquence constante sur le micro-réseau isolé ou branché à un réseau domestique. On devra maintenir un taux de pénétration éolien maximal afin de

maximiser l'économie en carburant, diminuer la maintenance du GED par la suralimentation avec de l'air comprimé et par une diminution des cycles arrêt-marche du GED. Par le fait même, on enregistrera une diminution des GES (Gaz à effet de serre) ainsi que d'autres gaz en utilisant conjointement l'air comprimé pour la suralimentation du GED.

1.3.2 Objectifs spécifiques

- Permettre autant que possible une adéquation entre la production et la demande en énergie d'un système SHEDAC.
- Maintenir une tension et une fréquence stable du réseau électrique autonome indépendamment de la charge appliquée au réseau à l'aide d'une gestion appropriée de la puissance de chacune des sources.
- Augmenter la pénétration éolienne au moyen d'un stockage par air comprimé sans modifications majeures au moteur diesel. On devra moduler convenablement la pression de l'air dans le cylindre selon la charge appliquée sur le moteur diesel.
- Résoudre le problème des fluctuations haute-fréquences de l'énergie éolienne pour augmenter la stabilité et la fiabilité du réseau électrique autonome par l'entremise d'un banc de supercondensateurs.
- Résoudre le problème des fluctuations à basse fréquence de l'énergie éolienne pour augmenter la stabilité et la fiabilité du réseau électrique autonome en utilisant l'air comprimé.

- Assurer un arrêt total du GED lorsque la ressource renouvelable est disponible au-dessus d'un seuil de sécurité et repartir le GED sans affecter la qualité de la tension et de la fréquence du réseau électrique. Pour ce faire, on disposera en tout temps d'un backup de 30 minutes minimum pour soutenir le réseau le temps que le GED puisse atteindre sa température nominale de fonctionnement. Le réseau sera soutenu soit par le banc de supercondensateur, soit par le MAC-générateur.
- Faciliter l'expansion du système hybride lors d'ajout de composants supplémentaires: par exemple des panneaux photovoltaïques (PV), pile à combustible ou toute autre source quelconque à énergie renouvelable sans modification du logiciel de gestion de puissance dans les autres microcontrôleurs et sans affecter la qualité de la demande en énergie. Les agents sauront reconnaître les nouveaux venus dans le système.
- Diminuer les coûts de maintenance et d'opération tout en diminuant les GES à la consommation du diesel au moyen de la suralimentation.

1.3.3 Hypothèses liées au fonctionnement du système :

- On suppose que la compression et la détente de l'air comprimé s'effectue en mode adiabatique ou à température constante, i.e. que le système est composé d'un échangeur de chaleur doublé d'un système de stockage de la chaleur qui pourra retourner cette chaleur pour réchauffer le fluide gazeux lors de la détente.
- On suppose également l'utilisation d'un STATCOM ou d'un convertisseur CC/CA qui alimentera les charges et s'occupera de maintenir un facteur de puissance proche de l'unité.
- On suppose aussi que le réseau est doté de contacteurs et de disjoncteurs nécessaires pour protéger le réseau électrique et les consommateurs de

toutes avaries quelconques pouvant se produire en tout temps. Les agents informatiques utilisés dans cette thèse ne sont pas programmés pour s'occuper de la protection du réseau électrique contre les fautes et les chutes du réseau par un bris quelconque. Cette programmation pourra être implémentée ultérieurement lors d'une installation sur site réel.

- On suppose que chacune des sources disposent d'une unité de contrôle optimisant la puissance optimale en tout temps durant son fonctionnement. Par exemple, l'éolienne sera munie d'un contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour obtenir le maximum de puissance selon l'angle des pales et la vitesse du vent (tip speed ratio).
- La variation de tension et de fréquence lors d'une variation de la charge consommateur doit varier à l'intérieur d'un intervalle de temps plus grand que la réponse du contrôleur et du temps de réaction des unités de production.
- Les sources d'énergies renouvelables (éoliennes, MAC-GEN) seront situées dans un rayon de 200 m afin d'assurer une communication radio à haut débit (mode WIFI). Dans le cas contraire, la communication entre les sources se fera selon un mode filaire (mode CAN) ou par onde Hertzienne basse fréquence (modèle RFM9x LoRaWAN mode FSK à 900 MHz) dont la distance en ligne de visé peut atteindre jusqu'à 20 Km.
- On fera également l'hypothèse que le système hybride a été dimensionné d'une manière optimale afin d'éviter de dissiper dans des charges secondaires l'énergie en excès. Les seules charges secondaires apparaissant dans le réseau proviennent de l'alimentation en air comprimé et de la recharge du banc de supercondensateurs. Cette recherche ne prend pas en charge l'optimisation des sources et des unités de stockage d'énergie. Cette optimisation se fera dans une étude ultérieure en utilisant la méthode de l'algorithme génétique.

- Finalement, les conditions météorologiques ont été mis à l'écart dans l'élaboration du programme de contrôle par SMA.

1.4 Contribution à la recherche

L'originalité de cette recherche réside dans l'idée proposée qui consiste à utiliser un système multi-agents (SMA) comme gestionnaire de puissance d'un SHEDAC, une avenue qui semble prometteuse mais qui n'a pas été envisagée jusqu'à tout récemment pour le SHEDAC. De plus, les systèmes de gestion de puissance rencontrés dans la littérature sont, pour la grande majorité, de nature fortement électromécanique et malheureusement centralisé tandis que le type de contrôle discuté dans cette thèse est de nature faiblement électromécanique et fortement électrique dont le contrôle sera décentralisé et agira en tout temps sur le réseau CC commun aux sources. Dans la revue de littérature, il n'est fait mention d'aucun système de gestion de puissance d'un SHEDAC contrôlé par un SMA. Le sujet de cette thèse porte principalement sur le contrôle d'un SHEDAC, opérant en site isolé ou non, agissant comme un micro-réseau implémenté par un ensemble d'agents informatiques. Les agents sont dotés d'une intelligence minimale s'occupant chacun de leur source et communiquant des informations entre eux. Ces informations servent à résoudre un objectif commun qui est de rencontrer en tout temps la demande en puissance de la charge primaire i.e. la charge consommateur; l'idée principale étant de contrôler le flux d'énergie global demandé par la charge en coordonnant au moyen d'agents intelligents les flux d'énergies locaux par ajustement des courants du bus primaire au moyen du convertisseur

d'énergie associé à chacune des sources. On notera également que le très grand avantage d'utiliser un SMA se trouve dans l'ajout ou l'enlèvement d'une source à chaud sans affecter le fonctionnement du système hybride. De plus, pour réduire considérablement la sollicitation du GED, nous avons ajouté un banc de supercondensateur ainsi qu'un MAC-Générateur qui servira à soit à remplir les réservoirs d'air comprimé ou à produire de l'électricité avec un générateur synchrone.

Une contribution de la thèse apparaît également dans l'idée de contrôler la suralimentation du GED par un agent logiciel intégré au GED, les paramètres de contrôle étant constant pour être intégré au contrôle. Les résultats de compression proviennent d'une expérience réalisée au laboratoire LIMA sur un GED de 7,5 kW à un cylindre relié à une génératrice d'une puissance de 5 kW. Les mesures ont été planifiées avec (4) quatre niveaux de pression de suralimentation (à vide, 1 bar, 2.25 bars, 3 bars) et (4) quatre niveaux de charge (à vide, 30%, 60% et 90%). Ces facteurs ont permis de constater qu'une pression de suralimentation située entre 2.25 bars et 2.83 bars était celle qui réduisait au mieux la consommation en carburant (une réduction de 30 % en moyenne) peu importe la charge et par le fait même diminuait la proportion stoechiométrique des gaz de combustion. L'application de cette pression de suralimentation sera beaucoup plus efficace plus particulièrement lorsque le GED sera sollicité à 30% de sa charge.

1.5 Méthodologie

On résume ci-après les démarches nécessaires pour la réalisation complète du projet de recherche.

- Une revue de littérature sur la gestion de puissance est effectuée afin de vérifier les tendances et problématiques dans les contrôles de gestion de puissance d'un système hybride. Cela a permis de vérifier une tendance vers l'utilisation d'une gestion de puissance par multi-agents pour résoudre la problématique du projet de recherche.

- Une recherche non exhaustive sur le SMA ainsi que sur les moyens de programmer des agents sur une carte microcontrôleur à l'aide d'un langage approprié (C#, C++, Java, Python ...).

- Une modélisation du système sera effectuée en utilisant les éléments adéquats du système sous forme analytique. Une fois décrit le modèle de chacun des éléments, établir une stratégie de contrôle pour concevoir le modèle de gestion multi-agents. Chaque agent sera autonome avec pour objectif d'optimiser la fonction coût qui sera de diminuer la consommation de carburant du moteur diesel tout en rencontrant les objectifs du projet de recherche.

- La simulation du modèle sera ensuite exécutée dans l'environnement Matlab/Simulink. Nous pourrons par la suite utiliser les résultats de la simulation et les comparer avec les résultats de l'expérimentation.

- L'expérimentation, qui est la réalisation matérielle du contrôleur, est réalisée avec une carte de développement qui a été choisie selon des critères spécifiques.

- Analyser la robustesse du système aux bruits et aux variations rapide et lente de la charge tant résistives qu'inductives lors de l'expérimentation.

- Conclusion, conduite future du projet et amélioration à apporter à la commande SMA du système hybride.

1.6 Plan de la thèse

Pour répondre aux objectifs cités précédemment, cette thèse a été divisée en **six** chapitres.

Le **chapitre 1** introduit le sujet de recherche avec ses problématiques, les objectifs fixés et la méthodologie suivie pour les atteindre.

Le **chapitre 2** est consacré à une revue de la littérature concernant les systèmes de contrôle existant pour les systèmes hybrides SHED et SHEDAC.

Le **chapitre 3** discute du paradigme des agents logiciels ainsi que l'utilisation de ceux-ci pour le contrôle des systèmes complexes.

Le **chapitre 4** présente la modélisation et la simulation d'un système hybride SHEDAC contrôlé par des agents logiciels.

Le **chapitre 5** décrit le banc d'essai d'un système hybride dont la puissance de chacune des sources est contrôlée par un agent logiciel implémenté dans un microcontrôleur dont le programme est conçu en langage python. Pour la communication entre les agents sources, le mode WI-FI sera considéré en premier lieu car si la communication par la voie des airs s'avère impossible, il y aura possibilité de communiquer par le mode filaire (mode CAN), un mode de communication qui est très prisé dans le domaine de l'automobile, tant pour la vitesse de communication que pour son faible taux d'erreur. Ce système de communication permet à plusieurs microcontrôleurs de communiquer entre eux des informations permettant de maintenir le bon fonctionnement du système.

Finalement, la thèse se termine par les conclusions et les recommandations (**chapitre 6**) dégagées du sujet de recherche.

A la suite des recommandations, on trouvera la liste des articles dont l'auteur de cette thèse a contribué en tant qu'auteur ou co-auteur. Finalement, la bibliographie et les annexes contenant de l'information technique finalisent cette thèse.

CHAPITRE 2

2. REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, une revue de littérature a été réalisée afin de déterminer la tendance dans les stratégies de gestion de puissance que l'on retrouve dans les systèmes hybrides avec et sans stockage d'énergies. Dans un premier temps, nous comparons les stratégies de gestion de puissance sur les systèmes hybrides indépendamment des sources constituant le système. Dans un second temps, nous abordons les stratégies de gestion de puissance pour des systèmes hybrides constitués d'un stockage par air comprimé jumelé avec un GED.

2.2 Stratégie de gestion de puissance

2.2.1 Stratégies de gestion de puissance pour les systèmes hybrides

Depuis les travaux fondateurs de E. W. Golding paru en 1955, des simulations initiales d'un système hybride laissaient entrevoir une réduction appréciable de la consommation de carburant du GED [22]. Les décennies 80 et 90 ont été très riches en développements pour le SHED, mais les chercheurs bloquaient sur une difficulté, soit celle de pouvoir éteindre le GED car les cycles arrêts-démarrages étaient trop fréquents, ce qui limitait considérablement le TPE, pouvant aller jusqu' à aussi peu que 17% dans les applications pratiques [23]. La

poursuite des simulations et expérimentations aura permis, en quelques années, d'aboutir à des modèles plus détaillés intégrant plusieurs éoliennes ainsi qu'un GED fonctionnant en parallèle [22], l'optimisation n'ayant pas été considérée à cette étape d'analyse.

Dans la même suite logique, L'IREQ, un institut de recherche d'Hydro-Québec, a expérimenté en 2002 un système de production d'énergie sans stockage constitué d'un groupe électrogène et d'une turbine éolienne [24, 25] qui s'est avéré très prometteur au niveau du taux de pénétration de l'énergie éolienne (entre 10 et 40% dépendant du site d'opération). Malheureusement, ce système n'était toutefois pas à l'abri de problème qui apparaissaient, notamment, sur la fréquence de cycle arrêt/marche encore trop élevée du GED lorsque la ressource éolienne dépassait le pic de puissance annuel, des problèmes récurrents liés à la maintenance du système électronique et de l'obligation de maintenir un fonctionnement minimale du GED lorsque la ressource éolienne était secondaire étant donné la variabilité de celle-ci, ce qui entraînait une augmentation des coûts de maintenance du GED. Le principal avantage dans le développement de ce système venait de la nécessité de diminuer les coûts d'opérations des sites isolés alimentés au Diesel; en effet, la société d'état Hydro-Québec perd annuellement près de 133 millions de dollars à cause de l'écart entre le coût de production de l'électricité et sa tarification au même tarif que pour la population alimentée par le réseau national d'électricité, soit en moyenne un tarif de \$0.05/kWh comparativement à une moyenne de \$0.50/kW.

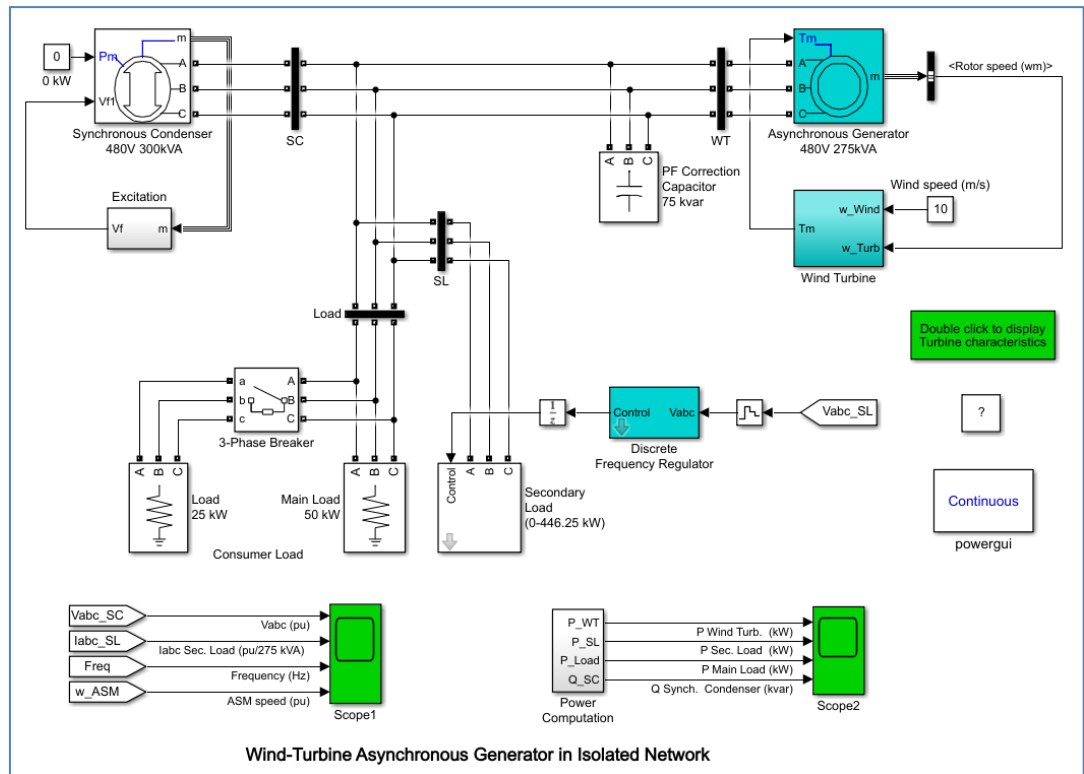


Figure 2-1 -Schéma bloc d'un jumelage éolien-diésel sans stockage (source : IREQ [25].

On présente à la Figure 2-1 le schéma électrique du système hybride qui est constitué de l'éolienne figurée comme génératrice asynchrone de 275 kVA et du groupe électrogène représenté par la génératrice synchrone de 300 kVA. Le schéma ne montre pas le détail du contrôle, uniquement les charges secondaires, les charges principales et le contrôle en fréquence du système. C'est un modèle générique de haute pénétration éolienne sans unités de stockage dont le générateur synchrone agit présentement comme condensateur synchrone lorsque la ressource éolienne est suffisante et que le GED est à l'arrêt. Ce système a été commercialisé pour la première fois en Alaska en 1999 [26, 27] par l'entreprise

Northern Power Systems (Vermont, USA). Dans ce cas particulier, l'efficacité du SHED (Système Hybride Éolien-Diesel) n'est pas très élevée de par la dissipation de l'énergie éolienne dans des charges secondaires durant les périodes où la puissance éolienne disponible est supérieure à la demande. L'efficacité de ce système dépend très fortement de la ressource éolienne et du coût en carburant incluant le transport.

Pour réduire la consommation en carburant, il faut que le taux de pénétration en puissance (TPP) soit plus élevé que l'unité (voir Introduction, Chapitre 1). Il s'avère que pour une augmentation du TPE, il sera nécessaire de conserver l'énergie excédentaire sous une forme ou une autre qui sera réutilisée plus tard. La première forme connue de stockage de l'énergie dans les systèmes isolés fût l'utilisation de batteries électrochimiques. Ce système de stockage fût installé à Krasnoe [28], en Russie (voir Figure 2-2) dans un système hybride. Dans cette configuration, on retrouve deux turbines éoliennes de 10 kW, une banque de batteries de 48 V et un GED. Les convertisseurs AC/CC/AC associés à un système de contrôle permettaient de diriger la puissance nécessaire sans utiliser de charges secondaires dissipatives, la banque de batteries jouant le rôle de charge secondaire lors des périodes de recharge.

Ce système souffre néanmoins d'un nombre de cycle d'arrêt/démarrage du diesel encore très élevé dont le désavantage est de produire une usure prématurée du GED [3]. On assistait également à un renouvellement fréquent des batteries car dépassant rapidement le nombre de cycles de charge/décharge,

limité à cette époque à 700 cycles environ dans le meilleur des cas. On retrouverait le même problème si le stockage de l'énergie était effectué par tout autre type de système de stockage, le défaut provenant d'un contrôle défaillant permettant de gérer convenablement la ressource éolienne, l'énergie stockée et le GED.

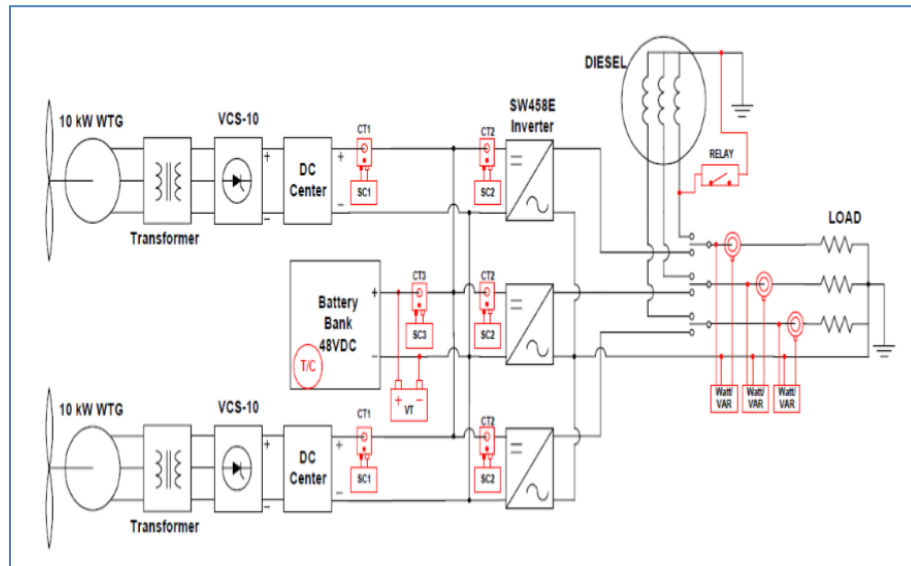


Figure 2-2 - Système hybride avec stockage par batteries d'énergie excédentaire. [28]

On s'attaqua alors au dimensionnement du système hybride pour vérifier s'il y avait une possibilité d'augmenter l'efficacité du système hybride. Dans [29], divers paramètres ont été mesurés pendant une période de 6 mois sur un système éolien-diesel avec stockage par batteries. L'objectif principal était d'estimer l'efficacité du système éolien-diesel avec charges dissipatives de manière à trouver le bon dimensionnement des composants et par la suite de déterminer s'il y avait une stratégie plus adéquate pour le contrôle du système. L'aérogénérateur était pourvu d'une puissance de 10 kW (modèle Excel de Bergey Windpower

USA), le banc de batteries était constitué de 60 cellules, chacune d'une tension de 2 volts, configurée en série pour fournir 120 Volts sur un bus DC. Le bus était ensuite converti en bus AC par un inverseur triphasé CC-AC. Le stockage d'énergie était de 67 kWh. La stratégie de contrôle du système hybride était très simple et utilisait un contrôle PID. Lorsque les piles étaient rechargées, le trop plein d'énergie se dissipait dans des charges qui réchauffaient des réservoirs d'eau, ce qui diminuait l'efficacité du système hybride. Le dimensionnement de l'inverseur jouait également un rôle dans l'efficacité du système car la limite de 4,5 kW était souvent dépassée faisant en sorte que le diesel souffrait également d'un cycle élevé d'arrêt-démarrage. En conclusion, le principal problème était la variabilité de la ressource éolienne qui représentait un défi énorme pour une alimentation en continu des sites isolés.

L'objectif principal recherché étant d'exploiter un système à haute pénétration où les fluctuations de la puissance éolienne sont compensées par une stratégie de commande appropriée, on fit alors appel à de l'écrêtage, exploitant une stratégie que l'on nomme "Virtual Spinning Reserve" [30]. L'idée qu'un SHED puisse fonctionner sans unité de stockage d'énergie est encore considérée aujourd'hui comme une idée très attrayante en raison d'une anticipation sur la rentabilité du SHED mais les chercheurs furent obligés de regarder la possibilité de stocker l'énergie perdue sous une quelconque forme et les recherches se sont alignées dans cette direction.

Le raffinement de la stratégie de commande et l'étude de la dynamique du système font éventuellement augmenter le TPE a plus de 56% [31]. Aujourd'hui, cette valeur de TPE correspond à un SHED de moyenne pénétration [20]. Cela a permis de bien comprendre le comportement dynamique de la tension et de la fréquence du réseau de telles sortes qu'ils demeurent stables dans ces conditions de pénétration [31]. Malgré ces avancées, il restait à résoudre le conflit entre la nécessité d'éteindre le GED pour limiter la consommation de carburant alors qu'on souhaite éviter les démarrages trop fréquents ainsi que les plages d'opération à faibles charges [20].

Selon [32], les travaux concernant le SHED sont axés sur deux aspects du problème de gestion des diesels. D'une part on souhaite comprendre et limiter l'impact des arrêts ou des variations de vitesse des diesels sur la stabilité de la tension et de la fréquence du réseau [22, 31] et d'autre part, on recherche une stratégie adéquate qui permettra de diminuer l'opération du GED. Pour la partie électrique, les modèles présentés jusqu'à maintenant atteignent la complexité requise pour permettre la simulation au niveau des composants électroniques (MATLAB/Simulink), ce qui correspond nettement au niveau sous-transitoire exprimant la dynamique du système dans les échelles de la milliseconde [33]. De plus, les chercheurs s'affairent à proposer des systèmes de commande de plus en plus sophistiqués pour tenter de réguler l'alimentation de la charge malgré les perturbations et, en général, sans utiliser de stockage d'énergie [33]. Des

approches classiques avec des contrôleurs PI ou PID [22] ou des approches plus séquentielles [30] laissent maintenant leur place à des algorithmes plus avancés, comme le "Evolutionary Particule Swarm Optimization" [34]. On parle même de dimensionnement du système et de son optimisation avec des algorithmes comme le "Imperialist Competitive Algorithm" ou le "Ant Colony Optimization" [35]. Avec l'avènement de l'algorithme génétique, de nouvelles méthodes d'optimisation [36] améliorent grandement l'efficacité du SHED.

Les approches sur ces deux fronts permettent des progrès importants de la performance mais exposent aussi, au final, les limites des systèmes de commande : le stockage d'énergie est inévitable pour atteindre les plus hauts TPE [8]. Cette approche permettrait, entre autres, de relaxer les requis sur la vitesse de reprise en puissance des diesels en disposant de réserves rapides pour pallier les fluctuations de la charge et de la source éolienne [8, 33, 37]. Pour les sites isolés, des recherches sont nécessaires pour améliorer l'efficacité du système tout en diminuant l'apport du diesel. Les recherches tendent à se diriger vers les micro-réseaux autonomes supportés par le GED comme source primaire ou "Backup" du système hybride.

2.2.2 Stratégies de gestion de puissance pour le SHEDAC.

On retrouve très peu de documentation concernant des stratégies de commande pour le SHEDAC (Système Hybride Éolien-Diesel à Air Comprimé) qui ont été mise en pratique autrement que par la simulation. Il en existe néanmoins

une quantité non négligeable pour les systèmes hybrides avec stockage par batteries, avec stockage par hydrogène pour alimenter des piles à combustible ou par d'autres moyens de stockage autre que le stockage par air comprimé. Des simulations ont été effectuées dans pratiquement tous les cas mais peu ont trouvé preneur sur une expérimentation en temps réel.

Comme la puissance demandée est au cœur de la stratégie de commande, on retrouve des capteurs de tension et courant pour la mesure de la puissance disponible pour les sources s'effectuant en temps réel et la plupart des systèmes de gestion de puissance sont gérés par cette connaissance.

Plusieurs projets utilisant le stockage CAES ont également vu le jour [21] soit en stockant de l'énergie par des réservoirs à haute pression ou d'anciennes cavernes de sel. Ce procédé de stockage est actuellement en opération en Allemagne et ce, depuis 20 ans, à la centrale Huntorf. Pendant la période « hors pointe » où le coût de l'énergie est à son plus bas, un compresseur consomme de l'énergie pour comprimer et stocker de l'air dans des cavités salines souterraines. Ultérieurement, pendant les périodes de pointe où le coût en énergie est plus élevé, le processus est inversé; l'air comprimé est renvoyé à la surface et est utilisé pour brûler du gaz naturel dans des chambres à combustion (voir Figure 2-3). Le gaz de combustion résultant est alors détendu dans une turbine à gaz à deux étages entraînant un générateur qui a pour fonction de produire de l'électricité. Le réservoir de 310 000 m³ pressurisé entre 43 et 70 bars était capable de fournir 290 MW pendant 3 heures.

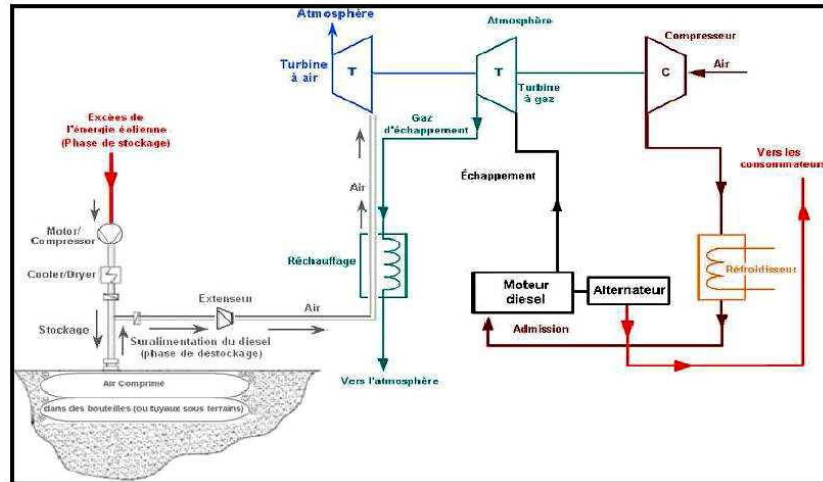


Figure 2-3 - Centrale Huntorf (Allemagne). [38]

Une autre manière d'utiliser l'air comprimé est de suralimenter en air les cylindres du moteur Diesel lors de l'étape de compression. La Figure 2-4 montre les étapes correspondant à la compression et à l'expansion de l'air pour produire de l'électricité durant les périodes de pointe. Cet air pourrait servir à suralimenter le GED afin de diminuer sa consommation en carburant et, par le fait même, diminuer les gaz de combustion. Dans notre étude sur le contrôle d'un SHEDAC, il sera fait mention de ce procédé pour augmenter la puissance du moteur diesel et faire en sorte de diminuer sa consommation en carburant. En effet, si l'éolienne suffit amplement à la demande en puissance, le groupe Diesel est mis en opération minimale. Dans ce mode d'opération, il y a consommation de 50% du carburant à puissance nominale.

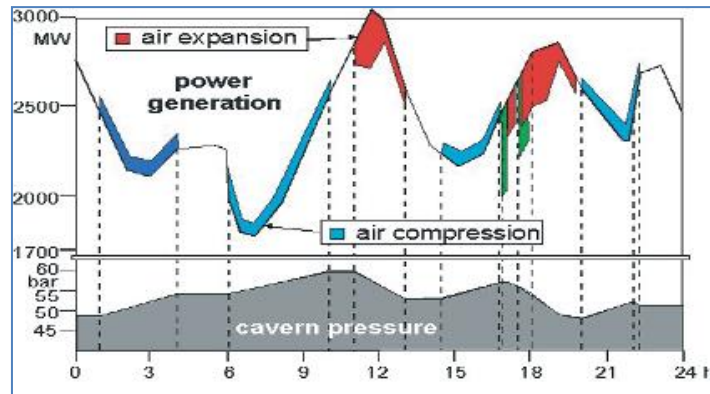


Figure 2-4 – Exemple de production d'énergie pendant une journée à la centrale Huntorf. [38]

L'ajout d'un volume d'air supplémentaire dans chacun des cylindres à l'avantage de procurer un couple plus élevé d'où une diminution de la charge vue par le moteur diesel faisant ainsi diminuer la consommation de carburant et par le fait même diminuer les GES et les émanations particulières SO_x et NO_x .

De manière générale, lorsque la pénétration éolienne est faible ou moyenne, c'est l'utilisation du groupe Diesel qui aide à maintenir le réseau stable en tension et en fréquence en tout temps. C'est la référence sur laquelle on devra toujours s'appuyer si nous optons pour un bus CA. Dans le cas d'un bus CC, c'est le convertisseur CC/CA (STATCOM) qui maintiendra cette stabilité en tension et en fréquence; il s'agira de stabiliser la tension du bus CC dans une certaine échelle de valeur. C'est l'option qui est préconisée dans cette thèse.

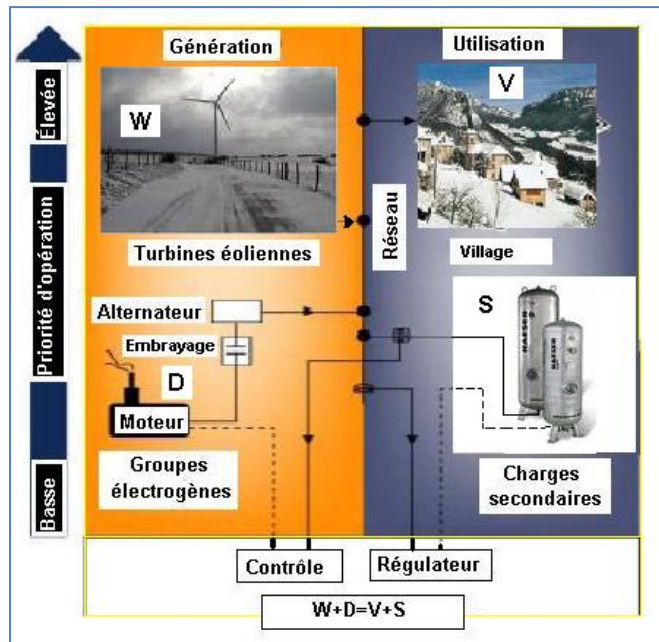


Figure 2-5 – Schématisation sommaire d'un système hybride SHEDAC. @Richard Lepage

Dans le système SHEDAC, le principal objectif est d'augmenter le taux de pénétration éolien (TPP) du système hybride en stockant l'énergie excédentaire sous forme d'air comprimé comme nous pouvons le voir sur le schéma simplifié à la Figure 2-5. Durant les périodes où la demande est creuse, l'énergie excédentaire est utilisée pour comprimer de l'air dans des réservoirs à haute pression. Si la ressource éolienne est insuffisante et que le réservoir d'air comprimé est plein, l'air sera libéré pour alimenter les cylindres du moteur diesel (Figure 2-6). Si un bris survient au niveau de la turbine éolienne, le groupe diesel où l'alternateur alimenté par l'air comprimé prendra la relève, le temps nécessaire à une réparation des composants défectueux.

Le stockage de l'air comprimé s'effectue uniquement durant les périodes où la demande en énergie est plus faible que la puissance produite, utilisant le reste d'énergie pour stocker de l'air comprimé fourni par le compresseur. Il y aura effectivement une perte non négligeable (environ 15% de perte) mais c'est toujours mieux que de perdre toute cette énergie. On comprendra que le compresseur agit comme une charge secondaire.

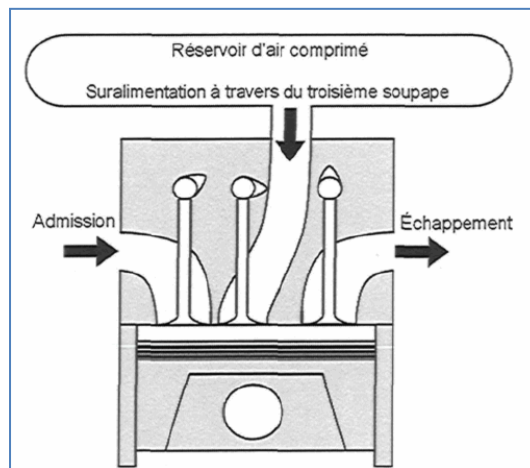


Figure 2-6 – Admission directe dans un des cylindres du moteur diesel. [37]

Une autre utilisation possible de l'air comprimé pourrait servir à ajouter un couple temporaire au groupe diesel en affectant un démarrage plus rapide et silencieux si celui-ci est au repos (démarrage pneumatique ou hydraulique) provoquant moins de perturbation sur le réseau mais requérant par contre un contrôle plus complexe car la référence en tension et en fréquence disparaît lors du repos du groupe électrogène, à moins d'avoir un bus CC maintenu constant alimentant un convertisseur DC/CA triphasé. Une autre utilisation de l'air comprimé consiste à alimenter un moteur à air comprimé doublé d'une génératrice synchrone

pour soutenir le réseau le temps que le GED reparte et atteigne sa température nominale de fonctionnement (méthode MAC-générateur). L'efficacité de cette méthode est assez faible mais peut rendre des services tout de même appréciables de quelques minutes à quelques heures dépendamment de la dimension des réservoirs. La Figure 2-7 présente le schéma d'un tel système.

Le stockage par air comprimé est vu comme une solution des plus prometteuses car elle ne pollue pas, sa durée de vie est très supérieure à celle des accumulateurs (dépend de la durée de vie des réservoirs) et ne souffre pas (ou très peu) de contraintes limitant le nombre de cycles de charge des accumulateurs d'aujourd'hui.

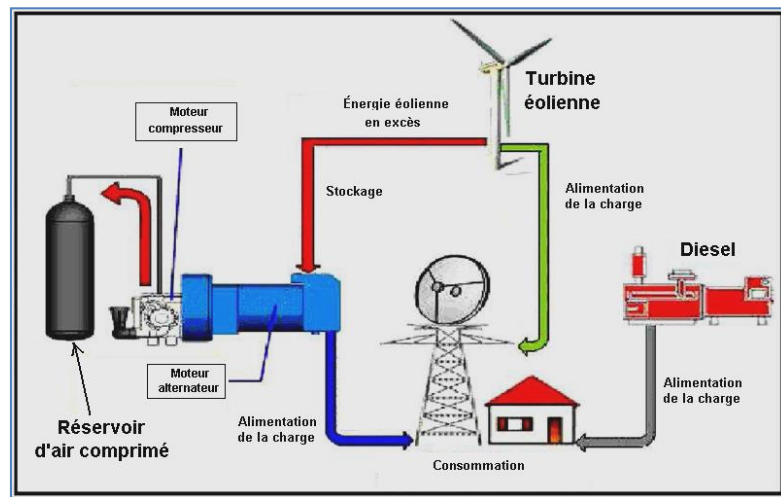


Figure 2-7 – Expansion de l'air comprimé dans un moteur/alternateur. [21]

Pour les accumulateurs chimiques, le nombre de cycle de charge est actuellement limité entre 500 et 1500 cycles tandis que le nombre de cycle compression/expansion d'un réservoir de stockage par air comprimé n'aurait

pratiquement pas de limite, limité uniquement par les contraintes des matériaux utilisés pour la fabrication du réservoir d'air comprimé, qui est habituellement conçu en fibre de carbone pour des pressions très élevées; on parle alors de pression pouvant atteindre 300 à 500 bars. Les accumulateurs chimiques présentent également le défaut d'être des composants non recyclables qui sont rejetés dans la nature à la fin de leur cycle de vie. De plus, en considérant le nombre limité de cycles des accumulateurs chimiques, les coûts deviennent très élevés si nous envisageons d'obtenir une bonne capacité de stockage comparativement à la solution du stockage par air comprimé. Le coût d'acquisition d'un système de stockage à air comprimé peut sembler élevé au départ mais celui-ci est compensé par le nombre de cycle quasi illimité de compression/expansion. Ce qui affecte le plus l'efficacité du stockage par air comprimé, ce sont les pertes d'énergies sous forme de chaleur lors du cycle de compression et de détente de l'air. Lors du cycle de compression de l'air, une partie de l'énergie emmagasinée est perdue sous forme de chaleur tandis que lors de la détente, on se retrouve avec un air très froid dont le risque de gel des tubulures est très grand.

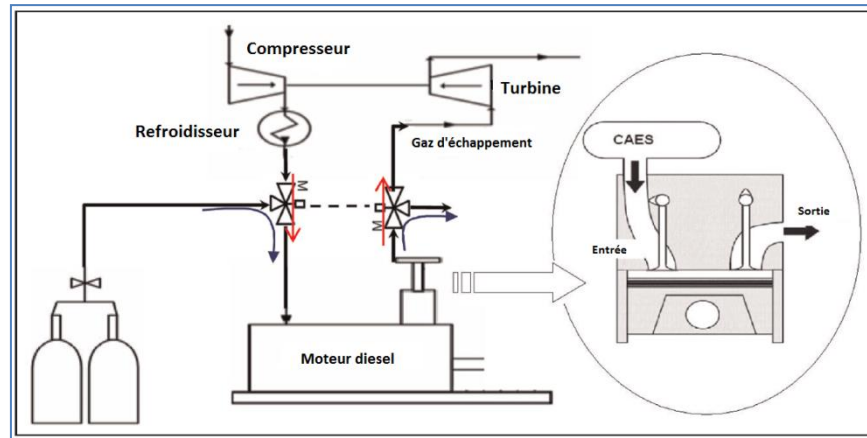


Figure 2-8 – Concept pneumatique du moteur Diesel. [37]

On peut augmenter l'efficacité du stockage par air comprimé en utilisant des échangeurs de chaleur et un accumulateur de chaleur tel que des sels fondus qui conservent la chaleur pour la restituer lors des périodes de détente de l'air comprimé. On obtient alors une efficacité s'approchant de celui du stockage par accumulateurs chimiques. Dans d'autres cas, on se sert de la chaleur produite à l'échappement du diesel pour réchauffer l'air comprimé lors de sa détente. Pour les réservoirs, la fabrication de ceux-ci repose sur des matériaux faiblement polluant. Le coût d'un réservoir supportant une pression de 300 bars devient abordable pour un système hybride de 25 à 50 kW. On retrouve néanmoins certains désavantages comme la densité d'énergie qui est plus faible comparativement aux batteries, nécessite un échangeur de chaleur pour augmenter l'efficacité du système, demande une maintenance locale au même titre que les batteries et le groupe électrogène et nécessite un espace d'entreposage plus volumineux que les batteries. Une autre étude [39] utilise aussi l'air comprimé associé à l'hydraulique

dans les parcs éoliens « offshore » pour maintenir une pression constante durant toute l'opération de restitution de l'air comprimé. Cela permet de faire tourner des génératrices afin de pallier le manque de production lorsque les éoliennes « offshore » sont aux repos.

En se servant de la technologie adiabatique (sels fondus) on peut obtenir un taux d'efficacité de 85% tandis que pour la technologie isotherme, on atteindrait un taux d'efficacité de 95%. Dans la littérature, on retrouve différentes configurations liées au CAES. Par exemple, des chercheurs [40] [41] ont développé une méthodologie permettant de stocker de l'air comprimé d'une manière isentropique dans des réservoirs de 7 litres à une pression de 5 bars permettant une utilisation jusqu'à 100 s par réservoir pour suralimenter le GED. Le principal désavantage est le volume nécessaire pour conserver une grande quantité de réservoirs permettant une opération à plus long terme. Dans [42] on préconise l'utilisation de processus isotherme comme une voie de recherche ouverte pour le CAES afin d'obtenir une efficacité maximale atteignant près de 95%. La Figure 2-8 présente un concept lié à l'utilisation du moteur diesel en tant que moteur à air comprimé [37]. Nous apercevons à la Figure 2-9 les cycles où l'air comprimé est injecté dans les pistons pour transformer le moteur diesel en moteur à air comprimé.

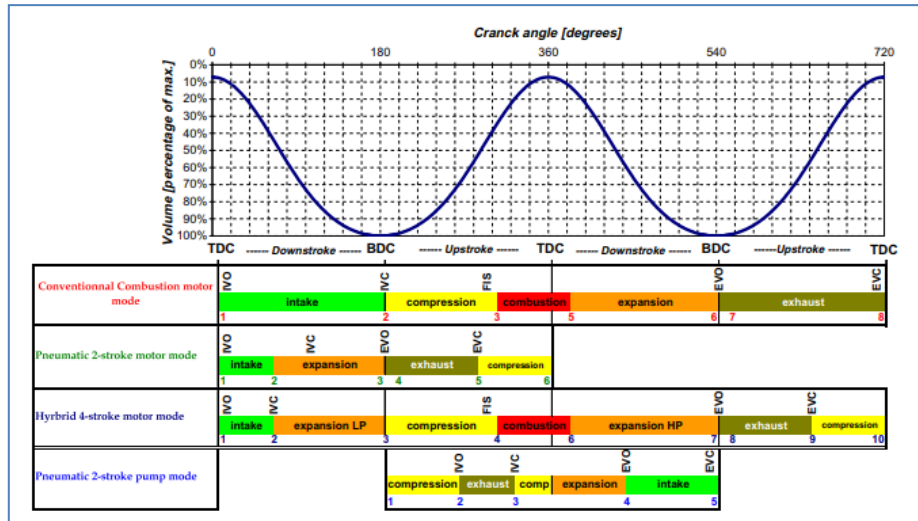


Figure 2-9 - Principe d'opération d'un concept HPCE. [37]

Cette conception repose sur la modification d'un moteur diesel ce qui entraine un certain coût non négligeable étant donné le fait que la pression qui se retrouve dans le cylindre dépasse le seuil recommandé du constructeur. C'est un concept intéressant mais perd en efficacité car le moteur à air comprimé engrange une perte assez élevée mais tout de même utilisable pour actionner un alternateur synchrone pendant un certain temps jusqu'à ce que le GED soit opérationnel. La Figure 2-10 présente une vue schématique d'un système permettant d'utiliser l'air comprimé afin d'alimenter un moteur à air comprimé (MAC). Ce moteur sera, par la suite, relié à un alternateur qui alimentera la charge appliquée au réseau.

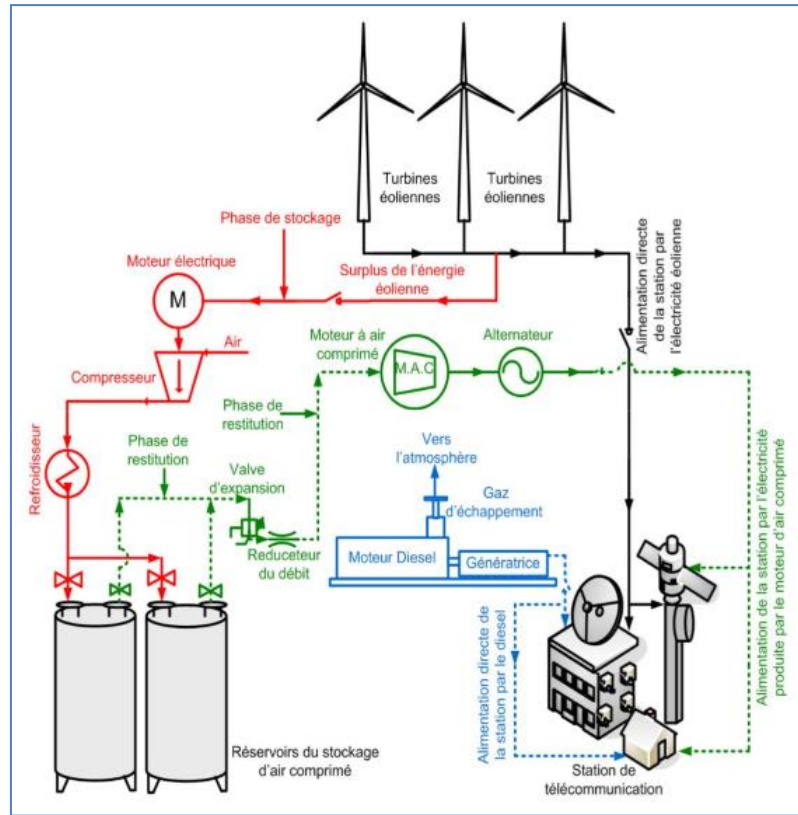


Figure 2-10 - Moteur à air comprimé jumelé à un alternateur. [20]

La Figure 2-11 présente le concept de suralimentation d'un moteur diesel à l'aide de l'air comprimé. La chaleur contenue dans les gaz d'échappement réchauffe l'air comprimé au moyen d'un échangeur de chaleur afin de maintenir une température élevée de l'air comprimé s'échappant des réservoirs, l'expansion de l'air étant plus efficace pour un plus petit volume. Lors d'une étude sur la compression étagée [8, 20, 21, 37], il a été démontré que la compression de l'air était plus efficace avec 5 chambres de compression qu'avec 2 chambres de compression pour des valeurs de pression allant jusqu'à 300 bars.

À la Figure 2-12, on montre que la courbe d'efficacité du rapport air/carburant atteint un sommet d'efficacité de 55% pour un rapport air/carburant d'environ 53.

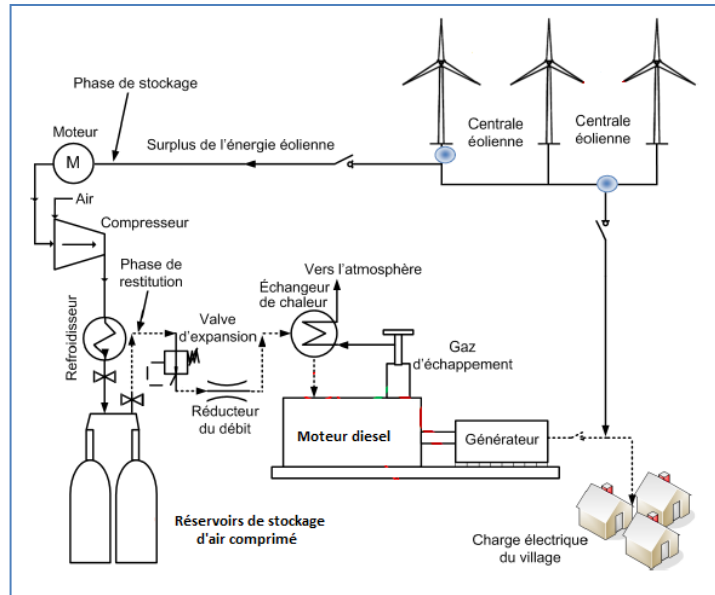


Figure 2-11 - Suralimentation du moteur diesel avec l'air comprimé. [20]

Malheureusement, la courbe n'indique pas si le rapport air/carburant demeure le même s'il y a variation de la charge du moteur. Lors de la conception de la commande qui permet l'envoi d'air comprimé dans les cylindres, ce paramètre devra être pris en compte de manière à toujours envoyer le bon rapport air/carburant de manière à maintenir la même efficacité indépendamment de la charge. Nous verrons que ce rapport sera fixe pour un niveau de compression optimal se situant entre 2 et 3 bars.

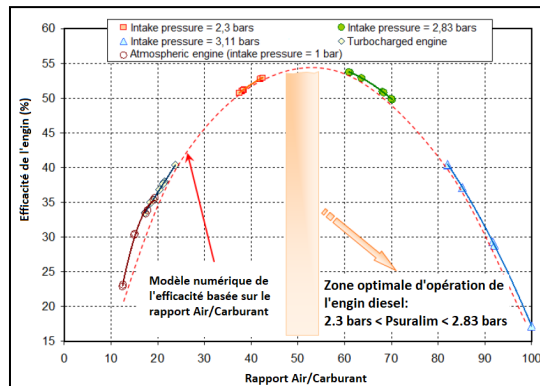


Figure 2-12 - Rapport indice d'efficacité vs air/carburant. Co-auteur [3]

Du même auteur [8], on retrouve à la Figure 2-13 la stratégie de contrôle de la gestion de puissance du système présenté à la Figure 2-11.

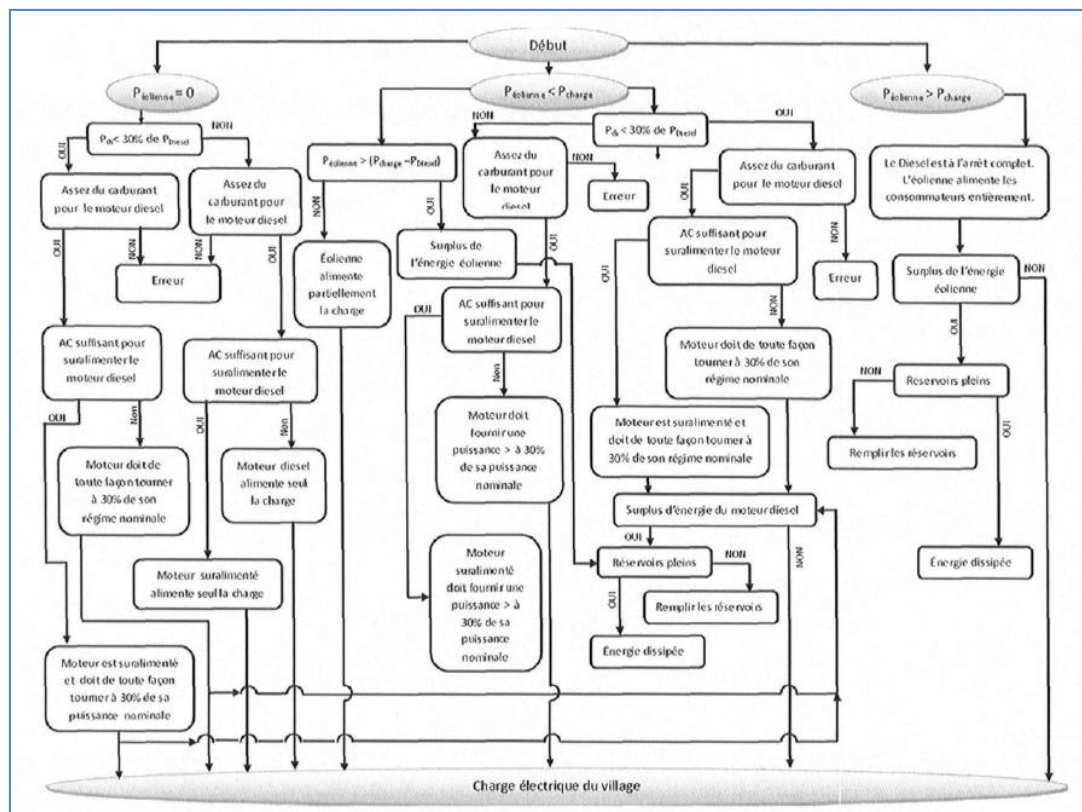


Figure 2-13 – Stratégie de contrôle d'un système SHEDACME. [8]

On remarquera la centralisation de la stratégie de contrôle. Si nous ajoutons une nouvelle source, il faudra modifier cet ordinogramme et par le fait même le programme entier du microcontrôleur. Si la puissance éolienne est nulle et que la charge est faible, on doit faire fonctionner le GED à plus de 30% de sa puissance nominale pour éviter une usure prématurée du GED. Cette stratégie de contrôle n'a pas été vérifiée par simulation mais donne un aperçu de la complexité de la tâche pour concevoir un véritable contrôle de la gestion de puissance du système. Seul le contrôle du GED participe à la gestion de puissance car la suralimentation n'est disponible que si le réservoir d'air comprimé est rempli à plus de 50% de sa capacité.

La Figure 2-14 présente un autre concept de moteur modifié nommé MHPD présentant une turbine alimentée par l'air chaud provenant des gaz de sortie du moteur diesel. La turbine active un compresseur qui alimente le réservoir en air comprimé. Cet air servira ensuite à alimenter les pistons de moteur diesel pouvant le faire fonctionner comme un moteur pneumatique.

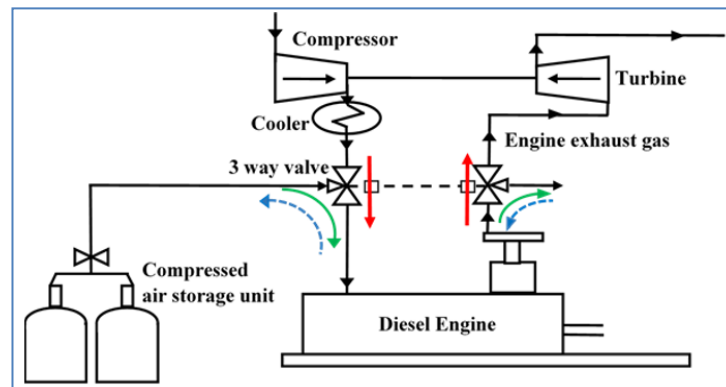


Figure 2-14 - Moteur MHPD. [8]

Un autre concept intéressant est l'utilisation de l'hydraulique combiné avec le pneumatique [43] [15]. La pompe/turbine permet l'activation d'une génératrice dans le mode turbine (voir Figure 2-15). Le réservoir liquide est pompé vers le réservoir d'air pour produire une détente à pression constante. Lorsque le réservoir d'air est vide, le remplissage de celui-ci force le liquide à remplir le réservoir de liquide tout en faisant tourner le moteur agissant comme une turbine alimentant le réseau en électricité. Là encore, nous avons un début de stratégie de commande mais aucune simulation proprement dite de la commande du système.

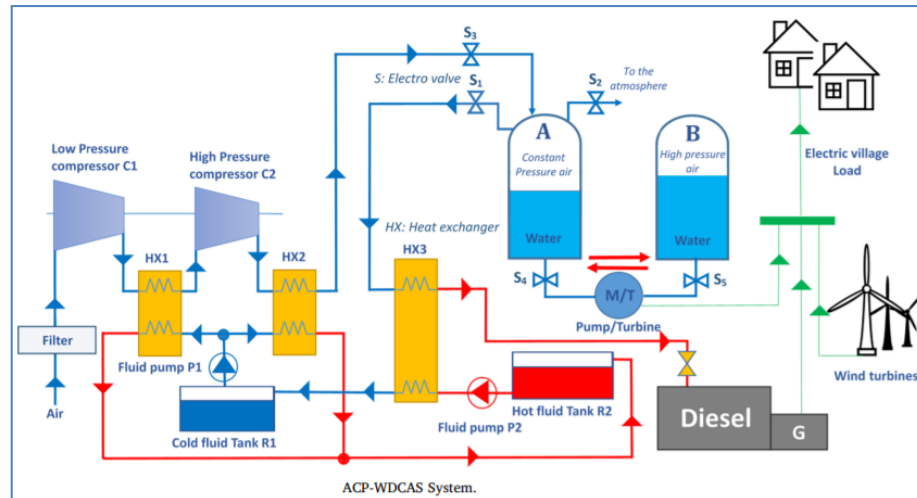


Figure 2-15 - Stockage hydropneumatique pour génération d'électricité dans les sites isolés. [15]

Après un survol des systèmes SHEDAC, les stratégies de commande déployées pour ces systèmes ne permettent pas de se départir du GED ou encore de diminuer adéquatement le nombre de cycle arrêt-marche du GED lorsqu'il est inclus dans le système hybride comme source primaire. La grande majorité des commandes qui ont été abordés sont centralisées, de nature électromécanique,

agissant soit sur l'éolienne ou le GED et difficile à mettre en pratique au niveau de la dynamique globale du système. Nous sommes à l'ère des changements de paradigmes en ce qui concerne les infrastructures générant de l'électricité et le paradigme micro-réseau en fait partie. Dans un avenir approché, les micro-réseaux vont représenter la norme et l'arrivée des énergies renouvelables représente un défi énorme en ce qui a trait au contrôle d'un micro-réseau relié ou non à un réseau de distribution provincial ou national.

Avec l'évolution des technologies en électronique de puissance et des sources distribuées à énergies renouvelables, on a vu naître de nombreux systèmes de production d'énergies distribués à base de bus CC, de bus CA ou à bus hybride CA/CC [44]. Contrairement au bus CA, le bus CC est beaucoup plus adéquat pour l'intégration des énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, les panneaux solaires, les piles à combustible, les piles électrochimiques, les bancs de supercondensateurs pour ne nommer que ceux-ci. De plus, le contrôle d'un bus CC est plus simple à réaliser pour le contrôle de la puissance qu'un bus CA car les convertisseurs participent à la gestion d'énergies du micro-réseau, de même que les charges qui peuvent également être distribués et contrôlés.

En regard de la qualité de l'énergie d'un micro-réseau CC, trois (3) problèmes sont régulièrement rencontrés: régulation de tension du réseau CC, distribution de la puissance et gestion du stockage de l'énergie [45, 46]. Dans les sites isolés, ces problèmes vont complexifier la gestion de l'énergie pour cause les incertitudes liées à l'inadéquation des énergies renouvelables (éolien et solaire)

avec la demande en énergie côté consommateur. Cette complexité nous mène droit vers un processus d'optimisation des sources additionné d'un contrôle intelligent.

Plusieurs recherches ont été publiées sur la gestion d'énergies et le contrôle des micro-réseaux isolés. Par exemple, en [47, 48], un micro-réseau CC isolé qui consiste en une turbine éolienne, une source photovoltaïque et une pile électrochimique est modélisé mathématiquement par une forme hybride algébro-différentielle de type Filippov de manière à développer un contrôle à base de modèle prédictif multi-variables non linéaire (NMPC) pour le suivi de la charge et la régulation de la tension du bus CC. Dans [49], les auteurs proposent une stratégie de gestion multi-variables et coordonnées. Dans cette stratégie, le stockage d'énergie au niveau de la pile est effectué à courant constant et tension constante augmentant la durée de vie de la pile électrochimique qui dépend du nombre de cycle de charge-décharge souvent limité entre 1000 et 1500. De plus, les sources du micro-réseau peuvent partager avec précision la demande de charge variable et maintenir le bus CC dans une échelle de valeur prescrite. Un seul hic, l'étude fait référence uniquement au cas où la puissance générée est supérieure à la charge demandée.

On retrouve d'autres articles [50] [51] où le GED est mis en valeur comme source primaire. Celui-ci est sollicité lorsque les énergies renouvelables ne rencontrent pas la puissance demandée à la charge. Le GED représente un très bon choix comme source primaire mais est difficile à contrôler étant donné sa

dynamique lente pour atteindre une puissance de sortie stable. Une solution envisagée est l'utilisation d'un banc de supercondensateurs qui assisterait le bus CC le temps que le GED se remet en opération pour atteindre une puissance nominale stable. On retrouve quelques articles où des applications de gestion d'énergies utilisent la technologie des supercondensateurs [52, 53], le contrôle étant effectué soit par machine à états finis [54, 55], soit par contrôle distribué par SMA (Système Multi-Agents) [56-58] ou par contrôle utilisant la logique floue [59, 60]. Dans les deux cas, une expérimentation a permis de valider les résultats de la simulation, les deux utilisant le logiciel MATLAB/Simulink. La Figure 2-16 et la Figure 2-17 présente les organigrammes de gestion d'énergies d'un système hybride [57] doté d'un banc de supercondensateurs qui aide à soutenir le bus CC, le temps que le GED puisse atteindre la stabilité de puissance. Le principal défaut de ce système de gestion d'énergie se retrouve dans la centralisation des procédés du système. Si une partie devient défectueuse, c'est tout le système qui en souffre. Il n'y a pas possibilité d'ajouter une nouvelle source d'énergie sans la réécriture du programme. Si une des sources devient défectueuse, c'est tout le système qui s'écroule à moins d'ajouter un activateur pour chacune des sources externe à la source principale, ce qui permettrait à la source principale de maintenir l'ensemble du réseau sans perturber celui-ci.

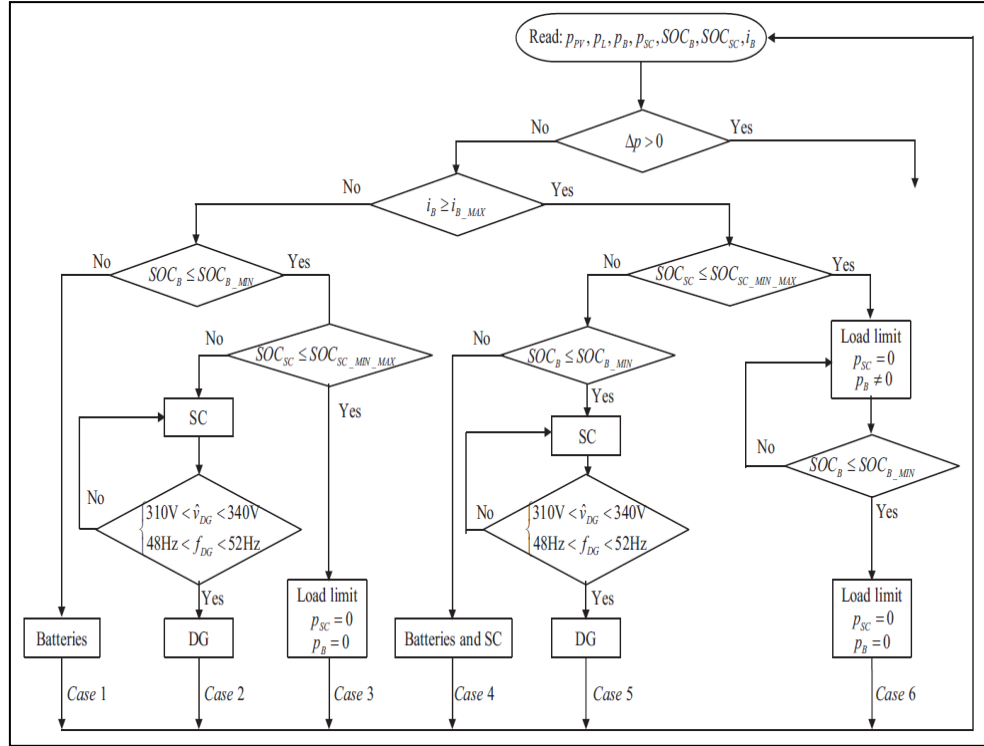


Figure 2-16 -Partie de l'organigramme de gestion de puissance pour $\Delta p < 0$. [57]

Des recherches incluant un banc de supercondensateurs dans les systèmes de gestion d'énergies [61] ont données des résultats surprenant afin de palier la dynamique lente du GED et les fluctuations rapides de l'éolienne [62]; les coûts d'un banc de supercondensateurs diminuant considérablement aux points de devenir commun dans les systèmes d'énergies, ils assistent maintenant les batteries lithium-ion en adjoignant la puissance manquante pour un court intervalle de temps. Dans cette stratégie, on retrouve douze (12) cas qui sont gérés de manière à soutenir, en tout temps, la demande en puissance du bus CC. Des données sont néanmoins manquantes pour que la simulation soit implémentée dans un système embarqué en temps réel.

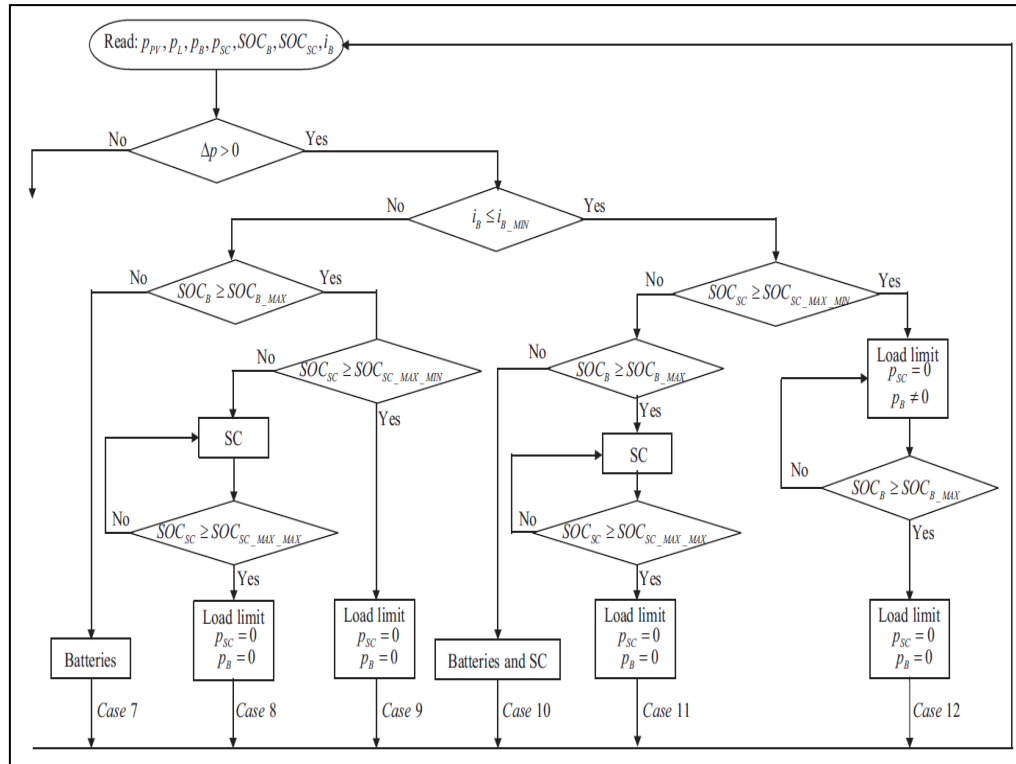


Figure 2-17 - Partie de l'organigramme de gestion de puissance pour $\Delta p > 0$. [57]

Dans cette thèse, nous avons porté un intérêt sur cet organigramme uniquement sur la manière de coordonner l'ensemble des sources par comparaison à un modèle utilisant le SMA qui doit rencontrer les objectifs de stabilité, de rapidité dans la stabilisation du bus CC et dans la minimisation de l'utilisation du GED. On ne rencontre pas de fonction de contrainte dans cette stratégie. Dans un contrôle par SMA, le contrôle des convertisseurs CC-CC sera assujetti selon certaines contraintes pour que les objectifs de la thèse soient atteints.

Des recherches récentes s'appuient également sur la réalisation des contrôles SMA en utilisant les concepts sur les machines à états finis [55, 63, 64].

Un flux d'état est une représentation d'une machine à états finis. C'est une représentation d'un système régi par des événements [65, 66] qui donnent lieu à des changements d'états. Dans un système événementiel, le système effectue une transition d'un état (mode) à un autre si la condition définissant le changement est vraie (true). Aussi, le flux d'états (StateFlow) est basé sur le concept de machines à états finis développé par Moore et Mealy afin de rendre compte du fonctionnement d'un système opérant par des événements discrets; dans ces systèmes, le passage d'un état à un autre est régi par des événements discrets (action, inaction ou On/Off). Le logiciel Matlab contient dans l'environnement Simulink un outil nommé "Stateflow" qui est une machine à états finis permettant la programmation par événements [66]. L'avantage d'utilisation du flux d'états est la facilité de programmation sur des systèmes embarqués car les états sont conditionnés par des suites de IF THEN ELSE et quoi de plus simple que de programmer cette suite de conditions dans un système embarqué, peut nous importe le langage de programmation utilisé pour la conception d'un contrôle. De plus, la machine à états finis permet l'exécution en parallèle de plusieurs processus, comme le sera l'envoi des messages dans un système réel où les agents auront à communiquer des informations entre agents pour la prise de contrôle de la gestion d'énergie. La lecture d'informations sur le tableau noir permet de connaître le numéro des agents qui sont dans le système. Si une nouvelle source est ajoutée au système, un numéro d'agent différent de ceux qui existent dans le système lui est associé et indiqué sur le tableau noir, les autres agents étant informés de sa présence dans la

liste des agents en attente de communication. On trouvera différentes stratégies dans les techniques utilisées dans les SMA [67, 68].

2.3 CONCLUSION

Une revue de littérature a été produite sur le sujet de la gestion de puissance sur les systèmes hybrides sans stockage et avec stockage incluant ou non le GED comme source primaire. Il s'en est suivi une tendance vers les micro-réseaux contrôlables par une machine à états finis ou par l'utilisation de la logique floue [60] [59, 69, 70]. La solution qui rencontre les objectifs de cette thèse penche fortement pour un système multi-agents ou SMA.

Une recherche bibliographique approfondie sur les systèmes de gestion de puissance a démontré que peu de travaux ont été réalisés portant sur la conception d'un gestionnaire d'énergie par SMA pour le SHEDAC mais il a été possible de trouver des articles de qualité et en quantité parlant de cette nouvelle technologie de contrôle pour des systèmes hybrides autre que le SHEDAC. Nous avons alors effectué une recherche plus exhaustive portant sur l'implémentation de cette méthode de contrôle en utilisant des microcontrôleurs programmés en langage python ou autre pour le contrôle des agents qui seront associé à chacune de leur source. Dans le chapitre 3, nous verrons que les logiciels pouvant être implémentés dans un microcontrôleur sont assez nombreux et des recherches

sont actuellement en cours sur les agents systèmes pour améliorer leur intelligence et leurs réactivités face aux autres agents [71]. Le logiciel SPADE en particulier est très prometteur car facilement modifiable, libre d'accès et facile à implémenter sur système embarqué (carte de microcontrôleur à processeur ARM 32 bits ou 64 bits) [72]. Des recherches plus élaborées amènent également la possibilité d'utiliser le langage Forth pour l'implémentation d'agent sur des cartes Arduino UNO que l'on retrouve facilement sur le marché à des couts très abordable. On retrouve également des exemples de programmes en C et en C++ sur une machine à états finis que l'on pourra programmer sur une carte Arduino 32 bits fonctionnant à 48 MHz.

3. La technologie des agents logiciels

3.1 Introduction

Depuis l'avènement des énergies renouvelables par l'utilisation des énergies éoliennes et photovoltaïques, les distributeurs d'énergies font maintenant face à une augmentation croissante de petits fournisseurs en énergie demandant à s'intégrer dans le réseau de distribution national, amenant une décentralisation soulevant par le fait même un nombre important de défis à relever. Cette hybridation de systèmes hétérogènes amène à développer des solutions robustes et adaptatives afin de maintenir une stabilité de l'ensemble du réseau. On retrouve la même problématique pour les réseaux isolés qui ne sont pas branchés à un réseau de distribution électrique. Pour résoudre cette problématique, on propose comme nouveau paradigme de conception le système multi-agents (SMA). Ce chapitre tentera d'expliquer dans les grandes lignes la conception et l'utilisation des agents logiciels qui serviront à concevoir un système distribué de gestion de puissance pour le SHEDAC. On utilisera également la méthode "ascendante" lors de la conception du contrôle par SMA. Cette méthode sera également expliquée dans ce chapitre.

3.2 Le paradigme des systèmes multi-agents (SMA)

On retrouve une première description des systèmes multi-agents dans la décennie des années 90 par un article de J. Ferber [73]. Ferber définit un agent comme une entité informatique implémentée dans un système informatique ouvert comprenant un ensemble d'applications, de réseaux et de systèmes hétérogènes, qui évolue dans un environnement avec la capacité de le percevoir et d'agir sur celui-ci, qui peut communiquer avec d'autres agents, qui exhibe un comportement autonome, lequel peut être vu comme la conséquence de ses interactions avec d'autres agents et des buts qu'il poursuit, possède des ressources propres, ne dispose que d'une représentation partielle des autres agents, possède des services qu'il peut offrir aux autres agents, et a un comportement tendant à satisfaire ses objectifs. Le SMA est très adapté pour modéliser des phénomènes pour lesquels les interactions entre diverses entités sont assez complexes pour être appréhendées par les outils de modélisation classiques. Ils permettent de représenter des entités autonomes, dotées de comportements, pouvant coopérer, négocier et communiquer avec les autres. Une autre définition également admise est la suivante :

« Un agent est une entité autonome, réelle ou abstraite, qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents, et dont le comportement est la

conséquence de ses observations, de ses connaissances et des interactions avec d'autres agents. »

Le SMA est, le plus souvent, utilisé en informatique distribuée, en communication, en ingénierie dans le contrôle des systèmes distribués, en économie et en environnement pour ne nommer que quelques exemples les plus courants.

Dans un environnement SMA, les canaux de communications sont ouverts en permanence car le SMA est constitué d'agents logiciels autonomes communiquant entre eux en temps réel pour rencontrer un objectif commun. En plus de cet objectif commun, chaque agent doit rencontrer un objectif local qui sera de s'occuper de son propre environnement de manière à fournir un fonctionnement optimal. Contrairement aux systèmes d'IA, qui simulent dans une certaine mesure les capacités du raisonnement humain, le SMA est conçu et implémenté idéalement comme un ensemble d'agents interagissants, le plus souvent, selon des modes de *coopération*, de *concurrence* ou de *coexistence*.

Selon Wooldridge [74], un agent est une entité qui doit avoir quatre (4) importantes propriétés, soit : la capacité d'être autonome, celui d'être proactif, celui d'être réactif et enfin disposer de la capacité de socialisation. Un agent a besoin de capteurs pour mesurer son environnement et d'actuateur pour agir sur cet environnement. Toujours selon Wooldridge, un agent est un système ordonné se trouvant dans un environnement quelconque et est doté d'une autonomie de

manière à rencontrer un objectif de conception. Lorsqu'on parle d'environnement, c'est tout ce qui est externe à l'agent. Cela signifie que l'agent doit prendre en compte l'information ou non des autres agents de son environnement.

Pour un SMA, [75] regroupait les agents en cinq (5) classes selon leur capacités et l'intelligence perçue. La première classe se nomme "Agent à réflexe simple". La Figure 3-1 montre le diagramme d'action de cet agent.

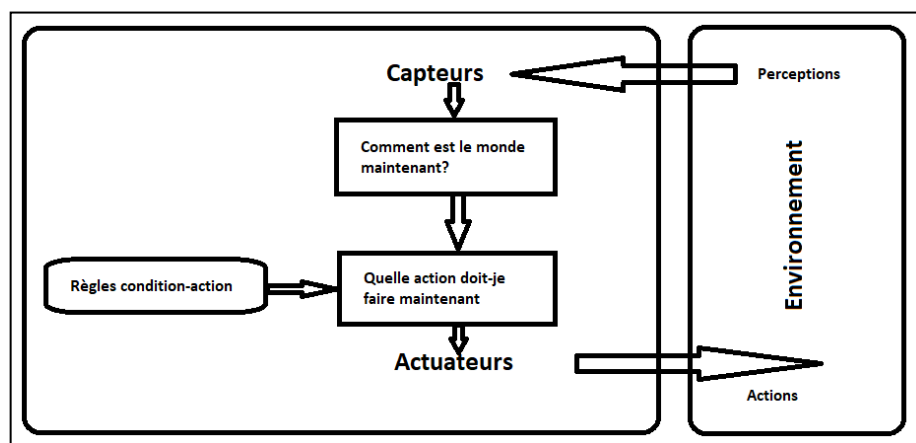


Figure 3-1 - La classe Agents à Réflexe simple. [75]

Cette classe d'agent agira uniquement sur le moment sans faire référence à l'historique des événements ayant eu lieu. La fonction de l'agent se base sur la règle de condition-action ; Si condition, alors action. Cette classe est particulièrement utile lorsque l'environnement est pleinement observable. Certains agents réflexes peuvent également contenir des informations sur leur état actuel, ce qui leur permet de ne pas tenir compte des conditions qui ont été modifiées par les actionneurs. Les boucles infinies sont souvent inévitables pour les agents de cette classe opérant dans des environnements partiellement observables. Pour

échapper à cette boucle infinie, l'agent pourra choisir de manière aléatoire ses actions qui seront appliquées à l'environnement.

La seconde classe d'agent se nomme "Agent basé sur un modèle". La Figure 3-2 présente le diagramme de cette classe d'agent.

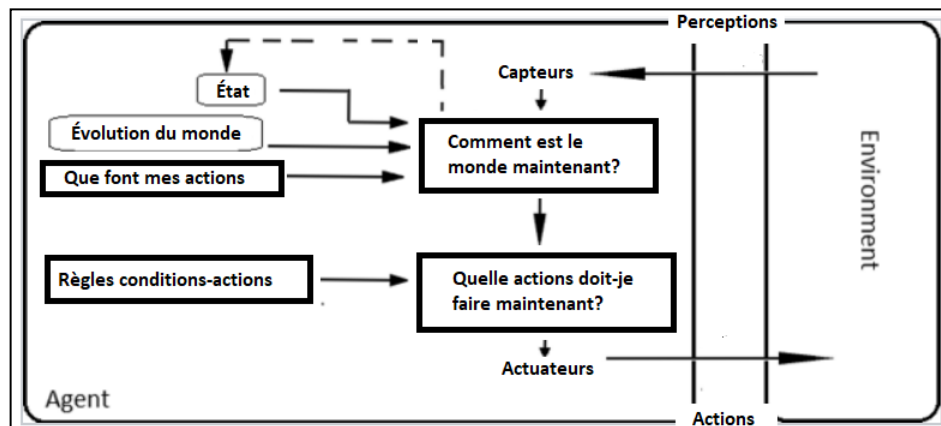


Figure 3-2 - Agent réflexe à base de modèle. [75]

Un agent réflexe basé sur un modèle peut gérer des environnements partiellement observables. Son état actuel est stocké dans l'agent en conservant une sorte de structure qui décrit la partie du monde qui ne peut pas être vue. Cette connaissance sur "comment le monde fonctionne" s'appelle un modèle du monde, d'où le nom "agent basé sur un modèle". Un agent réflexe basé sur un modèle doit conserver une sorte de modèle interne qui dépend de l'historique des perceptions et reflète ainsi au moins certains des aspects non observés de l'état actuel. L'historique des perceptions et l'impact des actions sur l'environnement peuvent être déterminés à l'aide d'un modèle interne. Il choisit ensuite une action de la même manière que l'agent réflexe simple. Un agent peut également utiliser des

modèles pour décrire et prédire le comportement d'autres agents dans l'environnement.

La troisième classe d'agent est celui que l'on nomme "Agent basé objectif à base de modèle". Cette configuration apparaît à la Figure 3-3.

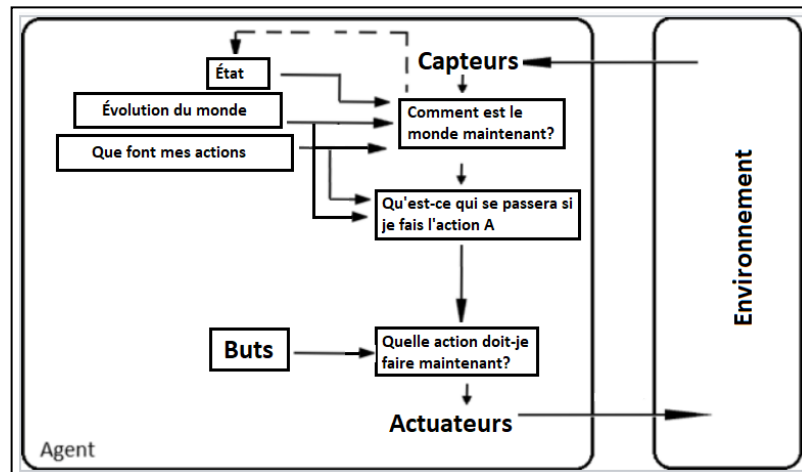


Figure 3-3 - Classe d'agent basé objectif à base de modèle. [75]

Les agents basés sur un ou des objectifs développent davantage les capacités des agents basés sur un modèle, en utilisant des informations sur le ou les "objectifs" à atteindre. Les informations sur les objectifs décrivent les situations souhaitables. Cela permet à l'agent de choisir parmi plusieurs possibilités, en sélectionnant celle qui atteint un objectif. La recherche et la planification sont les sous-domaines de l'intelligence artificielle consacrés à la recherche de séquences d'action permettant d'atteindre les objectifs de l'agent.

La quatrième classe d'agent porte le nom de "Agent basé utilisation ". La configuration de cet agent apparaît à la Figure 3-4.

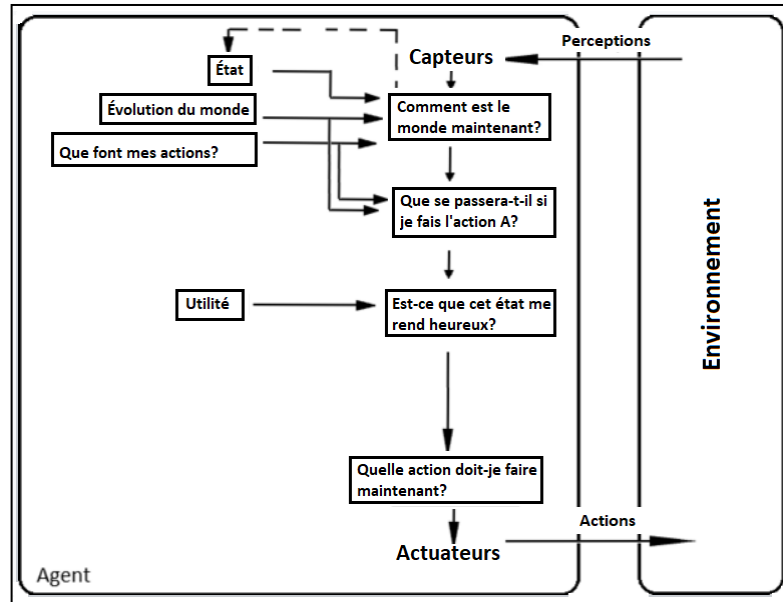


Figure 3-4 - Classe d'agent basé utilisation, à base de modèle. [75]

Les agents basés sur les objectifs ne font la distinction qu'entre les états d'objectif et les états sans objectif. Il est possible de définir dans quelle mesure un état particulier est souhaitable. Cette mesure peut être obtenue par l'utilisation d'une fonction d'utilité qui associe un état à une mesure de l'utilité de l'état. Une mesure de performance plus générale devrait permettre de comparer différents états du monde en fonction du degré de satisfaction de l'agent. Le terme utilitaire peut être utilisé pour décrire le degré de "satisfaction" de l'agent. Un agent rationnel basé sur l'utilité choisit l'action qui maximise l'utilité attendue des résultats de l'action, c'est-à-dire ce qu'il s'attend à obtenir en moyenne, compte tenu des probabilités et des utilités de chaque résultat. Un agent d'utilité publique doit modéliser et suivre son environnement, tâches qui ont nécessité de nombreuses recherches sur la perception, la représentation, le raisonnement et l'apprentissage.

Cela signifie également que l'agent utilité peut ne pas répondre à la demande d'un autre agent.

La cinquième et dernière classe d'agent est la classe "Agent d'apprentissage". Le diagramme de cette classe apparaît à la Figure 3-5. Cet agent est particulièrement complexe et s'intègre dans des environnements qui ont très peu d'observables. Cette classe d'agents utilisera les réseaux de neurones artificiels pour le classement d'informations par nuages et catégorisera par lui-même ses propres nuages.

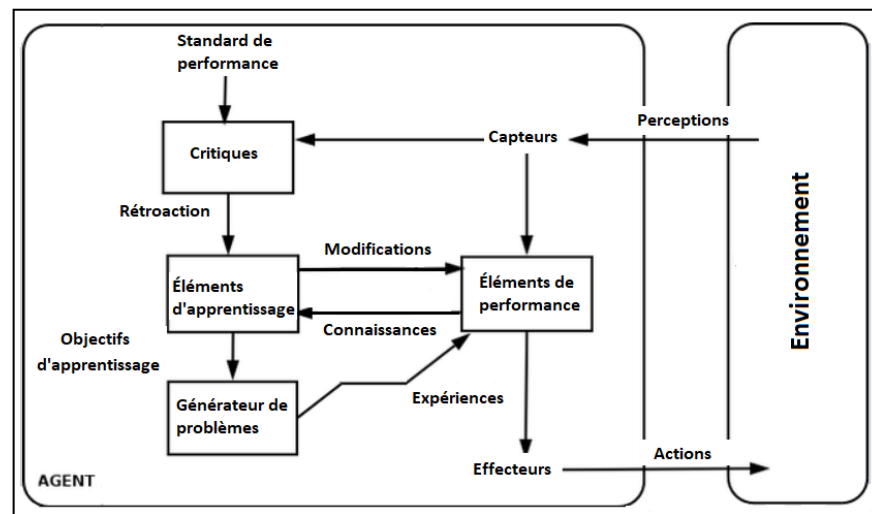


Figure 3-5 - Classe d'agent d'apprentissage. [75]

L'apprentissage présente l'avantage de permettre aux agents de fonctionner initialement dans des environnements inconnus et de devenir plus compétents que ne le permettraient ses connaissances initiales. La distinction la plus importante est entre "l'élément d'apprentissage", qui est chargé d'apporter des améliorations, et "l'élément de performance", qui est responsable de la sélection des actions

extérieures. L'élément d'apprentissage utilise les commentaires du "critique" sur la manière dont l'agent se comporte et détermine la manière dont l'élément de performance doit être modifié pour obtenir de meilleurs résultats à l'avenir. L'élément de performance est ce que nous avons précédemment considéré comme l'agent complet ; il prend en compte et décide des actions. Le dernier composant de l'agent d'apprentissage est le "générateur de problèmes". Il est chargé de suggérer des actions qui mèneront à des expériences nouvelles et informatives.

Le modèle d'agent qui sera utilisé dans cette thèse est un agent de la classe objectif à base de modèle, soit celui de la Figure 3-3. Ce modèle d'agent est composé à la base d'un mécanisme de branchement à une plate-forme de communication, d'un répartiteur de messages et d'un ensemble de comportements envoyés par le répartiteur. Physiquement, chaque agent est identifié par un numéro d'agent ou un nom d'agent (ex : agentdiesel@fournisseur.com) et un mot de passe pour établir le branchement au serveur WI-FI; Le mot de passe est nécessaire pour éviter des perturbations provenant de l'extérieur du système (piratage, prise en charge du contrôle par des entités terroristes...). De plus, le SMA doit être ouvert et être en mesure de prendre en charge de nouveaux agents ou de mettre à jour sa base de relation si un ou plusieurs agents venaient à disparaître du système [76].

Pour une programmation adéquate des agents logiciels, il est recommandé d'utiliser le paradigme de la programmation concurrente [77, 78]. Ce paradigme est

représenté par plusieurs piles sémantiques que nous appellerons threads, processus ou tâches. Elles sont matérialisées en machine par une pile d'exécution et un ensemble de données privées. En général, un thread peut être considéré comme une fonction qui est rattachée à des paramètres d'entrées (mesures prises par un ou plusieurs capteurs) dont le résultat produira des données en sortie qui agiront sur un ou plusieurs actuateurs. La concurrence devient une nécessité si l'on souhaite écrire des programmes qui interagissent avec le monde réel. C'est également le cas lorsqu'on retrouve de multiples unités centrales couplées, comme dans un système multiprocesseur ou distribuées, éventuellement en grille ou en grappe. On peut expliquer simplement ce qu'est la programmation concurrente par un exemple simple que l'on retrouve dans le document de J-P. Sansonnet.

On veut pouvoir contrôler la température d'un réfrigérateur par l'action d'un compresseur, par la surveillance de la température et par la réaction à l'ouverture et la fermeture de la porte. Cet exemple se compose de quatre processus ou tâches permettant de gérer le fonctionnement du réfrigérateur de manière à garder la température à près de 4°C, soit:

- L'environnement ENV qui augmente régulièrement la température T de 0.1°C par minute;
- Un capteur SENSOR qui détecte que la température T dépasse 6°C et lance alors le compresseur pour 10 cycles;

- Le compresseur qui diminue régulièrement la température de 0.3°C par minute lorsque celui-ci est en fonction (CPT décompte son temps de fonctionnement);

- L'humain HUMAN qui ouvre et ferme la porte provoquant à chaque fois une augmentation moyenne de température de 0.6°C. L'humain est simulé par un processus aléatoire (l'ouverture de la porte se fait en moyenne une fois sur 10). Le programme concurrent pourrait se présenter comme suit (Figure 3-6):

```
Par[
  ENV[T=T+0.1],
  SENSOR[If[T>=6 ^ CPT==0, CPT=10]],
  COMPR[If[CPT>0], CPT-; T=T-0.3]],
  HUMAN[Random[10]==1, T=T+0.6]
]
```

Figure 3-6 - Exemple de programme concurrent. [77]

Le résultat suivant (Figure 3-7) présente le comportement des tâches pour le contrôle du réfrigérateur selon les ouvertures de porte effectuées durant un temps T géré par le programme concurrent. Dans le style de la programmation concurrente, on définit des agents comme des processus ou des tâches qui s'exécutent en parallèle sur un seul processeur matériel (mode entrelacé multi-tâches) ou bien autant de processeurs matériels que de processus. Dans tous les cas, les actions sont physiquement entrelacées et asynchrones les unes par rapport aux autres. La limite du nombre de tâches exécutées par un processeur va dépendre de la vitesse de celui-ci.

Temps (minutes)	T °c	CPT	ENV	SENSOR	COMPR	RAND	HUMAN
1	5	0	+	-	-	2	-
2	5.1	0	+	-	-	9	-
3	5.2	0	+	-	-	0	-
4	5.9	0	+	-	-	1	OPEN
5	6	0	+	HIT	-	3	-
6	5.8	10	+	-	-0.3	6	-
7	5.6	9	+	-	-0.3	3	-
8	5.4	8	+	-	-0.3	0	-
9	5.2	7	+	-	-0.3	9	-
10	5	6	+	-	-0.3	0	-
11	4.8	5	+	-	-0.3	3	-
12	4.6	4	+	-	-0.3	2	-
13	4.4	3	+	-	-0.3	8	-
14	4.2	2	+	-	-0.3	6	-
15	4	1	+	-	-0.3	4	-
16	4.1	0	+	-	-	7	-
17	4.2	0	+	-	-	0	-
18	4.3	0	+	-	-	1	OPEN
19	5	0	+	-	-	7	-
20	5.1	0	+	-	-	3	-
21	5.2	0	+	-	-	7	-
22	5.3	0	+	-	-	1	OPEN
23	5.9	0	+	-	-	2	-
24	6	0	+	HIT	-	4	-
25	5.8	10	+	-	-0.3	8	-
26	5.6	9	+	-	-0.3	0	-
27	5.4	8	+	-	-0.3	3	-
28	5.2	7	+	-	-0.3	5	-
29	5	6	+	-	-0.3	6	-
30	4.8	5	+	-	-0.3	0	-

Figure 3-7 - Résultats du programme concurrent pour le contrôle d'un réfrigérateur.

[77]

En raison de la fonction **Random** (qui simule très grossièrement le fait qu'on n'a pas accès à l'état mental de l'humain - on ne sait pas quand l'humain va ouvrir la porte), les exécutions successives de ce programme concurrent ne sont pas déterministes. De plus, dans le **Par**, l'ordre d'exécution des quatre processus introduit un facteur d'indéterminisme supplémentaire.

3.2.1 Modes de gestion de l'énergie par SMA

La Figure 3-8 présente les modes de gestion de l'énergie que l'on rencontre aujourd'hui pour un SMA. Le mode production et stockage apparaît très rarement dans la pratique et on retrouve très peu de documentation sur le sujet. Les modes de gestion distribution et consommation se présentent souvent dans les applications militaires et civiles respectivement. Seul le mode production et stockage sera utilisé dans cette recherche malgré le fait qu'il y ait peu de documentation.

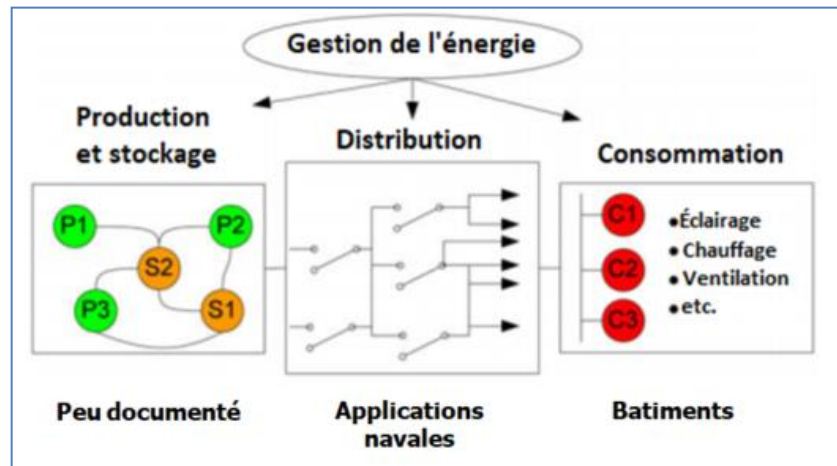


Figure 3-8 - Modes de gestion de puissance. [79]

On retrouve quelques exemples d'applications de systèmes hybrides dont la gestion d'énergie est simulée par un contrôle par SMA hybridé avec une logique floue [56]. On retrouve un autre exemple où les agents du SMA contrôlent leur propre source et agissent sur un convertisseur CC-CC de manière à distribuer de l'énergie à une charge primaire. On retrouve aussi quelques exemples de simulation qui utilisent une configuration axée sur Java tel que Jade [80, 81] tandis

qu'une autre application utilise un système embarqué avec programme agent monté en Simulink et compilé en langage C [82]. Dans d'autres simulations, le SMA est modélisé par une machine à états finis et par la suite, compilé en langage C pour être implémenté dans un système embarqué (microcontrôleur avec système de communication). Il n'est pas certain que la dynamique soit conservée car il est possible que la dynamique de la carte embarquée soit plus lente que pour la simulation ou à l'inverse, tout dépendant du système de communication mis en place.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons utilisé la même approche que dans [79] sauf que le système hybride sous étude comporte un stockage d'énergie par air comprimé et que nous effectuons la gestion de plusieurs sources non conventionnelles telle que l'utilisation d'un MAC-Gen et d'un banc de supercondensateurs. Pour le choix de la plateforme de développement sur systèmes embarqués, nous avons choisi la plateforme SPADE (Smart Python Agent Development Environment) [83, 84] car celle-ci est un logiciel libre avec code source sous licence MIT. Cette plateforme est programmée en langage Python (version 3.6) et comporte toutes les classes dont nous avons besoin pour la conception d'un SMA pour le contrôle du SHEDAC. Il est même possible de programmer l'agent comme une machine à états finis. Nous avons également la possibilité d'utiliser une autre plateforme que l'on nomme "MaDKit", qui est programmée en langage JAVA et qui s'adresse aussi à des systèmes embarqués [85, 86]. La raison pour laquelle nous utilisons le langage Python plutôt que JAVA

est beaucoup plus une question d'efficacité en termes de fiabilité et de rapidité dans la communication entre les agents. On retrouve une autre raison dans l'utilisation du langage Python, c'est sa popularité car on le retrouve de plus en plus dans le domaine scientifique et de l'ingénierie [87, 88]. Ce langage est facilement portable d'une machine à l'autre tout comme l'est le langage C/C++.

3.2.2 La plateforme SPADE

Le logiciel SPADE est une plateforme pour système multi-agents qui est écrite en langage Python. Python est un langage orienté objet, cela signifie qu'il peut créer des classes contenant des propriétés et des méthodes. Les méthodes s'apparentent à une action sur l'objet dont les propriétés caractérisent celui-ci. Lorsqu'un objet est créé lors du fonctionnement du programme, on parle alors d'instanciation, i.e. que l'on crée un objet en copiant la classe avec ses propriétés et ses méthodes dans une nouvelle variable du programme. On peut utiliser cet objet pour enregistrer des données, agir sur ses propriétés ou actionner des comportements qui pourraient interagir avec d'autres objets.

Lorsque nous lançons le programme Python, c'est un interpréteur de commande qui s'ouvre en invite pour recevoir le nom du programme Python. La fonction d'interpréteur permet de concevoir et tester rapidement un programme ou des fonctions. Lorsque le tout fonctionne adéquatement, la partie compilation entre en action permettant la création d'un exécutable en code natif.

La messagerie instantanée (XMPP) représente la base du système de communication entre agents. Le choix de la plateforme SPADE vient avant tout de l'efficacité du système de gestion de communication et dans la simplicité d'usage de la plateforme. La plateforme SPADE fonctionnera uniquement sur une version de Python plus grande ou égale à 3.6. Pour des systèmes embarqués, il est important que la carte de développement soit pourvue d'un système d'exploitation, comme Linux par exemple, afin d'installer une version fonctionnelle de Python pour la plateforme SPADE. Nous avons choisi Linux à cause de sa réactivité en temps réel et sa fiabilité en tant que système d'exploitation. On peut maintenant installer Linux sur une carte microSD qui prendra moins de 50 Mb en mémoire ram. On retrouve également des microcontrôleurs qui contiennent le langage Python intégré à même la mémoire flash, laissant libre une bonne partie du restant de la mémoire flash pour le programme applicatif.

3.2.3 Le répartiteur de messages

Le système de répartition des messages entre agents est à la base de tout SMA. SPADE utilise une classe qui se nomme "Template". À la Figure 3-9 est représentée une variable "template" qui devient un objet instancié de la classe "Template" (Il faut bien distinguer entre "template" et "Template" qui s'écrivent différemment). Le processus d'initialisation se fait via les propriétés de l'objet "template". La variable "message" contient les propriétés du message. Si le message est modifié, la commande "assert" vérifiera si le message a été modifié

ou non. La commande "assert" est l'équivalent de la commande "try... catch" du langage C. S'il y a une quelconque erreur, le programme s'arrête ou est dirigé vers une autre procédure ou fonction. SPADE est la plateforme utilisée lors de l'expérimentation pour implémenter les agents. Le programme de gestion d'énergie sera doté d'agents qui communiqueront entre eux pour réaliser un objectif global qui sera de maintenir constante la tension CC du réseau par injection de courant provenant de chacune des sources tout en minimisant l'utilisation du GED.

On doit remarquer selon la Figure 3-9 que le message envoyé vers un autre agent doit recevoir une réponse. Pour vérifier si le message a été modifié, celui-ci devra être comparé avec l'objet "template" qui est également une copie du message envoyé.

```
1  Gmessage=Template ()
2  Gmess.sender= "sender1@host"
3  Gmess.to="recv1@host"
4  Gmess.body="Agent_Diesel"
5  Gmess.thread="Thread_Diesel"
6  Gmess.metadata={"performative":"query"}
7
8  texto=Message ()
9  texto.sender="sender1@host"
10 texto.to="recv1@host"
11 texto.body="Agent_Diesel"
12 texto.thread="Thread_Diesel"
13 texto.set_metadata={"performative":"query"}
14
15 assert Gmess.match(texto)
```

Figure 3-9 Classe Message servant à la communication inter-agents. @Richard Lepage

Lors de la simulation, cette vérification est omise car la communication s'effectue par envoi et réception de code à des agents spécifiques.

3.2.4 L'envoi et la réception des messages

SPADE contient des classes permettant l'envoi et la réception de messages. On montre à la Figure 3-10 un exemple d'envoi et de réception d'un message.

```
import time
from spade.agent import Agent
from spade.behaviour import OneShotBehaviour
from spade.message import Message

class SenderAgent(Agent):
    class InformBehav(OneShotBehaviour):
        async def run(self):
            print("InformBehav running")
            msg = Message(to="receiver@your_xmpp_server") # Instantiate the message
            msg.set_metadata("performative", "inform") # Set the "inform" FIPA performative
            msg.set_metadata("ontology", "myOntology") # Set the ontology of the message content
            msg.set_metadata("language", "OWL-S") # Set the language of the message content
            msg.body = "Hello World" # Set the message content

            await self.send(msg)
            print("Message sent!")

            # set exit_code for the behaviour
            self.exit_code = "Job Finished!"

            # stop agent from behaviour
            await self.agent.stop()

    async def setup(self):
        print("SenderAgent started")
        self.b = self.InformBehav()
        self.add_behaviour(self.b)
```

Figure 3-10 Exemple de procédure d'envoi d'un message. @Richard Lepage

La Figure 3-11 présente la procédure permettant l'envoi d'un message vers un autre agent.

```

if __name__ == "__main__":
    agent = SenderAgent("sender@your_xmpp_server", "sender_password")
    agent.start()

    while agent.is_alive():
        try:
            time.sleep(1)
        except KeyboardInterrupt:
            agent.stop()
            break
    print("Agent finished with exit code: {}".format(agent.b.exit_code))

```

Figure 3-11 Procédure d'envoi de message par un agent. @Richard Lepage

La Figure 3-12 est le résultat de l'envoi du message par l'agent primaire. Cet exemple donne un aperçu de la manière dont il faut s'y prendre pour envoyer un message. Dans notre cas, ce message sera envoyé vers le tableau noir afin d'y être répondu par un autre agent.

```

1  $ python sender.py
2  SenderAgent started
3  InformBehav running
4  Message sent!
5  Agent finished with exit code: job Finished!

```

Figure 3-12 Résultat de l'envoi de message dans la fenêtre de sortie. @Richard Lepage

Nous avons vu comment le message est transmis. Nous allons maintenant apprendre comment le message est reçu en provenance d'un autre agent. La Figure 3-13 donne la nouvelle méthode qui se nomme "ReceiverAgent".

```

import time
from spade.agent import Agent
from spade.behaviour import OneShotBehaviour
from spade.message import Message
from spade.template import Template

class SenderAgent(Agent):
    class InformBehav(OneShotBehaviour):
        async def run(self):
            print("InformBehav running")
            msg = Message(to="receiver@your_xmpp_server") # Instantiate the message
            msg.set_metadata("performative", "inform") # Set the "inform" FIPA performative
            msg.body = "Hello World" # Set the message content

            await self.send(msg)
            print("Message sent!")

            # stop agent from behaviour
            await self.agent.stop()

    async def setup(self):
        print("SenderAgent started")
        b = self.InformBehav()
        self.add_behaviour(b)

class ReceiverAgent(Agent):
    class RecvBehav(OneShotBehaviour):
        async def run(self):
            print("RecvBehav running")

            msg = await self.receive(timeout=10) # wait for a message for 10 seconds
            if msg:
                print("Message received with content: {}".format(msg.body))
            else:
                print("Did not received any message after 10 seconds")

            # stop agent from behaviour
            await self.agent.stop()

    async def setup(self):
        print("ReceiverAgent started")
        b = self.RecvBehav()
        template = Template()
        template.set_metadata("performative", "inform")
        self.add_behaviour(b, template)

```

Figure 3-13 Procédure d'envoi et de réception de messages. @Richard Lepage

La nouvelle classe "ReceiverAgent" contient la méthode "run" et "setup". La Figure 3-14 montre que tant que l'agent "ReceiverAgent" est en opération, celui-ci attend confirmation de réception du message. Lorsque la confirmation est reçue, l'objet est fermé.

```

if __name__ == "__main__":
    receiveragent = ReceiverAgent("receiver@your_xmpp_server", "receiver_password")
    future = receiveragent.start()
    future.result() # wait for receiver agent to be prepared.
    senderagent = SenderAgent("sender@your_xmpp_server", "sender_password")
    senderagent.start()

    while receiveragent.is_alive():
        try:
            time.sleep(1)
        except KeyboardInterrupt:
            senderagent.stop()
            receiveragent.stop()
            break
    print("Agents finished")

```

Figure 3-14 Procédure de réception d'un message. @Richard Lepage

La Figure 3-15 présente le résultat de l'envoi et de la réception d'un message entre agents. Dans la procédure "RecvBehav", on peut insérer des informations indiquant par exemple la tension sur le bus CC ou le courant demandé pour rencontrer la charge.

```

$ python send_and_recv.py
ReceiverAgent started
RecvBehav running
SenderAgent started
InformBehav running
Message sent!
Message received with content: Hello World
Agents finished

```

Figure 3-15 Résultat de la procédure d'envoi et de réception de message provenant d'un autre agent. @Richard Lepage

La communication entre les agents est nécessaire pour le passage du jeton de contrôle.

3.2.5 Procédure de comportement pour machine à états finis

La Figure 3-16 présente un exemple de code sur lequel il faut se baser pour concevoir le gestionnaire d'énergie à partir de la simulation. Ce gabarit sera utilisé lors de l'expérimentation avec une carte de développement. On peut voir comment est programmé l'état un. À la Figure 3-17, on retrouve les deux autres états (états deux et trois).

```
import time

from spade.agent import Agent
from spade.message import Message
from spade.behaviour import FSMBehaviour, State

STATE_ONE = "STATE_ONE"
STATE_TWO = "STATE_TWO"
STATE_THREE = "STATE_THREE"

class ExampleFSMBehaviour(FSMBehaviour):
    async def on_start(self):
        print(f"FSM starting at initial state {self.current_state}")

    async def on_end(self):
        print(f"FSM finished at state {self.current_state}")
        await self.agent.stop()

class StateOne(State):
    async def run(self):
        print("I'm at state one (initial state)")
        msg = Message(to="fsmagent@your_xmpp_server")
        msg.body = "msg_from_state_one_to_state_three"
        await self.send(msg)
        self.set_next_state(STATE_TWO)
```

Figure 3-16 Exemple de comportement de l'état un. @Richard Lepage

L'état 1 envoie le message indiquant qu'il est dans l'état 1 et envoie aussi un message à l'état 3. Après l'envoi du message, la procédure entame l'état 2.

À l'état 2, la procédure envoie le message indiquant que l'état 2 est exécuté et le programme se dirige ensuite vers la procédure correspondant à l'état 3. L'état 3 est exécuté et est en attente d'un message à l'intérieur d'une durée de 5 secondes. Si un message est reçu dans cet intervalle de temps, celui-ci sera affiché sinon rien ne sera fait et la procédure prendra fin. Lors de l'expérimentation, le programme tournera en boucle de manière à être en attente d'un évènement. La Figure 3-18 présente les résultats de la procédure.

```
class StateTwo(State):
    async def run(self):
        print("I'm at state two")
        self.set_next_state(STATE_THREE)

class StateThree(State):
    async def run(self):
        print("I'm at state three (final state)")
        msg = await self.receive(timeout=5)
        print(f"State Three received message {msg.body}")
        # no final state is setted, since this is a final state

class FSMAgent(Agent):
    async def setup(self):
        fsm = ExampleFSMBehaviour()
        fsm.add_state(name=STATE_ONE, state=StateOne(), initial=True)
        fsm.add_state(name=STATE_TWO, state=StateTwo())
        fsm.add_state(name=STATE_THREE, state=StateThree())
        fsm.add_transition(source=STATE_ONE, dest=STATE_TWO)
        fsm.add_transition(source=STATE_TWO, dest=STATE_THREE)
        self.add_behaviour(fsm)

if __name__ == "__main__":
    fsmagent = FSMAgent("fsmagent@your_xmpp_server", "your_password")
    fsmagent.start()

    while fsmagent.is_alive():
        try:
            time.sleep(1)
        except KeyboardInterrupt:
            fsmagent.stop()
            break
    print("Agent finished")
```

Figure 3-17 Codage des états deux et trois. @Richard Lepage

```
$python fsm.py
FSM starting at initial state STATE_ONE
I'm at state one (initial state)
I'm at state two
I'm at state three (final state)
State Three received message msg_from_state_one_to_state_three
FSM finished at state STATE_THREE
Agent finished
```

Figure 3-18 Résultat de la procédure de machine à états finis. @Richard Lepage

3.3 Comportement des agents en simulation

Pour la partie simulation, de nombreuses recherches tendent vers l'utilisation de "Stateflow" pour modéliser les stratégies de gestion d'un système. De cet environnement, nous pouvons aisément implémenter la simulation vers une expérimentation en milieu réel sur des systèmes embarqués. Nous avons vu que SPADE est une plateforme efficace qui peut prendre vie même dans l'environnement Matlab car Python est intégré dans les nouvelles versions de ce progiciel. Comme on disposait de la machine à états finis dans l'environnement SIMULINK, il a semblé plus simple et plus rapide de passer par cette option que de programmer directement en code Matlab le système de gestion d'énergies. Une seconde raison qui pousse à l'utilisation de Stateflow est la possibilité de faire du traitement parallèle en ce qui a trait à la communication entre agents ou à des agents qui fonctionnent en mode asynchrone, i.e. que les traitements pour chacun des agents se feront en parallèle l'un par rapport à l'autre.

Lors de l'expérimentation, la programmation par machine à états finis sera facilement implémentée dans la carte de développement qui contiendra la

plateforme SPADE car étant intégrée au système Linux. Comme nous avons vu précédemment, SPADE permet un fonctionnement en machine par états finis pour programmer des comportements lors des changements d'états. Dans l'éventualité où on voudrait utiliser l'environnement Arduino, il existe des bibliothèques qui utilisent le modèle de machine à états finis.

3.4 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous avons vu que le mode de gestion par agents démontre qu'il est plus avantageux d'utiliser ce mode de gestion que d'utiliser les modèles traditionnels à dépendance analytique pour des systèmes considérés comme étant très complexes. Ceux-ci sont difficilement modélisables du point de vue mathématique car l'approche par modèle étant par trop simplificatrice, amenant des omissions qui modifient les modèles jusqu'à l'atteinte du bon comportement. Il est malheureusement impossible de savoir si le modèle englobe tous les scénarios, ce qui nous amène à réfléchir sur la méthodologie de conception. Dans cette thèse, le mode de gestion appelle à une conception légèrement différente car demandant une approche ascendante contrairement à cette approche descendante qui est souvent utilisée lors de la conception des systèmes de gestion d'énergie. L'approche ascendante permet de bien connaître tous les détails concernant le fonctionnement du modèle et, par le fait même, nous permet de nous concentrer uniquement sur l'objectif final du système. Dans

l'approche descendante, on essaie de résoudre le problème sans vraiment connaître tous les détails de chacun des objets opérant dans le système, surtout si les modèles ont été simplifiés au départ.

On devra inclure une dépendance coût dans la stratégie de gestion d'énergie qui sera représentée par une équation de répartition de puissance. Cette répartition de puissance doit être distribuée parmi les sources selon une fonction coût qui sera prise en considération pour diminuer l'utilisation du GED. Il existe plusieurs manières d'y parvenir et il est probable qu'une méthode en vaille une autre selon son efficacité et sa tenue au niveau de la dynamique du système.

Dans le monde de l'ingénierie, le mode de contrôle par SMA est peu connu car c'est un paradigme qui provient du secteur des technologies de l'information et les simulations présentent un haut degré d'abstraction, surtout en la présence d'une machine à états finis qui simule la gestion d'énergie d'un système hybride.

Nous savons maintenant que les procédures de base servant à concevoir des agents locaux sont très bien documentées et il est très simple de les implémenter dans des systèmes embarqués pour peu que l'on soit en présence des bons outils de conception. L'outil Stateflow permettra une meilleure compréhension de la gestion des états qu'une programmation textuelle standard comme nous le verrons dans la partie expérimentation.

CHAPITRE 4

4. MODÉLISATION ET SIMULATION

4.1 Introduction

Dans cette partie dédiée à la simulation, nous expliquons comment nous avons modélisé notre système multi-agents avant de le tester expérimentalement avec des agents programmés sur microcontrôleur, que l'on verra dans le chapitre 5. Le système hybride est modélisé dans l'environnement Simulink. On présente chacune des parties du système afin de présenter le modèle complet pour ensuite le simuler pour obtenir des résultats de son fonctionnement. Dans la version expérimentale, le contrôleur sera différent de la version simulée mais les grandes lignes de conception seront conservées.

4.2 Matériels et méthodes

4.2.1 La modélisation du vent

Pour valider le SMA en mode simulation, on utilisera un modèle de vent [89] qui s'apparente à l'algorithme Marsaglia's Ziggurat basé sur le spectre Kaimal. Le modèle Kaimal est une représentation spectrale des turbulences du vent s'approchant au mieux de la réalité. La Figure 4-1 présente un exemple d'un tel signal aléatoire produit par un élément de la librairie Wind-turbine blockset. La méthode ziggourat est un algorithme pour engendrer des nombres

aléatoires ayant une densité strictement monotone. Cette méthode peut aussi être appliquée à des lois symétriques unimodales telles que la loi normale en choisissant un point sur l'une des moitiés et en choisissant le côté aléatoirement. Cette méthode a été développée par George Marsaglia et Wai Wan Tang.

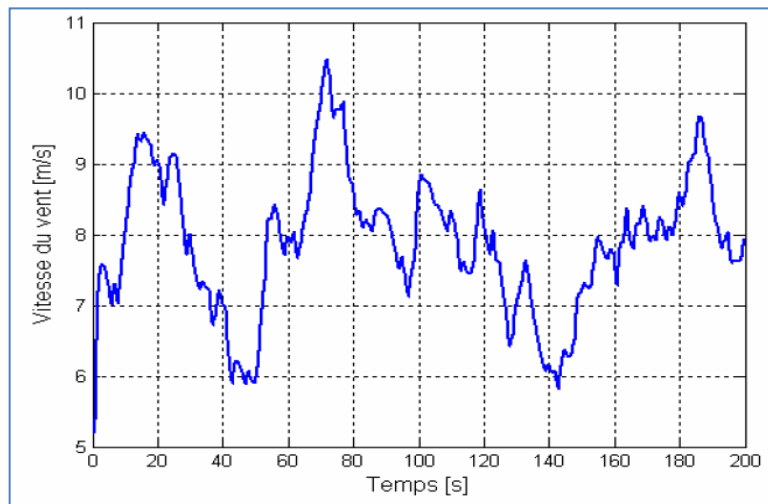


Figure 4-1 - Signal de vent aléatoire sur la base d'un spectre Kaimal. @Mathwork

On présente, à la Figure 4-2, le modèle Simulink de génération de la série temporelle des vitesses de vents afin de simuler les turbulences et les décrochages de la turbine éolienne. Ce modèle provenant de la librairie Wind Power Blockset a été réécrit pour être utilisé dans l'environnement Simscape. Ce signal sera envoyé en entrée de l'élément modélisant une turbine éolienne de 900 kW, modèle faisant partie de la librairie de Simscape power system dont une partie des composants est présenté à la Figure 4-3.

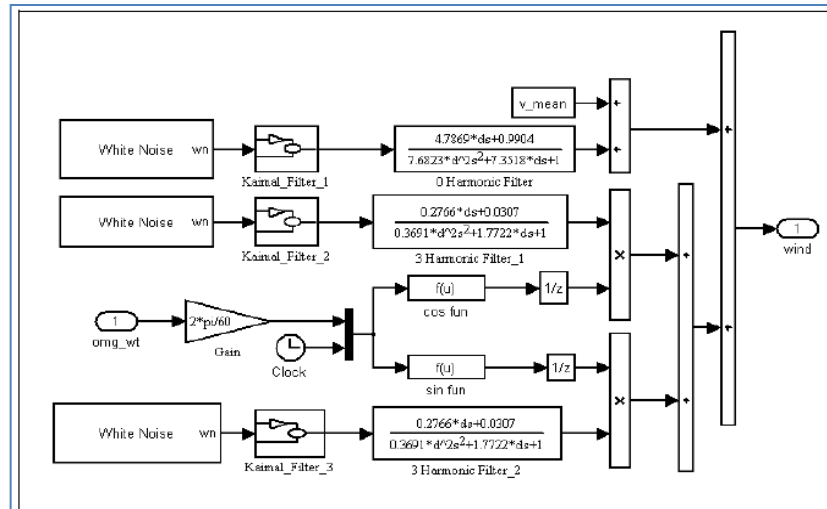


Figure 4-2 - Modèle Kaimal de simulation de vent. @Mathwork

Dans cette librairie, on disposera de même de plusieurs types de charges résistives et inductives pour valider la nouvelle stratégie de contrôle. Il sera possible de vérifier si l'efficacité du système demeure dans les tolérances lorsque la charge présentée sera inductive.

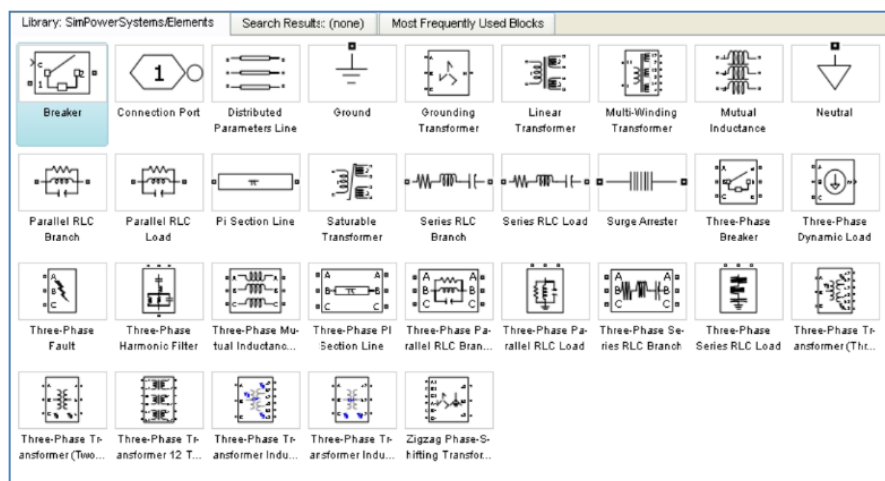


Figure 4-3 – Modèles de composants électriques de la librairie Simscape power system. @Mathwork

Ce sera la mission du convertisseur unidirectionnel CC/CA qui réalisera cette validation. Une fois le processus de validation terminé avec le contrôleur SMA, nous pourrons simuler avec les données provenant du site de Tuktoyaktuk afin d'en faire la comparaison avec les données de vents et de charges réelles pour une période donnée.

4.2.2 Emplacement du site pour la provenance des données expérimentales

Les données de vent et de charge ont été enregistrées en 2007 au village Tuktoyaktuk au Canada dans le nord des territoires du nord-ouest. La Figure 4-4 indique l'emplacement géographique du village dont les données ont été extraites.

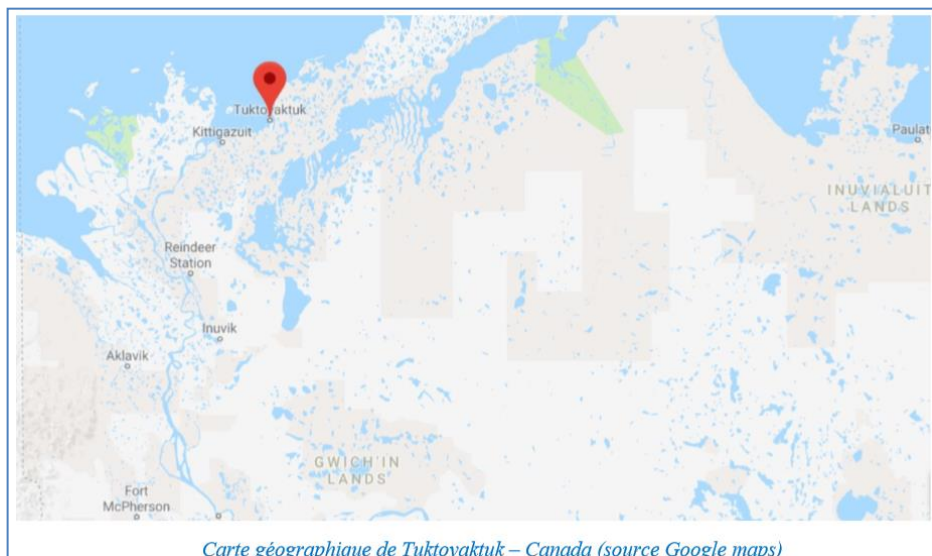


Figure 4-4 - Emplacement du site de Tuktoyaktuk. [15]

Dans cette région particulièrement venteuse, la température sur une année présente une évolution périodique très distincte. On présente à la Figure 4-5, pour

l'année 2019, une telle courbe dont la température moyenne la plus basse atteint -31 °C jusqu'à -8 °C durant l'été. À la Figure 4-6, Pour la période de janvier, la moyenne de la vitesse du vent est d'environ 5 m/s, tandis qu'en été, la vitesse du vent est d'environ 4,5 m/s.

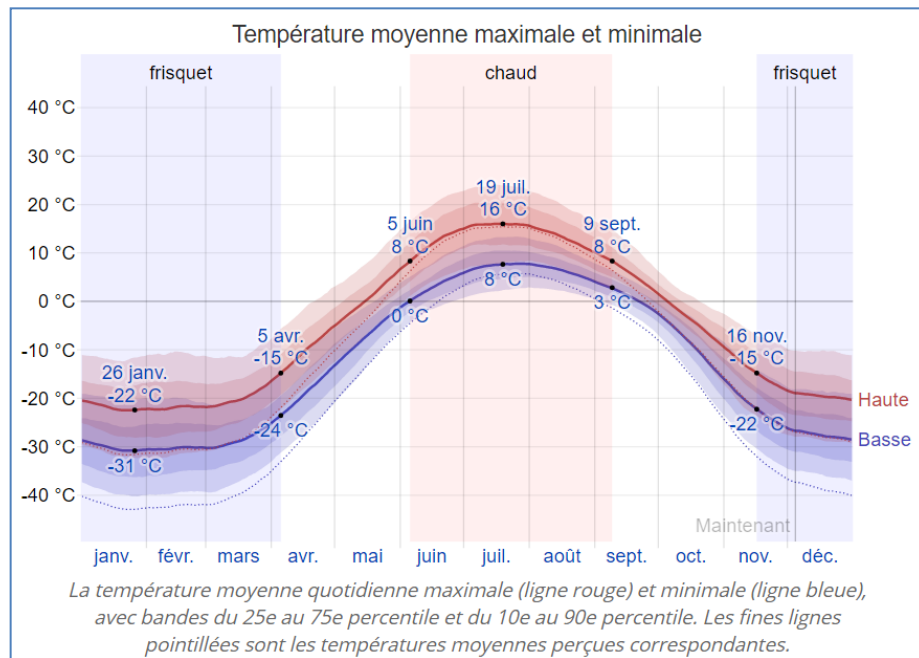


Figure 4-5 Courbe annuelle de température à Tuktoyaktuk [15]

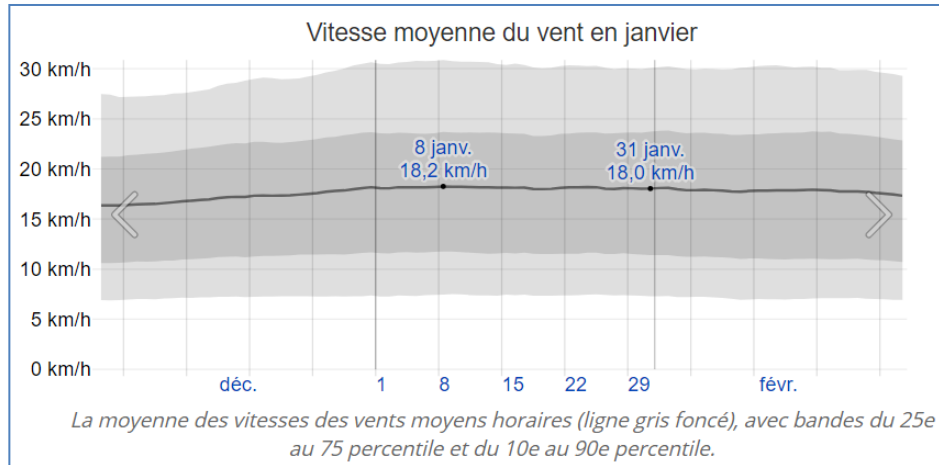


Figure 4-6 Vitesse moyenne du vent pour janvier 2019 à Tuktoyaktuk [15]

4.2.3 Modélisation du profil de la charge électrique et du vent

La Figure 4-7 présente le profil de charge annuel du village pour l'année 2007. On remarquera que la charge du réseau est minimale en juillet et maximale entre novembre et janvier. Ce profil de charge servira lors de la simulation afin de comparer les résultats simulés avec les données provenant du site de Tuktoyaktuk.

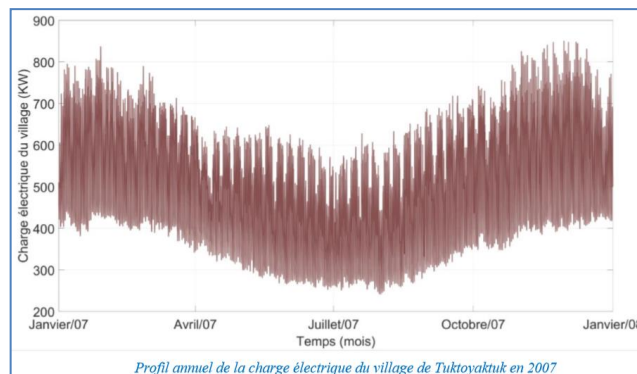


Figure 4-7 - Profil de la charge électrique du village pour l'année 2007. [15]

À la Figure 4-8, nous retrouvons le profil annuel de la vitesse moyenne du vent qui sera appliqué à la génératrice lors de la simulation. Pour pouvoir comparer les données de consommation simulée du diesel avec les données expérimentales de 2007, il était obligatoire de disposer des données de vents, de charges et des données du diesel afin d'obtenir une analyse comparative évaluant le contrôle SMA et son architecture décentralisée. Cela permettra, lors d'une étape ultérieure, d'améliorer les paramètres du contrôleur afin d'obtenir la meilleure efficacité sur la consommation du diesel.

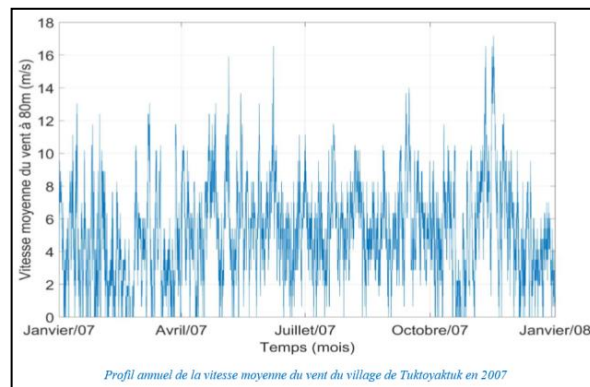


Figure 4-8 - Profil de vitesse moyenne de vent du village de Tuktoyaktuk. [15]

4.2.4 Modélisation de l'éolienne et du groupe électrogène

On présente à la Figure 4-9 la courbe de puissance de l'éolienne se trouvant sur le site du village Tuktoyaktuk. Cette courbe modélise le maximum de puissance disponible pour une vitesse de vent donnée, la génératrice éolienne pouvant fournir jusqu'à 900 kW. Comme la vitesse moyenne du vent sur ce site est de 5 m/s, on pourra établir la simulation à cette vitesse de vent comme première

étape et ensuite selon la courbe de vitesse du vent de la Figure 4-1 dont l'évolution se situe entre 5 m/s et 10,5 m/s. Les données qui suivent font partie du moteur diesel avec différentes courbes de charges. Les courbes de la Figure 4-10 à la Figure 4-14 sont des données à partir desquelles nous pourrions comparer la consommation du moteur diesel avec celle obtenue par la méthode de contrôle SMA. L'injection de l'air comprimé dans les cylindres du moteur diesel se fera indépendamment du contrôle SMA, i.e. lors du démarrage du GED, la suralimentation embarquera automatiquement à la pression prescrite, soit entre 2.25 et 2.8 bars. Nous avons choisi une pression moyenne de 2.5 bars peu importe la charge appliquée au GED.

La courbe de puissance de l'éolienne est une courbe approximative qui dépend de la température de l'air, de la pression atmosphérique et des aléas du vent. C'est la moyenne du vent qui est utilisée pour tracer une telle courbe. Il est difficile d'obtenir des mesures précises de la vitesse du vent. S'il se produit une erreur de seulement 4 % dans la mesure de vitesse du vent, le contenu énergétique réel du vent sera alors 12 % supérieur ou inférieur au résultat obtenu (on doit se rappeler que le contenu énergétique varie avec le cube de la vitesse du vent). Par conséquent, il faut prévoir un risque d'erreur de +/- 10 %, même dans les courbes de puissance certifiées.

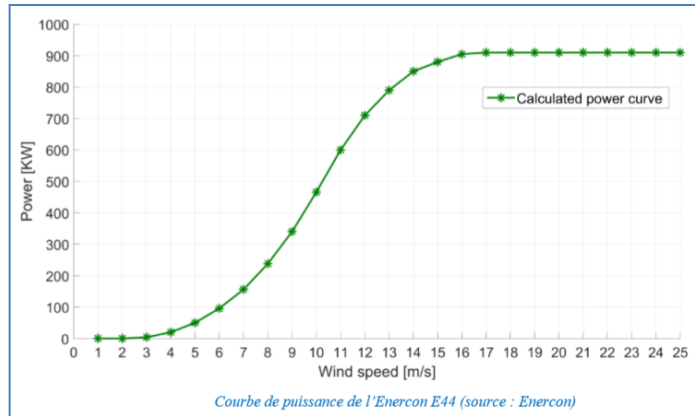


Figure 4-9 - Courbe de puissance de l'éolienne Enercon E44. [15]

À la Figure 4-10, le débit d'air d'admission présente une nature linéaire selon la charge appliquée. Comme il a été vu lors de l'expérimentation sur la suralimentation du GED, c'est à une pression constante de 2.5 bars que l'air sera injecté dans les cylindres. Il faudra tenir compte de cette courbe lorsque des calculs seront nécessaires afin de calculer l'économie en carburant selon la charge moyenne appliquée au système. Les données de consommation seront enregistrées systématiquement lors de la prise de données continue effectuée par l'agent GED. Les données seront sauvegardées sur une carte microSD se trouvant sur la carte microcontrôleur.

De même, en visualisant la courbe de pression d'admission en fonction de la charge appliquée, on peut voir qu'une cylindrée de 30 L permettra une charge de 500 kW. Dépendant du débit d'air appliqué au cylindre, on remarque qu'il y a peu de changement sur la consommation en carburant diesel, la consommation étant affectée par la charge soutenue par le GED.

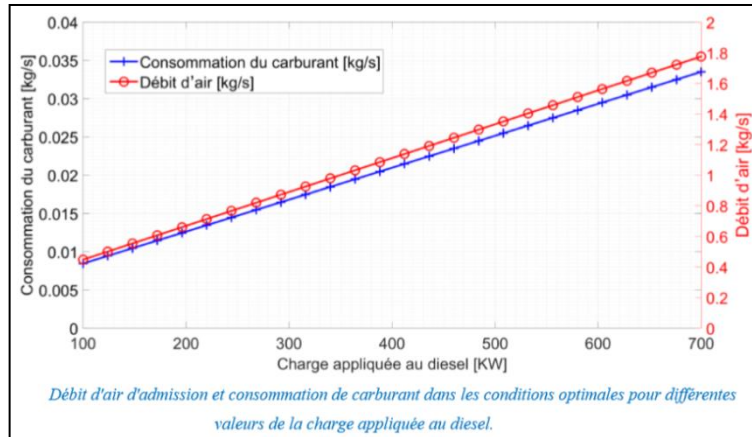


Figure 4-10 - Consommation de carburant vs débit d'air d'admission. [15]

Selon les courbes des Figure 4-11 et 4-12, en appliquant une pression d'admission de 2,5 bars, on obtient une consommation de carburant qui est encore beaucoup plus basse que si la suralimentation avec l'air comprimé n'était pas activée.

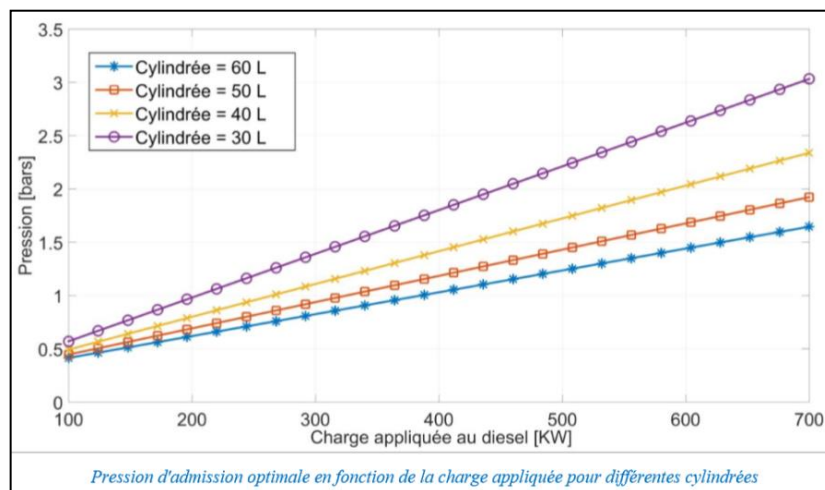


Figure 4-11 - Pression d'admission vs la charge appliquée.[15]

On remarquera également qu'à 2,5 bars, la consommation de carburant évolue entre 0,03 et 0,045 kg/s, représentant un creux près du minimum de consommation se produisant entre 2 bars et 1,2 bars.

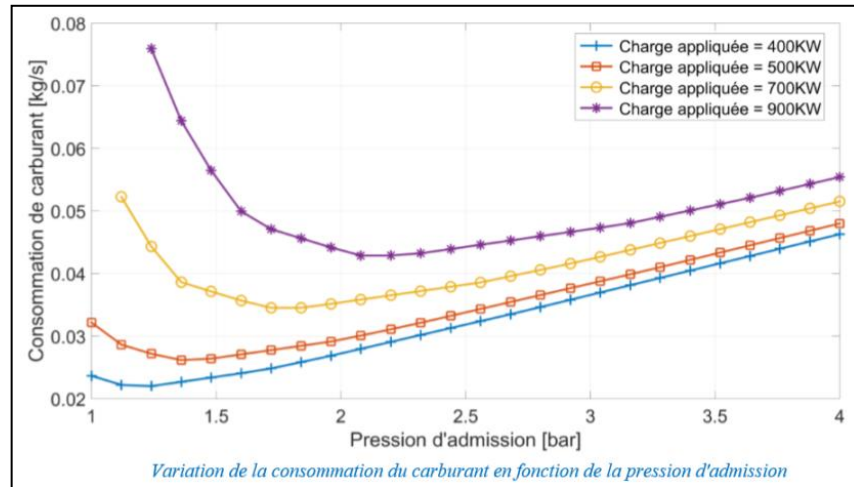


Figure 4-12 - Courbe de consommation vs pression d'admission [15]

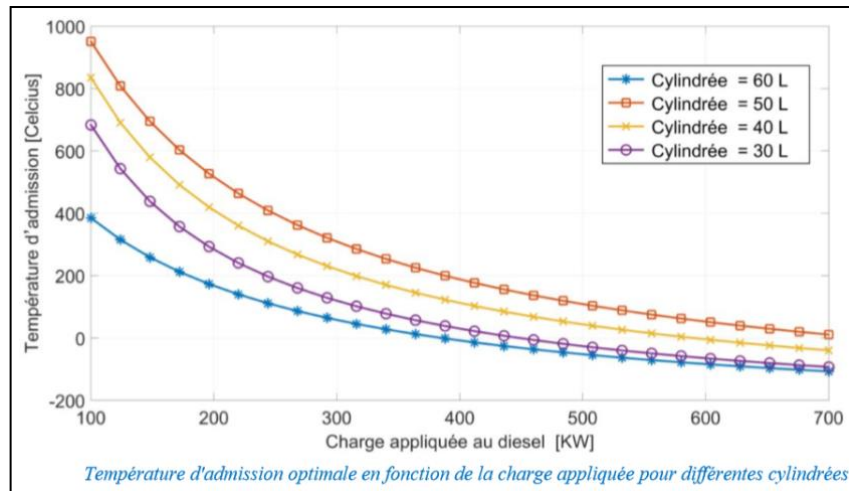


Figure 4-13 - Température d'admission selon la charge appliquée [15]

Cela renforce notre hypothèse de suralimenter le GED par une pression de 2,5 bars en moyenne, pression qui sera maintenue constante peu importe la

charge présentée au SHEDAC. Dans le cadre de cette recherche, cette pression caractéristique sera prise en charge par l'agent diesel. Cette partie ajoutera une plus-value à l'efficacité du système hybride. La température d'admission ne sera pas prise en charge lors de cette étude mais pourrait servir à des calculs d'optimisation lors de la prise de données par Datalogger durant la première année d'opération du SMA.

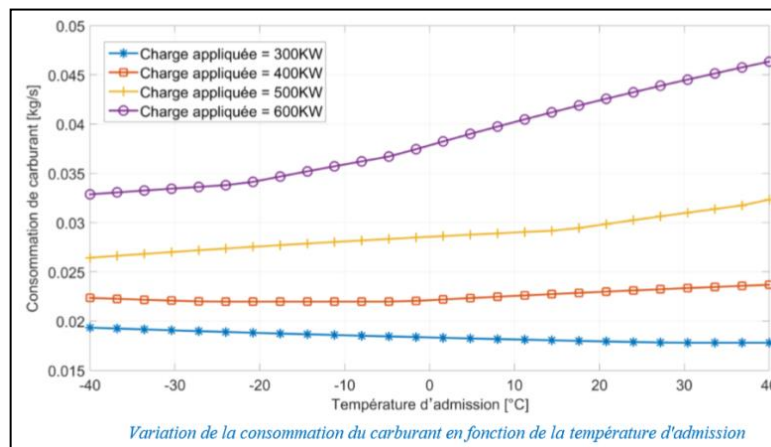


Figure 4-14 - Courbe de consommation de carburant vs température d'admission. [15]

Les courbes de la Figure 4-10 à la Figure 4-14 seront également utiles lors d'une validation expérimentale ultérieure. Lorsque le SMA sera validé sur la plateforme expérimentale, on pourra comparer ces courbes avec celles qui seront fournis par le gestionnaire d'énergie.

4.2.5 Modélisation du banc de supercondensateur

Dans cette recherche, nous avons inclus, dans la modélisation du système hybride, un banc de supercondensateur dont la mission principale est de soutenir

le réseau pendant plusieurs minutes, le temps que le GED se stabilise après son démarrage lorsque la ressource éolienne et le contenu du réservoir d'air comprimé ne seront pas en mesure de rencontrer la demande en électricité. Un banc de supercondensateur contient une très grande densité de puissance contrairement aux batteries lithium-ion ou plomb-acide et peut soutenir une forte puissance durant un temps court.

	Pile à combustible	Batterie	Supercondensateur	condensateur électrolytique
Densité de puissance (W/kg)	120	150	1 000 - 5 000	100 000
Densité d'énergie (Wh/kg)	150 - 1500	50 -1500	4-6	0,1

Figure 4-15 – Tableau comparatif de densité de puissance. @Richard Lepage

On montre aux Figure 4-15 et Figure 4-16 un tableau comparatif de la densité de puissance des supercondensateurs comparativement aux batteries et à la pile à combustible. On peut voir que la densité de puissance des supercondensateurs évolue entre 1000 W/Kg et 5000 W/Kg tandis que la densité d'énergie évolue avec des valeurs plus faibles que pour les batteries, soit entre 4 et 6 Wh/Kg comparativement aux batteries dont la densité énergétique évolue entre 50 Wh/kg et 1500 Wh/Kg.

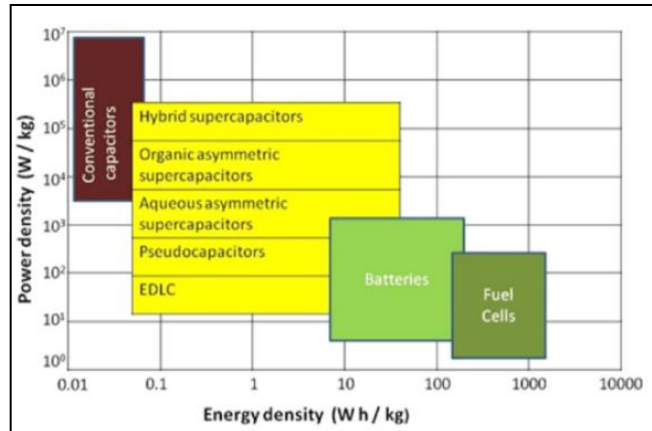


Figure 4-16 - Tableau comparatif de stockage d'énergie par supercondensateur. [17]

Pour le moment, le coût des supercondensateurs est beaucoup plus élevé que celui des batteries mais des recherches récentes sur des méthodes de fabrication plus efficace ont amené le coût de ces composants à un niveau économiquement acceptable à un point où les batteries (éventuellement écologique) sont hybridées [90] avec des supercondensateurs pour allier rendement et puissance sur le long terme, ce qui permet également d'allonger considérablement la durée de vie des batteries lithium-ion.

Le processus de charge d'un supercondensateur est très différent de celui des batteries rechargeables et le cycle de restitution de l'énergie s'accompagne d'une baisse de tension dont la courbe est linéaire atteignant une valeur nulle après un temps assez court lorsque la demande en courant est très élevée comme le montre la Figure 4-17.

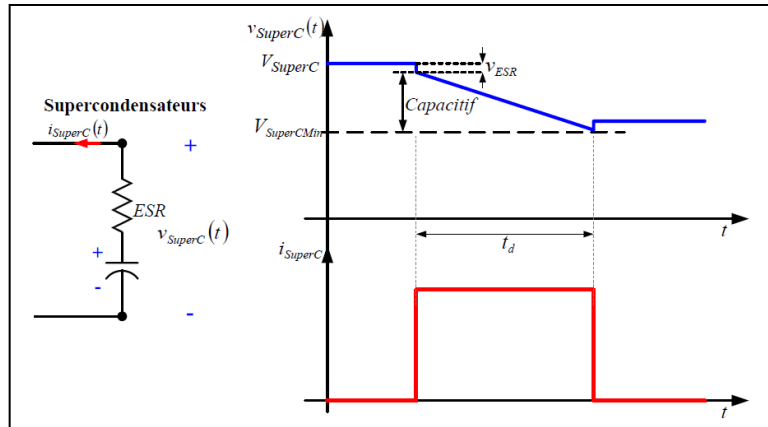


Figure 4-17 - Réponse typique en tension d'un supercondensateur lors de la restitution d'un courant constant. [91]

Si la demande en courant est assez faible, la pente de la chute de tension devient dès lors presque nulle et la tension semble constante durant un temps assez long dépendant de la capacité du supercondensateur. On devra déterminer convenablement la tension CC qui sera utilisable sur le bus CC afin d'obtenir une faible pente de l'évolution de la tension du bloc de supercondensateurs. Pour charger un supercondensateur, il est préférable d'avoir une alimentation à découpage avec limiteur de courant. Dans le début de la charge du supercondensateur, la capacité de celui-ci est très élevée et la demande en courant s'en trouve amplifiée pouvant provoquer un court-circuit du régulateur s'il n'y a pas de limiteur de courant. Après un certain temps dépendant des caractéristiques du supercondensateur, le limiteur de courant se devra d'être enlevé pour terminer la charge du supercondensateur. La courbe de charge en tension en fonction du courant est montrée à la Figure 4-18.

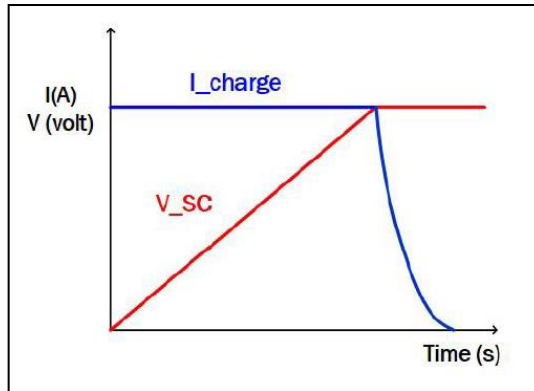


Figure 4-18 - Contrôle de la charge d'un supercondensateur [91]

Selon [91], Il est requis d'utiliser des condensateurs en série pour accumuler le plus d'énergie. Par exemple, l'énergie dans un condensateur est donnée par $W = CV^2/2$ et l'énergie qui sera utilisée est donnée par $W = C(V_{charge}^2 - V_{décharge}^2)/2$. Pour deux chaînes de 4 condensateurs de 10 F à 2.7 V en parallèle avec une charge à 5 V nécessitant 6 V de tension de décharge, $W = 201.6$ Joules tandis qu'une chaîne de 8 condensateurs de 10 F à 2.7 V en série conservera une énergie de 269.1 Joules. Les huit (8) condensateurs en série donne une valeur de $10F/8 = 1.25$ F tandis que la banque de deux chaînes en parallèle de 4 condensateurs en série donnera une capacité de 5 Farads, soit $2.5 \text{ Farads} \times 2$. Nous pouvons voir que la chaîne de 8 condensateurs en série donnera une tension plus élevée, soit 21.6 V comparativement à la banque de deux chaînes en parallèle de 4 condensateurs en série qui donnera une tension de 10.8 V.

Lors de la simulation, nous prendrons une chaîne de 106 condensateurs en série de capacité de 3000 Farads à une tension de 2,7 V pour un total de près de 291 V de tension CC. On disposera d'une capacité totale de $3000/106$ qui donne

environ 28.3 Farads. Au total, cette capacité contiendra 8235,3 Coulombs résultant en un courant de 137.2 A pendant 1 min produisant une puissance de 40 kW/min. C'est une puissance suffisante pour maintenir un petit réseau de 25 kW de puissance crête le temps que le GED puisse prendre la relève.

4.2.6 Modélisation du stockage et de la détente de l'air comprimé.

4.2.6.1 Le stockage de l'air comprimé

Pour évaluer le temps restant d'un réservoir à air comprimé ou évaluer le temps de charge, il est nécessaire d'insérer les équations de stockage et de détente dans le système SMA. Une mesure de la pression restante permettra au système d'évaluer le temps restant ou le temps de charge en fonction des besoins de la charge primaire. Comme la pression sera constante, on pourra utiliser un compteur temporel dans l'évaluation du SOC des réservoirs d'air comprimé. Cela permettra aux agents de choisir la manière dont les sources participeront à la tenue de la tension du bus CC en fonction de la puissance demandée à la charge. On présente ci-dessous le temps de charge t_{ch} d'un réservoir à air comprimé. Ces équations proviennent d'une recherche bibliographique concernant le stockage de l'air comprimé [8, 20, 21, 37].

$$t_{ch} = N_C \tau_{ch} \left(\frac{\pi_C^{\lambda_{ch}}}{\lambda_{ch} + 1} - \pi_c \right) \quad (4.1)$$

L'équation 4.1 permet le calcul du temps de charge du réservoir d'air comprimé. La variable τ_{ch} représente la constante de temps durant la phase de charge du réservoir et N_c représente le nombre d'étages de compression. L'équation 4.2 permet de calculer le paramètre λ_{ch} se trouvant dans l'équation 4.1.

$$\lambda_{ch} = \frac{n_c - 1}{n_c N_c} \quad (4.2)$$

Le paramètre n_c est l'exposant polytropique que l'on fixe à une valeur de 1,3. L'équation 4.3 est un rapport sans dimension de la pression de sortie du réservoir P_s sur la pression atmosphérique P_a . Ce rapport est utilisé par l'équation 4.1.

$$\pi_c = \frac{p_s}{p_a} \quad (4.3)$$

$$\tau_{ch} = p_a \frac{V_p}{p_c} \frac{c_p}{r} \quad (4.4)$$

Pour l'équation 4.4, le paramètre V_p est le volume d'air comprimé produit (m^3), C_p est la chaleur massique de l'air ($1000 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$) et P_c la puissance consommée par le compresseur. Le paramètre r est la constante des gaz parfait. La Figure 4-19 montre que le temps de charge est amélioré lorsque le nombre d'étage du compresseur est plus grand que l'unité. On peut voir que pour (5) cinq

étages, le temps de charge approche 2 heures au lieu de 3.5 heures pour remplir un réservoir de 300 L à une pression de 300 bars.

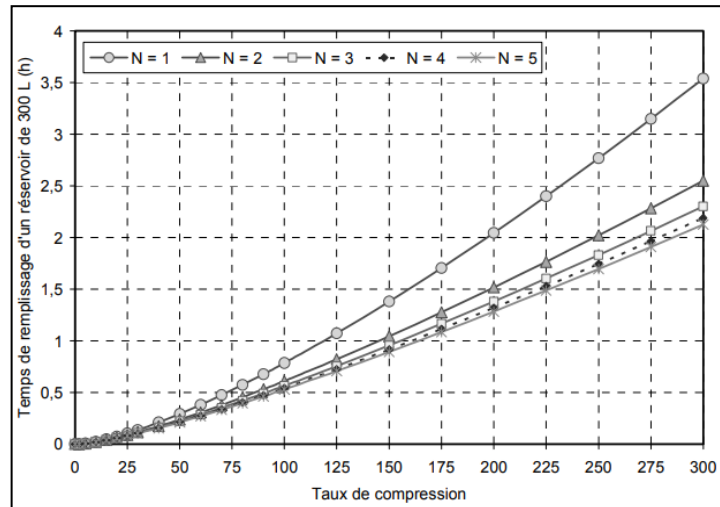


Figure 4-19 - Variation du temps de charge d'un réservoir de 300 L en fonction du taux de compression et du nombre d'étages d'un compresseur de 5 kW de puissance. [37]

Si nous augmentons la puissance d'un compresseur de 5 étages à 20 kW, le temps de charge passera de 2 heures à 0,5 heures, ce que l'on démontre à la Figure 4-20. Pour une économie substantielle sur le coût du compresseur, il sera possible de recharger le réservoir d'air comprimé non pas lorsque celui-ci sera vide mais aussitôt que possible lorsque le moment le permettra, i.e. lorsque la production dépassera la demande de puissance à la charge ou lorsque le GED sera à 30% de sa puissance nominale. À cette étape, les agents se chargeront de recharger les réservoirs d'air comprimé et le banc de supercondensateurs si le SOC est plus petit que 30 %.

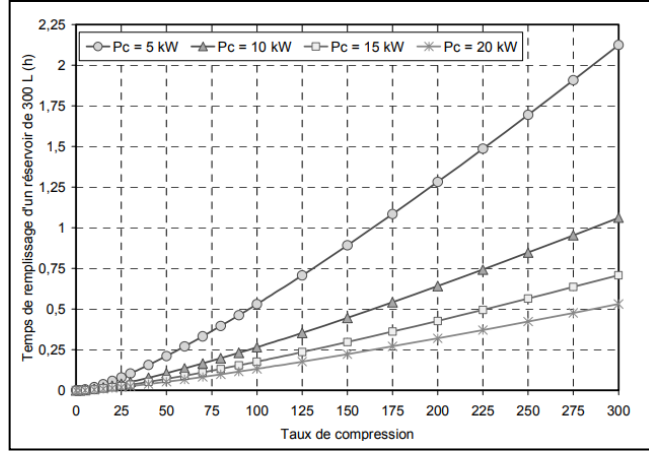


Figure 4-20 - Variation du temps de charge d'un réservoir de 300 L en fonction du taux de compression et de la puissance consommée par un compresseur de 5 étages. [37]

4.2.6.2. La détente de l'air comprimé

Le temps de restitution d'un réservoir d'air comprimé est donné par les expressions suivantes [21, 37]:

$$t_{disch} = N_{CAE} \tau_{disch} \left(\frac{\pi_C^{\lambda_{disch}+1}}{\lambda_{disch}+1} + \frac{\lambda_{disch}}{\lambda_{disch}+1} - \pi_C \right) \quad (4.5)$$

Les divers paramètres de l'équation 4-5 sont déterminés par les équations 4.6 à 4.8. Le paramètre N_{CAE} est le nombre d'étages de détente du MAC, T_{disch} est la constante de temps durant la phase de décharge, η_E est le coefficient polytropique de détente et P_{CAE} est la puissance produite par le MAC (Watts).

$$\lambda_{disch} = \frac{n_E - 1}{n_E N_{CAE}} \quad (4.6)$$

$$\pi_C = \frac{p_s}{p_a} \quad (4.7)$$

$$\tau_{disch} = p_a \frac{V_r}{p_{CAE}} \frac{c_p}{r} \quad (4.8)$$

Le MAC est un moteur à air comprimé du type à piston. Il est considéré comme étant le plus mature, le plus fiable et le moins cher sur le marché. Selon [20], il permet une utilisation complète de la détente polytropique de l'air comprimé dans le cylindre.

Le temps de restitution entre deux niveaux de pression est également donné par l'équation 4-9.

$$t_{disch - p_1 \rightarrow p_2} = N_{CAE} \tau_{disch} \left(\frac{\left(\pi_{C-p_1}^{\lambda_{disch}+1} - \pi_{C-p_2}^{\lambda_{disch}+1} \right)}{\lambda_{disch} + 1} + \pi_{C-p_2} - \pi_{C-p_1} \right) \quad (4.9)$$

Pour cette équation, V_r est le volume du réservoir d'air comprimé (m^3), C_p est la chaleur massique de l'air (1 000 J/kg.K). Les Figure 4-21 et Figure 4-22 représentent les variations de la pression dans un réservoir de 225 L en fonction du temps de décharge, de la pression maximale de stockage et du nombre d'étages de détente dans un MAC ayant une puissance constante (8 kW) .

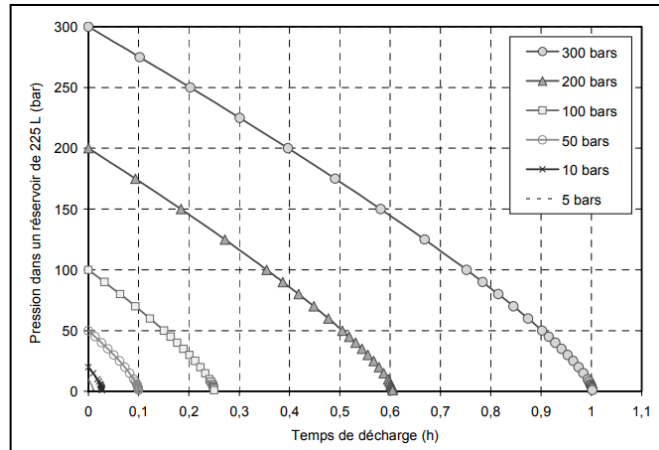


Figure 4-21 - Variation de la pression du réservoir (225 L) en fonction de la pression maximale de stockage et du temps de décharge pour 5 étages de détente. [8]

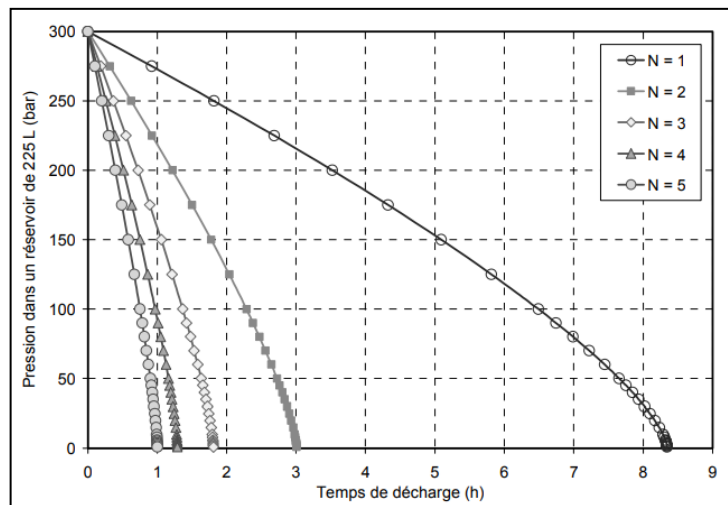


Figure 4-22 - Variation de la pression du réservoir (225 L) en fonction du temps de décharge et du nombre d'étages pour un MAC de 8 kW de puissance. [8]

4.2.7 Modélisation du SHEDAC avec des convertisseurs CC-CC

On retrouve deux types de contrôle sur les systèmes hybrides, soit le contrôle centralisé où un module unique commande l'ensemble du système et, plus rarement, le contrôle distribué où chacune des parties à son propre contrôle et un gestionnaire d'objectif qui est choisi selon des conditions spécifiques parmi l'ensemble des contrôles locaux. Chacun à ses avantages et désavantages. Dans le cadre de cette recherche, nous avons ciblé le contrôle distribué où chaque source participe à sa manière à la puissance totale fournie à la charge et dont le contrôle de l'ensemble est indépendant de chacune des sources. Le contrôle lié à la rencontre de l'objectif global est pris en charge par le détenteur du jeton de contrôle. Débutons par un contrôle centralisé le plus commun, soit le contrôle par bus CA. Selon les différentes sources branchées dans un système hybride, on dénote la complexité du contrôle retrouvé dans le système de contrôle centralisé avec bus CA représenté à la Figure 4-23.

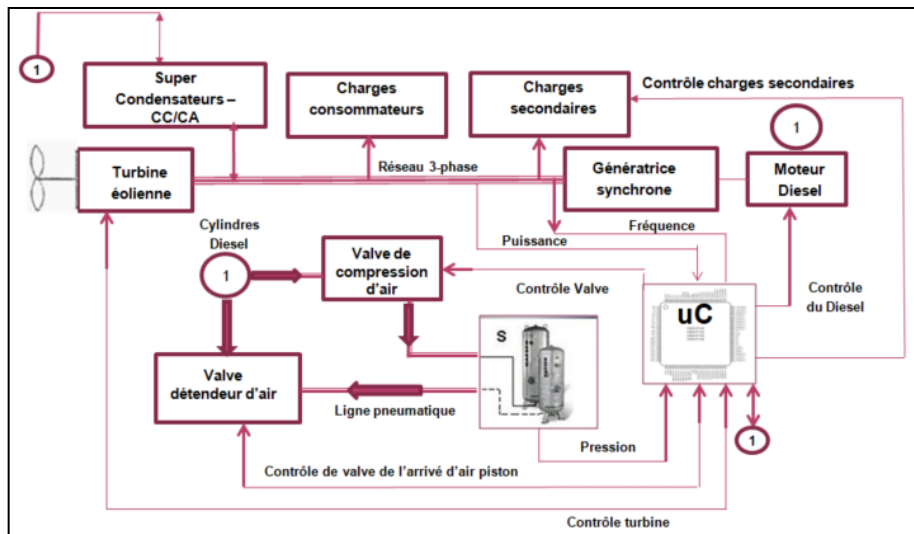


Figure 4-23 - Contrôleur centralisé avec bus CA. @Richard Lepage

En effet, si le processeur central présente un dysfonctionnement, cela produira un arrêt complet du système. De plus, l'ajout de nouvelles sources ne sera pas simple à intégrer dans le système à moins d'une modification majeure dans le programme de gestion d'énergie du système de gestion centralisé. On se doutera que le système ne sera pas en opération le temps duquel l'ajout d'une nouvelle source sera programmé à moins de disposer d'un double de la carte qui, une fois le nouveau programme complété, remplacera la carte du contrôleur. De plus, l'approche de contrôle d'un bus CA est beaucoup plus complexe qu'avec une approche centralisé par bus CC [92].

L'approche par une configuration mixte constituée d'un bus CC et d'un bus CA (voir Figure 4-24) aurait des performances supérieures par rapport à la configuration à un bus CC. Dans cette configuration, on retrouve moins de perte d'énergie car l'éolienne et le GED peuvent alimenter directement la charge AC

augmentant ainsi le rendement du système tout en réduisant la puissance nominale du GED et de l'onduleur.

Parmi les avantages que l'on retrouve dans cette configuration, on notera que le GED et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Lorsque la charge est faible, l'un ou l'autre peut rencontrer la puissance demandée. Durant les pics de puissance, les deux peuvent fonctionner en parallèle. On retrouve également la possibilité de réduire la puissance nominale du GED et de l'onduleur sans affecter la capacité du système à rencontrer les pics de puissance.

Concernant l'autre côté de la médaille, le principal désavantage de cette configuration se retrouve dans la complexité du module de contrôle dont la configuration est un fonctionnement en parallèle de l'onduleur et du GED car ceux-ci doivent être synchronisés au niveau de la tension et de la fréquence lors de ce mode de fonctionnement. Ce désavantage nous amène à considérer le bus CC comme une alternative fiable pour la stabilité du réseau dans notre recherche sur la conception d'un contrôle de gestion d'énergie. Pour rencontrer les objectifs de cette recherche, le bus CC est le choix à privilégier dans notre démarche. Il sera beaucoup plus simple de contrôler la gestion d'énergie en gardant stable la tension du bus par injection de courant à partir de convertisseur CC-CC.

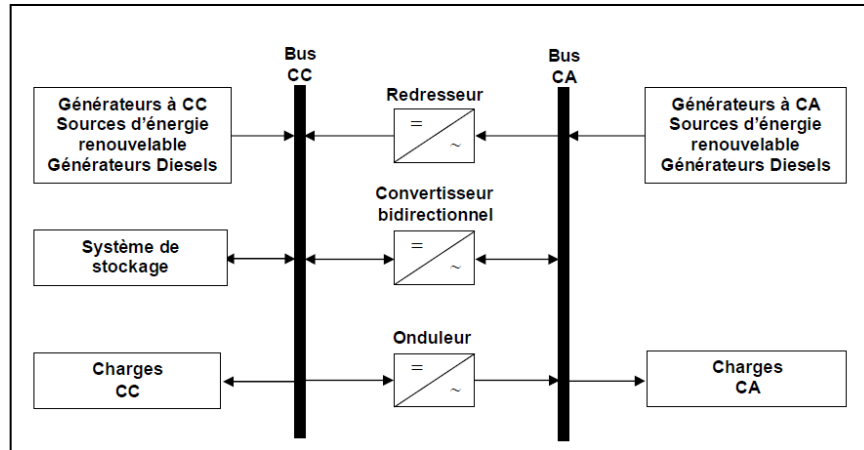


Figure 4-24 - Configuration d'un SHEDAC par bus mixte CC-CA. @Richard Lepage

Devant ces faits avérés, nous n'utiliserons pas cette configuration dans le cadre de notre étude. De même, le bus CC avec système de contrôle centralisé ne rencontre pas les objectifs de cette recherche.

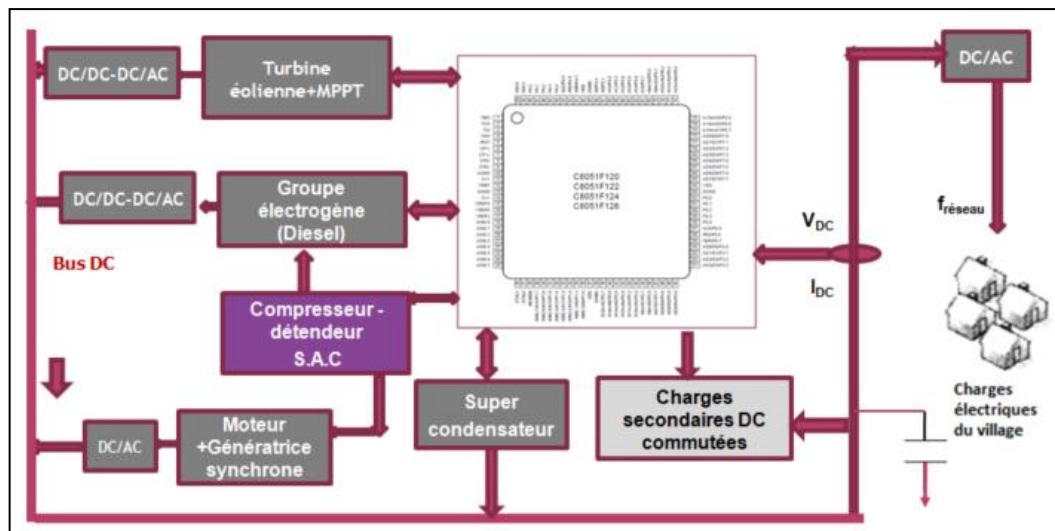


Figure 4-25 - Contrôleur centralisé avec bus CC. @Richard Lepage

À la Figure 4-25, on retrouve un exemple de système centralisé avec bus CC. À chaque élément participant à la production d'énergie est associé un

convertisseur CC/CC ou convertisseur de courant fonctionnant par injection de courant sur le bus CC. De même que pour le bus CC avec contrôle centralisé, nous ne pourrions pas utiliser cette configuration pour les mêmes raisons que pour le bus CA à contrôle centralisé, i.e. qu'il n'y a pas possibilité d'ajouter ou d'enlever une source sans affecter le programme central ou empêcher la réécriture du contrôleur dans son ensemble.

Le choix du bus présente une grande importance dans la conception d'un système de contrôle de l'énergie. Avec une électronique de puissance dont l'évolution a fait baisser les prix et présente une meilleure efficacité qu'il y a 20 ans, on peut imaginer facilement que c'est une voie d'avenir pour les systèmes hybrides de production d'énergie.

Dans cette recherche, nous préconisons, à la place d'un système centralisé, un système distribué multi-agents (SMA) dont chaque composant a son propre gestionnaire. Chaque agent relié au SHEDAC fait acte de sa présence par un numéro ou une adresse WI-FI qui sera enregistrée sur un tableau de donnée de type tableau noir afin de renseigner l'agent contrôleur sur les paramètres qui permettront le contrôle du bus de tension CC.

La Figure 4-26 présente le SHEDAC distribué qui a servi à cette étude. Pour simuler les agents dans Simulink, nous avons utilisé l'outil "Stateflow" qui permet de programmer des états en parallèle donnant l'équivalent d'une communication en parallèle avec d'autres agents. Lors de l'expérimentation, les agents seront

programmés pour envoyer des messages d'une manière asynchrone et possiblement en même temps vers le tableau d'échange. Dans SIMULINK, la programmation par états finis est un ensemble de conditions "IF THEN ELSE" associées avec des modules qui sont conçus en code MATLAB.

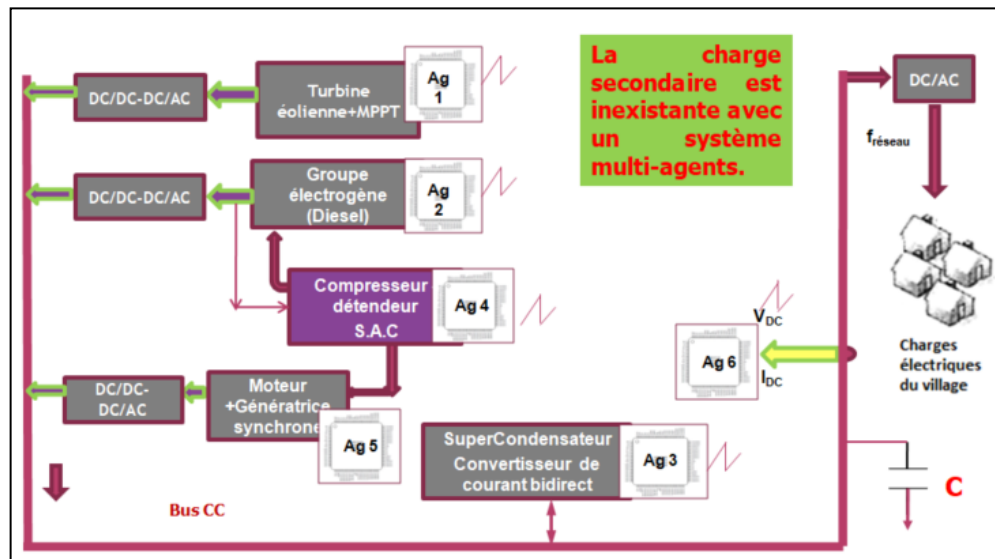


Figure 4-26 - Configuration du système multi-agents (SMA). @Richard Lepage

Dans cette configuration, le bus CC présente l'avantage d'une interconnexion plus simple entre divers composants : éolienne à vitesse variable, charges, sources, éléments de compensation et groupe électrogène, batteries, pile à combustible ainsi que d'autres. La configuration à bus CC distribué présente également l'avantage d'ajouter ou d'enlever un élément sans modification d'aucune sorte sur les autres agents en autant que la programmation permette ce comportement. Il s'agit simplement de programmer les spécificités de la nouvelle source avec l'ajout d'un numéro d'agent qui donnera une participation au système de gestion.

Le condensateur C que l'on retrouve en parallèle sur le bus CC sert à filtrer les variations rapides des convertisseurs de courant. Un autre avantage dans cette configuration de bus CC commun à toute les sources est de pouvoir dimensionner de manière optimale le GED, i.e. qu'il pourra fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des réservoirs d'air comprimé et du banc de supercondensateurs jusqu'à un état de charge se situant entre 75% et 85%. Finalement, deux avantages importants sont l'élimination de la problématique de la puissance réactive que l'on retrouve souvent dans les réseaux à bus CA et l'élimination de la synchronisation en fréquence et en tension en utilisant un STATCOM alimentant les charges primaires.

On retrouve néanmoins quelques désavantages à cette configuration. Par exemple, le rendement du système est affaibli par les pertes d'énergie due au compresseur et aux convertisseurs CC-CC et CA-CC. On retrouve également des pertes au convertisseur CC-CA triphasé dont l'efficacité dépasse rarement 95%. De plus, le GED ne peut alimenter directement la charge, l'onduleur devant être dimensionné pour assurer le pic de charge. Malgré ces désavantages, ceux-ci peuvent être réduits considérablement par l'évolution technologique des composants électroniques permettant de diminuer les pertes augmentant ainsi l'efficacité du système, ce qui nous permet de se concentrer uniquement sur la réalisation d'un contrôle de la gestion de puissance distribuée par des agents logiciels intelligents.

On présente à la Figure 4-27 le schéma descriptif du modèle de la Figure 4-26 qui servira au montage de la simulation. Le contrôle s'effectue sur chacun des convertisseurs CC-CC au moyen d'une entrée CC représentant un rapport cyclique qui contrôle l'arrivée du courant appliquée sur le bus CC. Sur le schéma, il n'est pas mentionné l'alimentation du compresseur pour les réservoirs d'air comprimé car celui-ci s'alimente à même la charge primaire, soit à la sortie du convertisseur FACTS ou STATCOM. Il devient ainsi une charge secondaire au même titre que la charge primaire sauf en ce qui a trait à son importance sur la stabilité du système.

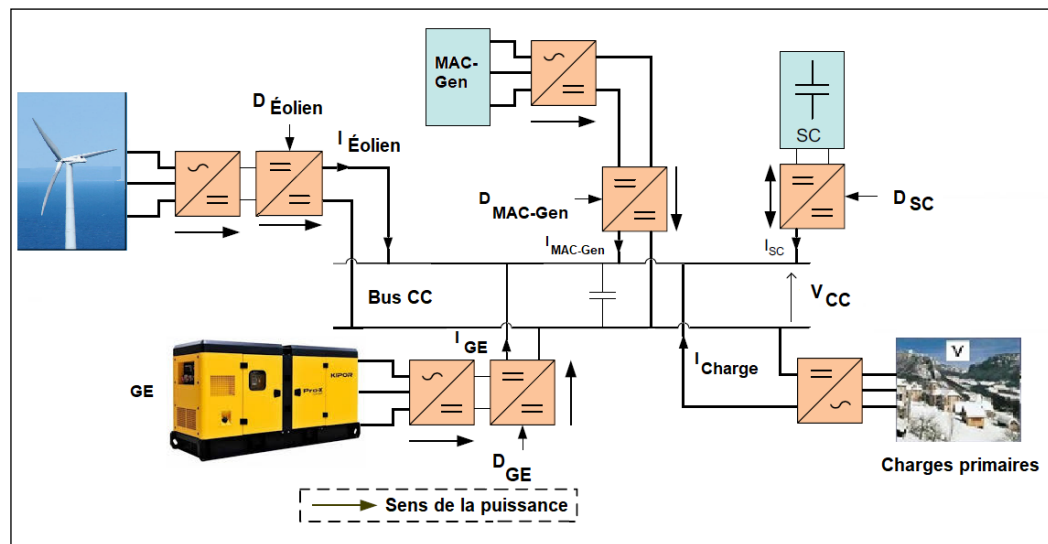


Figure 4-27 Schéma descriptif des convertisseurs sous contrôle SMA. @Richard Lepage

4.2.8 Modélisation des convertisseurs élévateur de tension (Boost converter)

Le convertisseur élévateur de tension est un convertisseur de puissance CC/CC qui permet d'élever la tension de source à une tension de sortie selon un rapport cyclique D . La fonction de transfert du convertisseur est donnée par l'équation suivante:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (4.10)$$

Ce convertisseur est nécessaire pour élever la tension du banc de supercondensateurs à la tension du bus CC. On peut voir la configuration de ce convertisseur à la Figure 4-28. Cette configuration est utilisée dans le cadre de la simulation du SMA lié au système électrique du SHEDAC. On utilisera un composant dédié dont la configuration interne s'apparente à ce schéma.

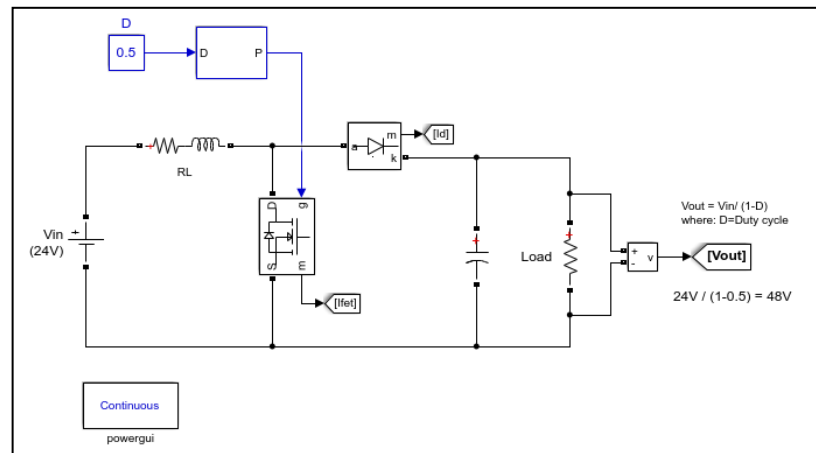


Figure 4-28 – Convertisseur DC-DC élévateur de tension. MathWorks®

Le convertisseur CC-CC est représenté par le module apparaissant à la Figure 4-29.

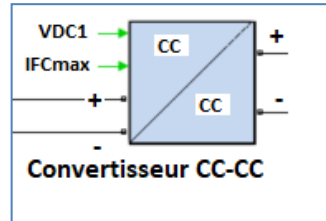


Figure 4-29 - Module SIMSCAPE du convertisseur CC-CC. MathWorks®

Tous les convertisseurs qui seront utilisés lors de la simulation du système distribué seront sous la forme de module, ce qui simplifie ainsi le modèle.

4.2.9 Modélisation des convertisseurs abaisseur de tension (Buck converter)

Le convertisseur abaisseur de tension est un convertisseur de puissance CC-CC qui abaisse la tension de la source à la charge par un paramètre D correspondant à un rapport cyclique (Duty Cycle). Dans le mode de conduction continue (le courant dans l'inductance n'est jamais nul) la fonction de transfert théorique est donnée par la relation suivante:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D \quad (4.11)$$

Dans cet exemple, le convertisseur abaisseur est branché à une charge RC à partir d'une source de 200 V et la fréquence PWM est de 10 kHz. La tension de sortie apparaissant à la charge est de 150 V pour une valeur du rapport cyclique D de 0.75. Dans notre étude, nous avons utilisé cet abaisseur pour les sources

diesels, éoliennes et moteurs-générateur. La modélisation sous forme d'une équation différentielle permet de modéliser ce convertisseur apparaissant à la Figure 4-30.

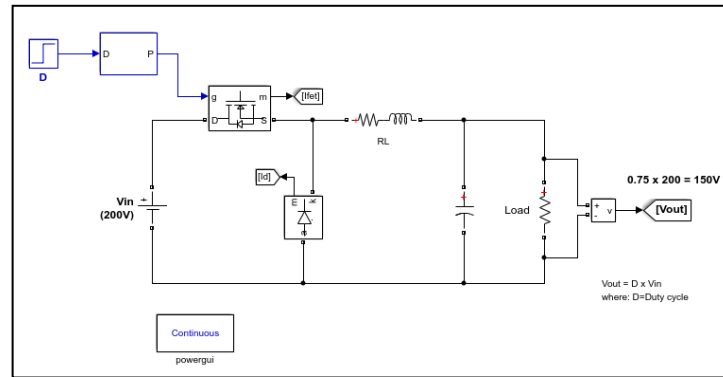


Figure 4-30 – Convertisseur abaisseur de tension. MathWorks®

4.2.10 Modélisation du convertisseur CA-CC

Le convertisseur CA-CC permet de convertir la tension CA en tension CC pour les sources MAC-générateur, éolienne-génératrice et GED. Pour la simulation, il faut alimenter le bus CC à partir des sources CA et il est nécessaire de faire une conversion CA-CC. Le plus simple serait d'utiliser des redresseurs à double alternance mais il faudrait compter sur des pertes d'énergies plus importantes. Les convertisseurs électroniques de haute puissance atteignent maintenant une efficacité qui dépasse 97 %.

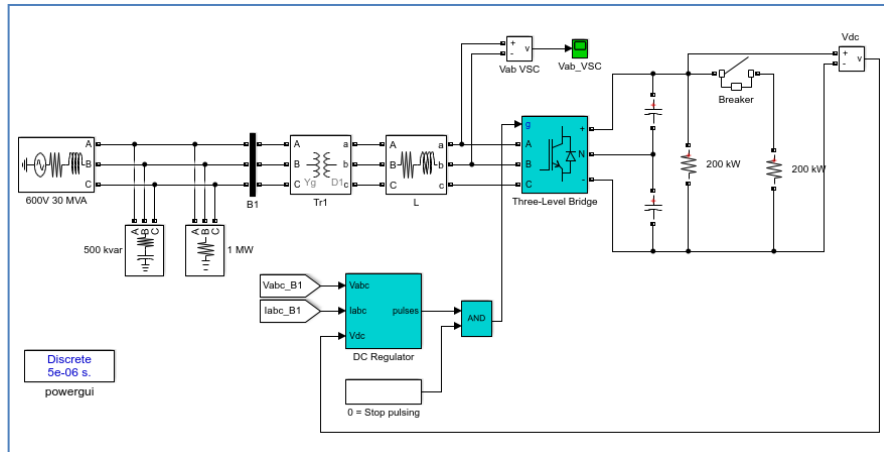


Figure 4-31 - Convertisseur AC/DC. MathWorks®

Dans le schéma de la Figure 4-31, on applique une tension de 600 V à un pont IGBT triphasé dont la sortie produira une tension CC de 500 V. En fermant le contacteur "Breaker", la tension chute momentanément pour ensuite remonter à 500 V au bout de 1.5 cycles. Dans le module représenté par le pont triphasé, celui-ci est contrôlé par 2 Proportionnel-intégrateur (PI) et un modulateur PWM dont la fréquence porteuse est de 1620 Hz. Les deux condensateurs ont comme valeur 75000 μ F. Le pont triphasé maintient le facteur de puissance à l'unité pour la source d'entrée triphasée.

4.2.11 Modélisation du convertisseur CC-AC 60 Hz.

Pour alimenter la charge primaire, on doit disposer d'un convertisseur CC-CA que l'on nomme communément "inverter". Pour modéliser le convertisseur CC-CA, nous disposons de modules qui proviennent de la librairie Simscape "SimPowerSystem". Le module qui servira lors de la simulation est représenté par

la Figure 4-32 en tant que module Simscape. On montre également sa représentation en bloc Simulink à la Figure 4-33.

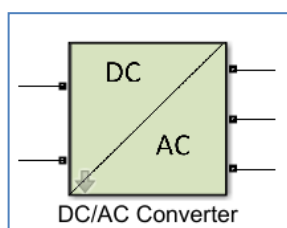


Figure 4-32 - Bloc de simulation du convertisseur CC-AC. MathWorks®

Pour la partie expérimentation avec les microcontrôleurs, il ne sera pas possible d'utiliser des convertisseurs mais on pourra vérifier si le système SMA à l'étude pourra effectuer les opérations recommandées afin de faire le suivi de chacune des sources. La principale source de problèmes qui demandera une attention particulière se situera au niveau de la communication inter-agents. Celle-ci devra être réactive pour éviter des perturbations sur la stabilité du bus CC.

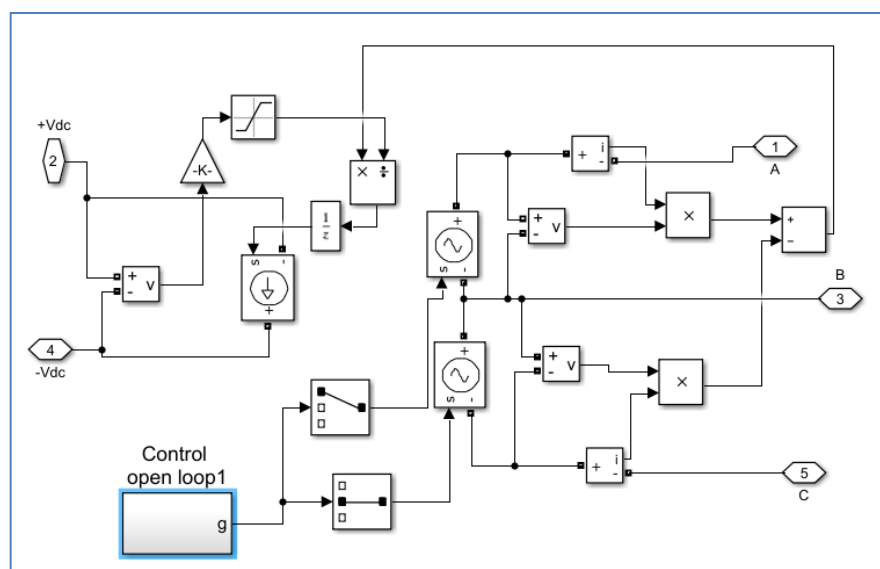


Figure 4-33 - Description du bloc convertisseur CC-CA. MathWorks®

4.2.12 Contrôleur PI pour le contrôle du rapport cyclique

Pour contrôler les convertisseurs, on utilisera des contrôleurs PI pour stabiliser rapidement le courant demandé ou stabiliser la tension du bus CC. La Figure 4-34 présente une vue générale du contrôleur qui enverra la commande d'impulsion vers le convertisseur CA/CC ou CC/CC dépendant de la source si celle-ci délivre du CA ou du CC avant d'être retransformé en CC pour alimenter le bus principal CC. Lors de l'expérimentation, le contrôleur PI sera programmé dans l'agent qui donnera l'information pour contrôler le convertisseur CC/CC ou CA/CC. C'est par la valeur du rapport cyclique que le contrôle se fera sur le convertisseur. La Figure 4-35 montre le schéma simplifié de l'intégration d'un agent dans le système hybride.

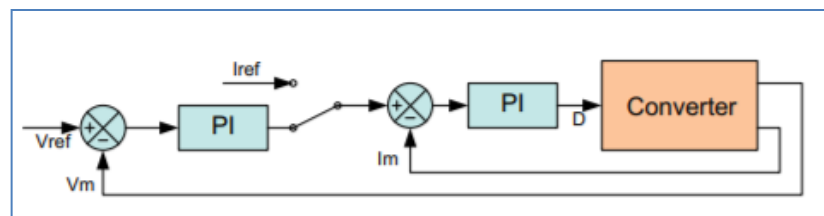


Figure 4-34 - Contrôle PI appliqué au convertisseur CC/CC. [79]

Cet agent peut recevoir ou émettre des messages permettant le passage d'un jeton pour le contrôle du système de gestion. Un seul agent aura la possibilité de contrôler le bilan de puissance de l'ensemble des agents, ainsi le jeton permettra à celui qui en prend possession de contrôler tout le bus CC. L'agent décide si le contrôle se fait par le courant ou la tension dépendant si la mesure de

la tension sera disponible ou non sur le tableau des données. En réalité, la Figure 4-35 illustre le contrôleur PI externe à l'agent mais celui-ci sera inclus comme fonction dans la programmation de l'agent. Il faut noter que l'agent qui prend le contrôle du bus CC prendra en charge la gestion des autres sources tant que celui-ci sera en mesure de rencontrer minimalement la demande. Si ce n'est pas le cas, alors l'agent associé au GED se saisira du jeton et prendra en charge la gestion du bus CC. Si le GED n'est pas en opération, alors le GED sera remis en marche et pendant cette étape, le MAC-GEN et le banc de supercondensateur stabiliseront le bus CC le temps que le GED soit en opération nominale.

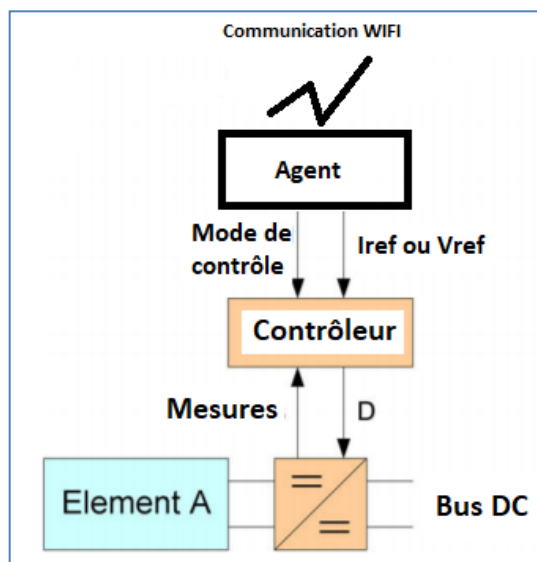


Figure 4-35 - intégration d'un agent dans le système hybride. [79]

4.2.13 Communication inter-agents

La communication entre agents permet le passage du jeton permettant de prendre le contrôle du bus CC. L'agent qui contrôlera le bus CC émettra également

des ordres à chacun des agents disponibles pour augmenter ou diminuer le courant du bus CC selon la disponibilité des ressources. Comme la stratégie principale qui est centrale au système de gestion d'énergie vise à minimiser autant que possible la sollicitation du GED, on se retrouve alors avec un problème d'optimisation selon la disponibilité des sources. S'il y a impossibilité de rencontrer le courant demandé à la charge pour toutes les sources sauf pour le GED, alors le GED sera minimalement sollicité (environ 30% de la charge) pour compenser le manque de disponibilité des sources. On discutera plus loin de la stratégie qui sera adopté avec le SMA. On présente à la Figure 4-36 un exemple de communication entre l'agent qui s'occupe du convertisseur associé au banc de supercondensateur et l'agent qui s'occupe du convertisseur CC/CC du GED.

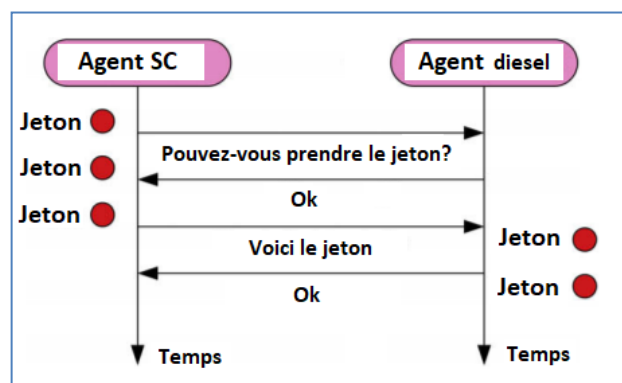


Figure 4-36 - Exemple de communication inter-agents. @Richard Lepage

Cet exemple démontre que lorsque l'agent à qui on demande de prendre le jeton est assuré de sa disponibilité, alors celui-ci acceptera de prendre le jeton et prendra du même coup la gestion du bus CC. La Figure 4-37 est le diagramme

d'état qui sera implémenté dans "Stateflow" montrant la programmation de la partie jeton et la partie sans jeton pour chacun des agents.

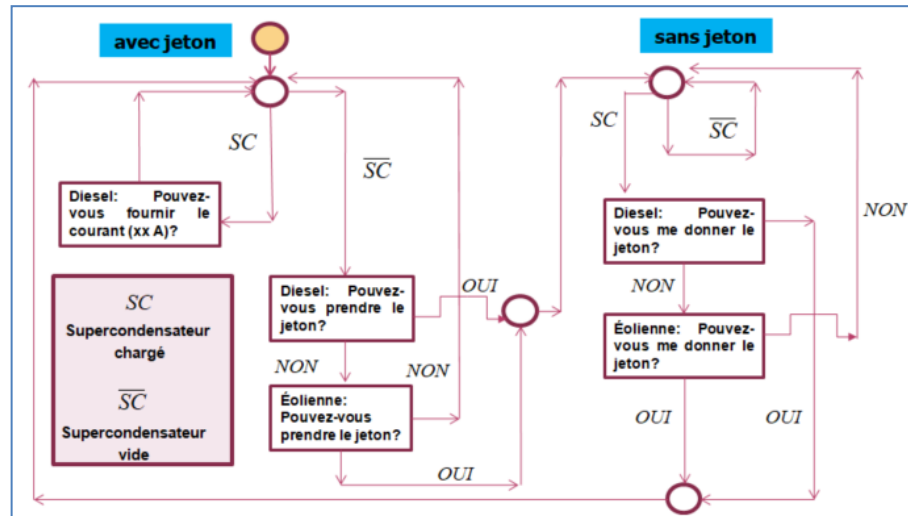


Figure 4-37 - Algorithme de passage du jeton vers un autre agent. @Richard Lepage

Pour la partie intitulée "avec jeton", tant que l'agent SC est capable de fournir le courant demandé par l'agent Diesel, l'agent SC gardera le jeton. Si l'agent SC considère que l'état de charge (SOC) de sa source (son banc de supercondensateur) est en dessous d'un certain seuil (caractérisé par non SC) , il essaiera de se départir du jeton en demandant à l'agent Diesel de prendre le jeton. Dans le cas contraire, l'agent SC demandera à un autre agent la même chose jusqu'à ce qu'un agent accepte de prendre le jeton. Si la ressource de l'agent SC est disponible et qu'il demande à prendre le jeton, il en fera la demande dans la partie du programme intitulée "sans jeton" sinon il fera partie des sources secondaires pouvant fournir une partie de la demande qui sera moindre que le

courant demandé. Il faut se souvenir que le détenteur du jeton contrôle la tension du bus CC.

4.2.14 Modélisation du système électrique du SHEDAC

Pour modéliser chacun des éléments du système hybride, nous utilisons la loi des tensions de Kirchhoff appliquée sur chacun des convertisseurs CC-CC. Les convertisseurs ont été moyennés pour simplifier les équations. L'équation 4.12 représente l'équation différentielle du convertisseur hacheur série (Buck Converter) attaché au moteur diesel-alternateur.

$$L \frac{dI_{out}}{dt} = D_{diesel} V_{in} - V_{out} - R_L I_{out} \quad (4.12)$$

Pour le convertisseur hacheur série (Buck converter) attaché à l'éolienne, nous avons l'équation 4.13 qui modélise son courant d'arrivée.

$$L \frac{dI_{out}}{dt} = D_{Éolien} V_{in} - V_{out} - R_L I_{out} \quad (4.13)$$

Pour le convertisseur hacheur série (Buck converter) attaché au mac-générateur, sa modélisation est donnée par l'équation 4.14.

$$L \frac{dI_{out}}{dt} = D_{MotGen} V_{in} - V_{out} - R_L I_{out} \quad (4.14)$$

Cette équation est de la même forme que les équations précédentes. Pour le convertisseur bidirectionnel lié au banc de supercondensateurs, nous avons l'équation 4.15 qui modélise le courant fourni par le banc de supercondensateur.

$$L \frac{dI_{low}}{dt} = V_{low} - D_{SC} V_{high} - R_L I_{low} \quad (4.15)$$

Lors de l'ajout de d'autres sources, il n'y aura qu'à inclure cette équation avec quelques modifications mineures pour que l'agent de cette source puisse faire la gestion de son courant d'amené au bus CC. Nous reparlerons plus loin dans la section dédiée à l'expérimentation de la méthode permettant d'ajouter un nouvel élément au système hybride sans affecter les autres éléments et ainsi le système entier. C'est la possibilité d'ajouter un nouveau composant à chaud sans perturber le système en marche qui a prévalu sur le choix de la méthode SMA et sur un bus CC avec contrôle par convertisseur.

Pour la gestion des variations rapides de tensions du bus CC, la tension instantanée aux bornes du banc de supercondensateurs est construite selon la forme standard de l'équation différentielle donnant la tension aux bornes d'un condensateur, soit la forme

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int Idt \quad (4.16)$$

Cette tension dépend du condensateur qui est branché sur le réseau DC et qui permet de construire l'équation donnant la tension CC du réseau. Cette configuration de contrôle incluant le rapport cyclique "Duty Cycle" permet de contrôler le flux de puissance du convertisseur. L'équation est de la forme suivante:

$$V_{SC} = \frac{1}{C_{SC}} \int \left(\frac{-I_{SC}}{D_{SC}} \right) dt \quad (4.17)$$

L'état de charge (SOC) du supercondensateur s'écrit comme suit

$$SOC_{SC} = \frac{V_{SC}^2}{V_{SC \text{ nominal}}^2} \quad (4.18)$$

Finalement, une fois les éléments modélisés, le calcul de la tension sur le bus CC est donné par la loi des tensions de Kirchhoff, soit

$$V_{DC} = \frac{1}{C_{DC}} \left(\int I_{SC} + I_{Diésel} + I_{Éolienne} + I_{MotGen} + I_{Load} \right) dt \quad (4.19)$$

Cette loi est de la même forme que celle apparaissant aux bornes d'un condensateur que l'on retrouve sur la ligne CC du bus. Ce condensateur adouci les variations rapides de tension car c'est la variation du courant de chacun des convertisseurs qui fait varier la tension du bus CC. Chaque convertisseur participe à la régulation de tension sur le bus CC par le truchement du signal de commande à rapport cyclique (Duty Cycle) qui est appliqué à chacun des convertisseurs selon la disponibilité des sources.

Le compresseur à air comprimé est contrôlé par un agent qui surveille constamment l'état de charge du réservoir et l'état de fonctionnement du GED. C'est uniquement lorsque l'agent reçoit la consigne indiquant que le GED est en fonction, que l'agent compresseur envoie la commande d'ouvrir la valve de débit du réservoir; la valve étant configurée pour une pression de 2,5 bars. Lorsque l'état de charge (SOC_{res}) du réservoir atteint un seuil minimal, l'agent compresseur démarre le compresseur pour remplir le réservoir. Lorsque le réservoir est plein, l'agent envoie l'ordre d'arrêter le compresseur et envoie le message au tableau noir que le compresseur est plein. Le remplissage des réservoirs se fera lorsque la ressource éolienne sera en surplus ou lorsque le GED sera en opération à 30% de la charge. Tel que discuté auparavant, le fait d'augmenter la charge lorsque le GED est à 30% de sa charge nominale permettra une détérioration moindre ainsi que des coûts moindres de maintenance.

Lorsque le GED est en fonction, celui-ci fait partie de la fonction coût du système dont l'objectif est de diminuer la consommation d'essence du moteur diesel. L'élément MAC-générateur est lié à un agent pour la gestion et l'activation de la valve de débit d'air comprimé. L'algorithme contrôlant l'injection d'air dans les cylindres du diesel est indépendant et représente un autre programme qui sera appelé lorsque la pression dans les réservoirs atteindra un seuil donné.

4.2.15 Stratégie de contrôle du SHEDAC par SMA.

Dans cette section, nous décrivons la stratégie de contrôle qui permettra de rencontrer les objectifs énumérés dans ce travail de recherche. Par la suite, cette stratégie sera implémentée dans SIMULINK en utilisant un contrôle par machine à états finis. Sans vouloir se répéter, le modèle "StateFlow" de SIMULINK permet de concevoir des systèmes de communication agissant en parallèle. C'est pour cette raison que cette plateforme de simulation a été utilisé pour la conception du système de gestion de puissance.

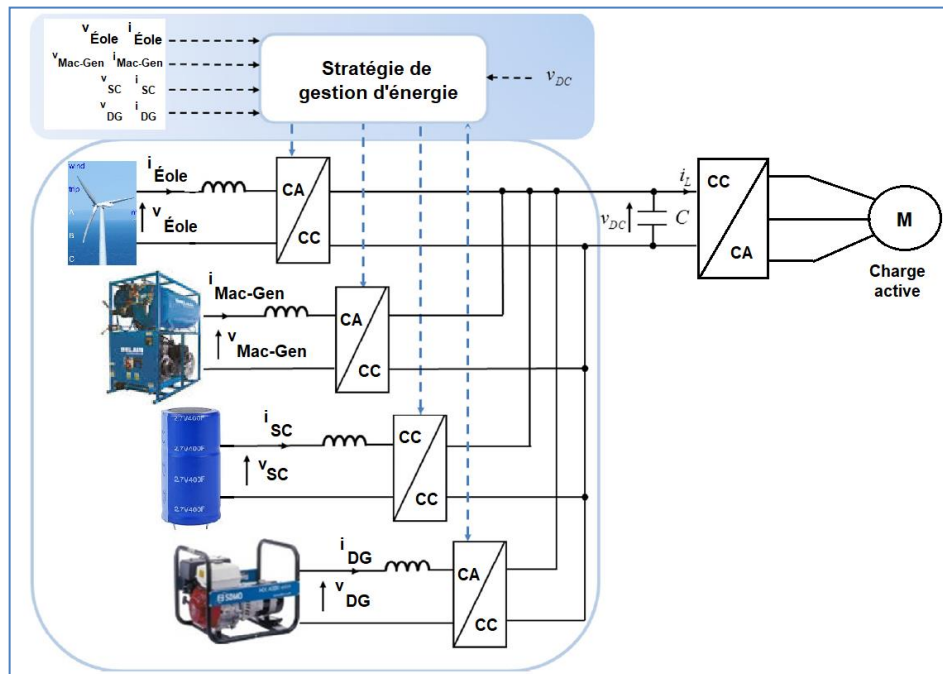


Figure 4-38 - Gestion d'énergie par contrôle des convertisseurs. @Richard Lepage

La stratégie de commande consiste à utiliser un agent pour chacune des sources, l'un des agents prend en charge un jeton lui permettant de contrôler la tension du bus CC. Le GED étant la source primaire du système, il est le principal

gestionnaire du jeton. Ce n'est que lorsqu'un agent demande le jeton que l'agent GED se départit du jeton. Voici, en résumé, ce qui se passera lors de la simulation : une mesure du courant et de la tension est effectuée pour chacune des sources. L'agent lié au GED demandera à se départir de son jeton car c'est la source primaire et c'est à lui seul que le jeton ira si les sources secondaires sont incapables dans l'ensemble de soutenir le bus CC et donc le réseau. L'optimisation de la stratégie se fera à la demande de l'agent contrôlant le bus. Celui-ci enverra une commande à toutes les sources participantes en leur demandant de fournir le courant optimal. Pour ce faire, chaque source surveillera sa tension lors de l'ajout de courant. Par exemple, si la source éolienne applique une légère augmentation du signal à rapport cyclique de son convertisseur et que la tension diminue, alors l'agent rabaissera la valeur du rapport cyclique jusqu'à ce que la tension ré-augmente pour atteindre le niveau de tension du bus CC dont la référence est constante, soit 270 V CC. Ce comportement sera programmé pour chacune des sources.

4.2.16 Simulation du contrôleur proportionnel-intégral du convertisseur.

La simulation de l'ensemble permet de vérifier si le comportement global du contrôle SMA rencontre bien les objectifs de l'étude. La Figure 4-39 représente le contrôle PI qui permet d'actionner le module de rapport cyclique qui sera présenté au convertisseur afin d'atteindre la tension de référence ou le courant de référence selon ce qui aura été décidé par l'agent en cours. Le fait de disposer de deux

capteurs est lié à une mesure de sécurité car si l'un des capteurs ne peut fournir la mesure, l'autre en aura la possibilité, le choix étant déterminé par l'agent associé à la source.

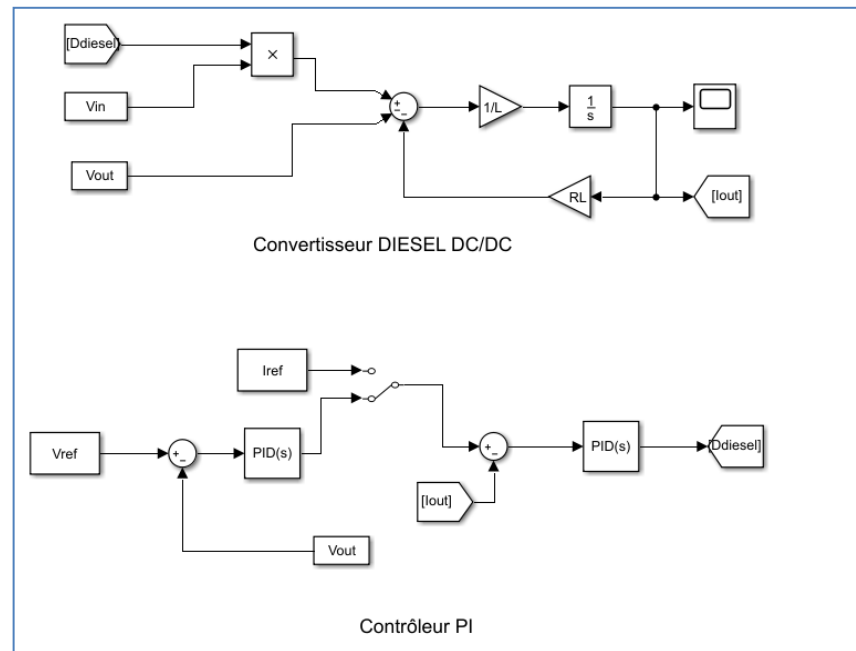


Figure 4-39 - Contrôleur PI pour le signal à rapport cyclique "Duty Cycle". @Richard Lepage

La Figure 4-40 donne un aperçu du diagramme d'états finis correspondant à la communication inter-agent. On ne voit que la partie de communication entre l'agent SC et l'agent diesel mais cela donne un aperçu de la complexité du processus. Si l'agent diesel n'accepte pas le jeton, le signal sortant se dirige vers un autre agent. Le transfert devra se faire à l'intérieur d'une fenêtre temporelle assez courte car pendant cette période, c'est le banc de supercondensateur qui maintiendra la tension du bus en injectant plus de courant sur le bus CC.

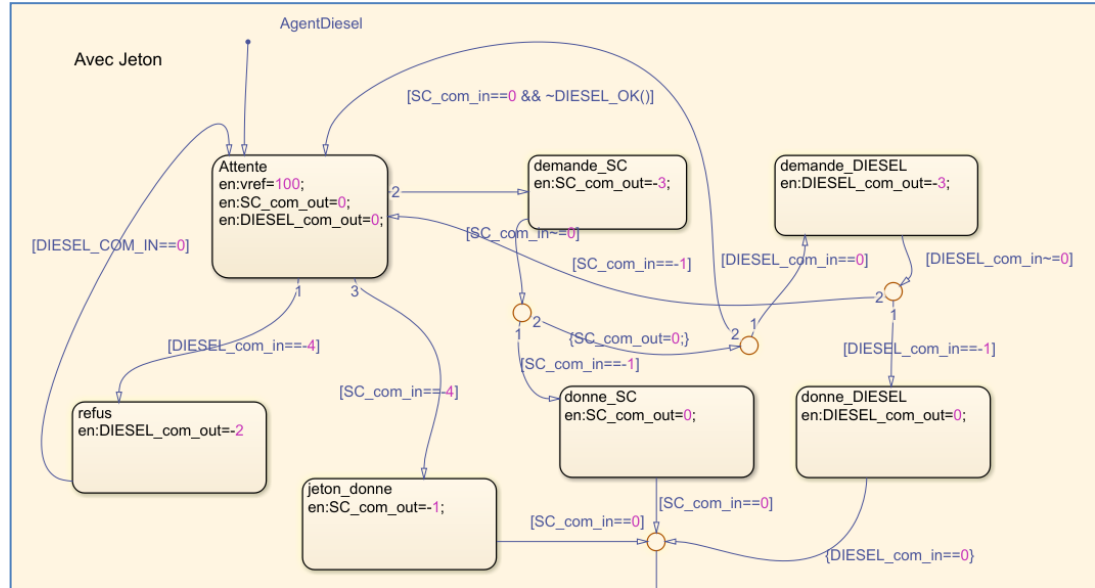


Figure 4-40 - Une partie du module de communication entre l'élément DIESEL et l'élément SC (supercondensateur). @Richard Lepage

Ce diagramme d'état provient de l'algorithme de passage du jeton de contrôle dont le flux de données apparaît à la Figure 4-37. Il est quelque peu différent de celui de la Figure 4-41 parce qu'il est conçu pour une activité moins générale. L'algorithme généralisé permet une lecture des agents branchés au système. Lorsqu'un nouvel agent s'insère dans le système, par exemple lors de l'ajout d'une nouvelle source, l'algorithme généralisé n'aura pas à être modifié, ce qui implique une insertion à chaud qui ne perturbera pas la stabilité du système. Lors du débranchement d'une source, l'algorithme recalcule la distribution de puissance afin de maintenir la tension stable sur le bus CC et ainsi rencontrer la charge en tout temps. Le banc de supercondensateur se mettra dans l'un des modes d'opération pour stabiliser les fluctuations occasionnées par les

perturbations de l'éolienne ou des variations de tensions intempestives sur le bus CC.

L'avantage de ce type de programmation fait en sorte que cet algorithme sera identique pour chacune des sources sauf pour le cas du GED dont l'algorithme sera quelque peu différent car celui-ci étant la source primaire qui évitera l'écroulement du réseau.

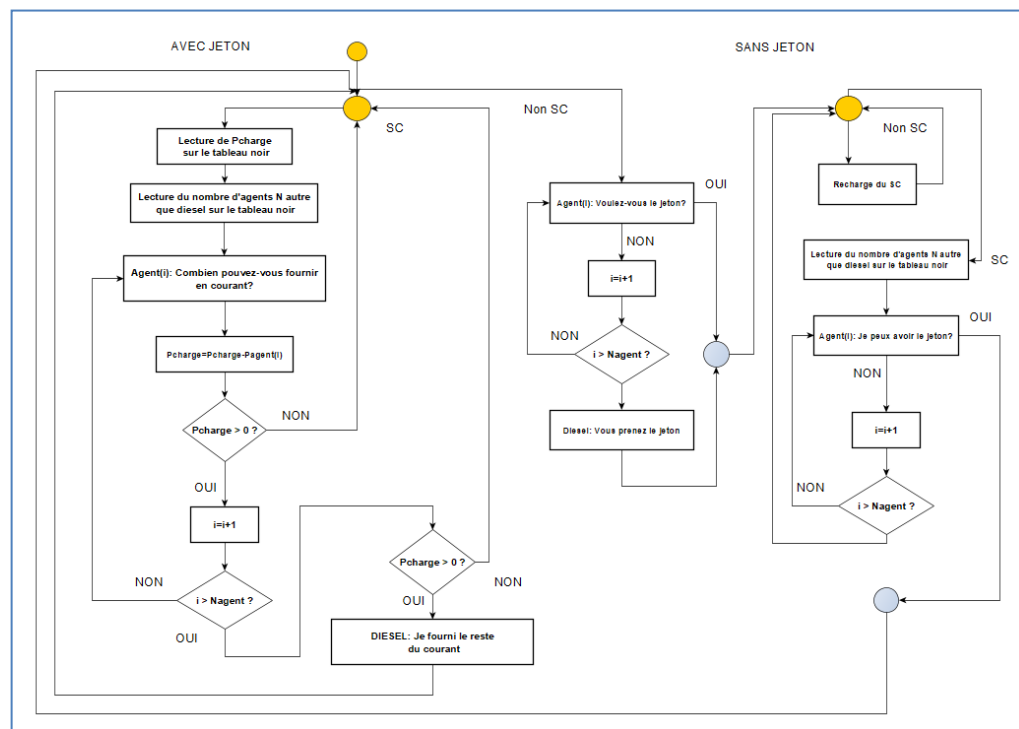


Figure 4-41 - Algorithme généralisé de prise de jeton par l'agent SC. @Richard Lepage

On peut voir cet algorithme à la Figure 4-42. Le principal objectif de l'agent GED est de se délester le plus souvent de son jeton de contrôle pour permettre à l'agent s'occupant de la source GED d'être le moins sollicité. Dans le cas où le jeton appartient à un autre agent, il y aura possibilité de fermer le GED si le SOCac

(l'état de charge du réservoir d'air comprimé) et le SOCsc (état de charge du banc de supercondensateurs) sont à des seuils de sécurité permettant cette fermeture. L'état de charge de ces deux sources en plus de la source éolienne, doit rencontrer la puissance nominale du réseau pendant un minimum de 30 minutes. Si la source éolienne est inactive, on devra activer la communication du bus CC avec le convertisseur CC-CC du GED sans que celui-ci ait eu le temps de se réchauffer convenablement. Passez le délai des 30 minutes, le GED aura eu le temps nécessaire pour se remettre en marche et s'occupera maintenant de remettre en état le SOCac et le SOCsc si la ressource éolienne est insuffisante.

Lorsque l'agent diesel obtient le jeton, cela signifie que l'ensemble des sources est incapable de rencontrer la demande. L'agent diesel doit alors vérifier si le GED est à l'arrêt. Si c'est le cas, l'agent diesel demandera à l'agent SC et à l'agent MAC-Gen de prendre la relève le moment où le GED atteint sa stabilité. À cette étape, l'agent diesel prend la relève et se met en attente d'un délestage de jeton.

Lorsque le GED est en activité, l'agent GED vérifie si le SOCac est à un seuil recommandé pour activer le mode suralimentation. Si ce n'est pas le cas, en attente de celui-ci, le GED augmentera sa charge en vérifiant si SOCsc est à un seuil recommandé, soit au-delà de 30 %. Le fait d'être sollicité durant cette période diminuera l'encrassement des cylindres.

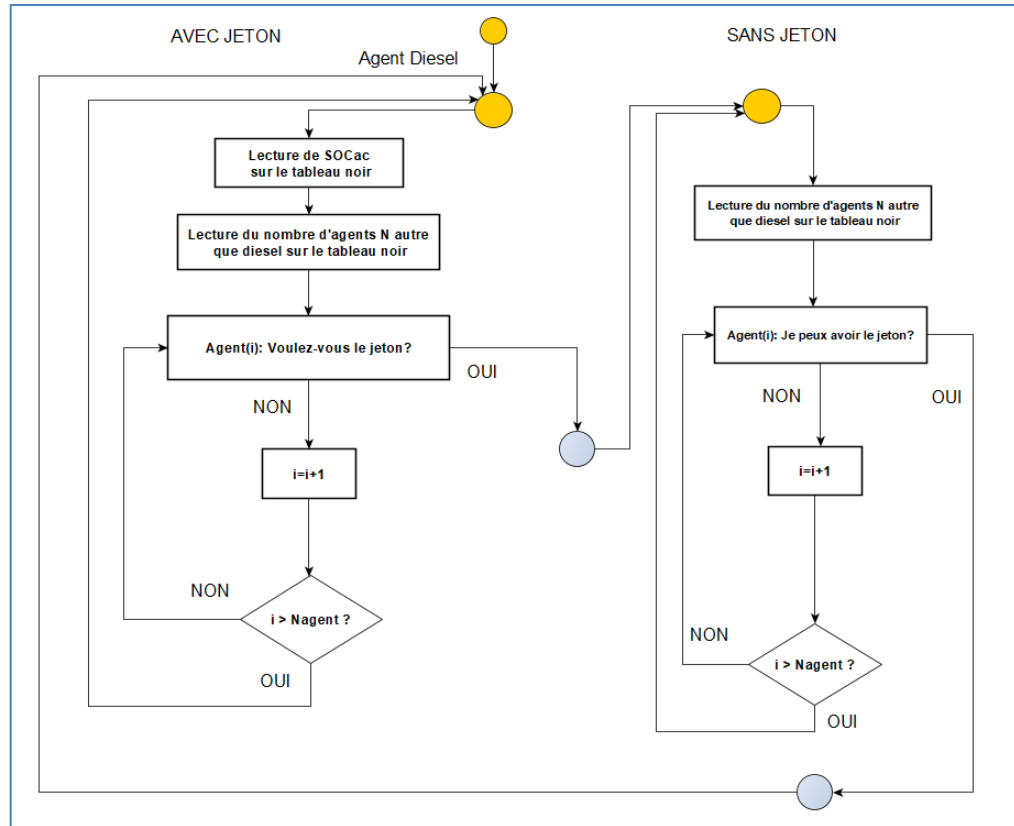


Figure 4-42 - Algorithme de lestage de jeton par l'agent GED. @Richard Lepage

Concernant la partie expérimentale, le logiciel Matlab contient les outils nécessaires pour traduire ces algorithmes dans un langage approprié à la carte microcontrôleur, le langage utilisé étant le langage C. Dans notre cas, cela ne sera pas possible car il faudra convertir le code C en code Python si nous voulons une implémentation qui prend en charge la plateforme de communication inter-agents SPADE car celle-ci est écrite en code python. Ce diagramme pourrait certainement être traduit dans un langage informatique traditionnel tel que C++, Java ou autre mais, à notre connaissance, nous n'avons rien trouvé à ce sujet. Ce diagramme n'est rien d'autre qu'une suite de décision équivalente à une série de "IF THEN

ELSE" et peut se convertir à la main et donner une forme telle que celle présentée à la Figure 3-18 qui est donné en exemple.

À partir du modèle centralisé de la Figure 4-50, nous avons construit notre modèle de simulation du SHEDAC avec le contrôle SMA distribué. Nous avons utilisé diverses parties fonctionnelles qui ont été rattachés ensemble pour former le SHEDAC avec son contrôle SMA.

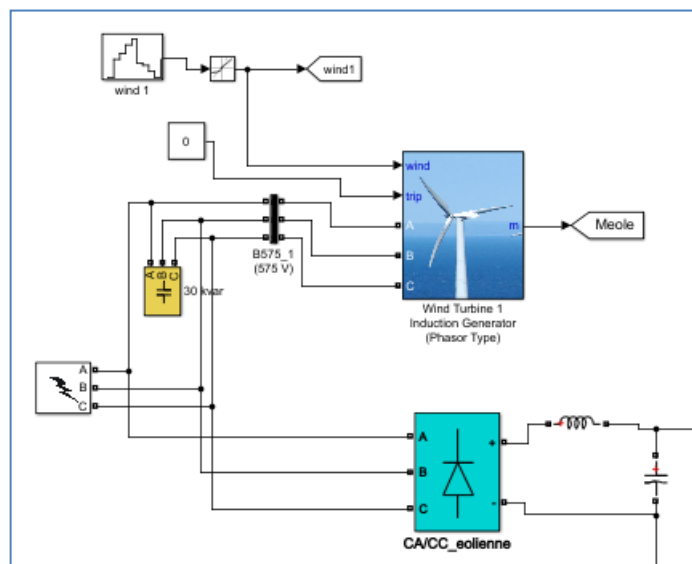
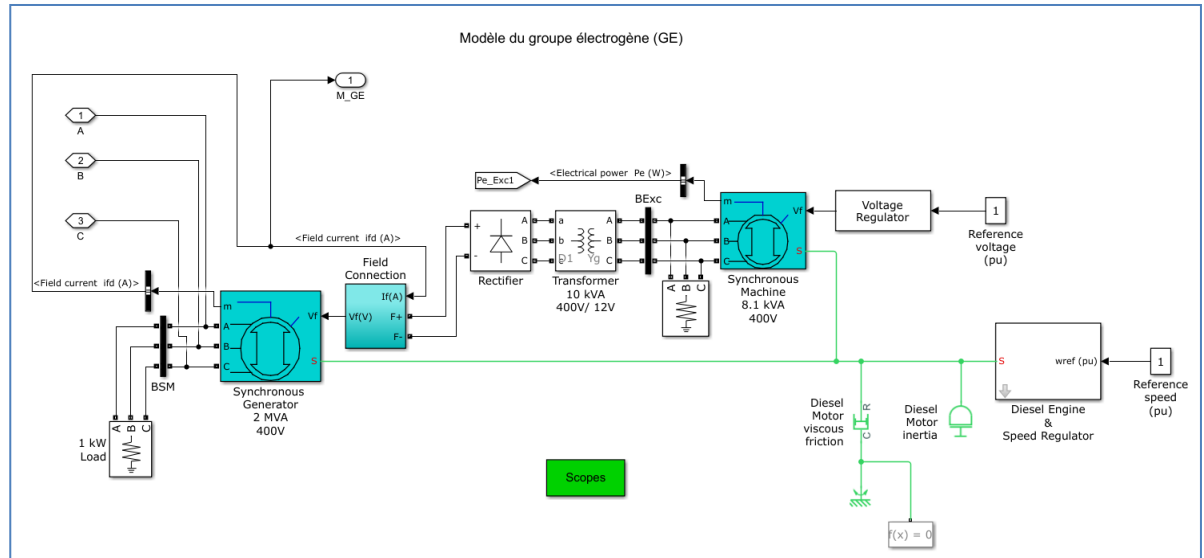


Figure 4-43 - Modèle de l'éolienne avec convertisseur CA-CC. MathWorks®

La Figure 4-43 présente la partie concernant l'éolienne qui transmet une tension continue fixe de 480 V indépendamment de la vitesse de la turbine tandis que le modèle du GED est donné à la Figure 4-44. La sortie du convertisseur CC-CC sera maintenue à 270 volts lors de la simulation.



Le modèle du GED est représenté par un générateur synchrone dont l'alimentation CC est maintenue constante avec un asservissement, d'où la prise de mesure de la tension de sortie qui est dirigée vers un contrôleur PI. Lors de la simulation, le programme ne s'occupera pas de fermer le GED, ce qui sera réalisé lors de l'étape ultérieure de validation expérimentale. La Figure 4-45 décrit la partie concernant le MAC-Générateur. Le contrôle du compresseur à air comprimé est lié à l'agent diesel. La vérification se fait au moyen d'un calcul lié au temps d'ouverture de la valve de débit d'air. Les paramètres concernant la partie mécanique activant la rotation de la génératrice ont été conservés comme pour le GED. Cela ne modifiera en rien le fonctionnement de la simulation.

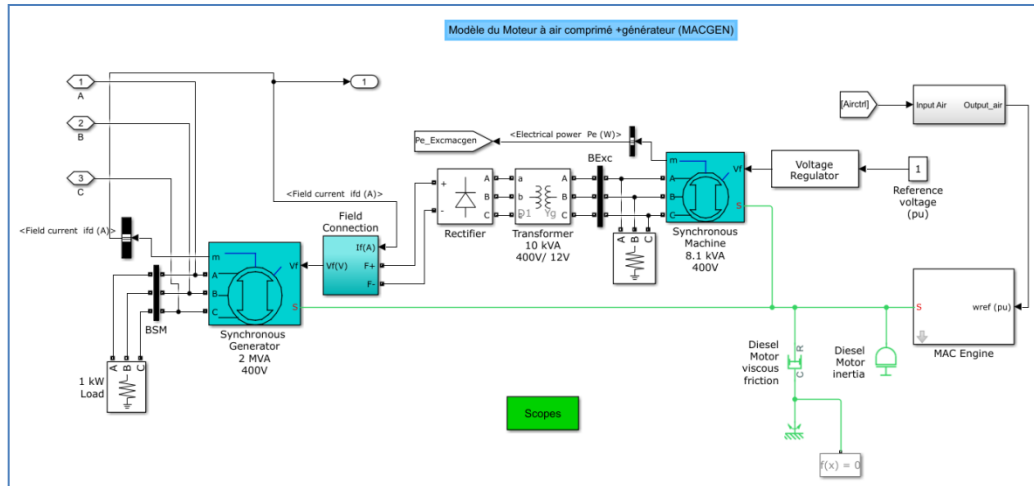


Figure 4-45 - Description du module MAC-Générateur sous Simscape. MathWorks®

Pour combiner toutes les sources en un système hybride avec bus commun CC, il a été possible d'utiliser un système hybride existant dont les sources comprenaient une cellule à combustible, un banc de supercondensateurs et une batterie au lithium-ion. C'est à partir de ce modèle que nous avons développé une simulation associée à un SMA pour contrôler le bus CC afin de garder constant la tension du bus CC indépendamment de la charge appliquée au réseau.

4.3 Résultats de la simulation

Avant de simuler un modèle du système électrique du SHEDAC, il fallait vérifier si le concept du SMA était valide dans son ensemble. La simulation a permis de valider un concept existant selon l'idée que nous pourrions rencontrer en tout temps la charge primaire en ajustant la sortie en courant des convertisseurs CC-CC ou CA-CC selon une stratégie de commande agissant sur la valeur du rapport cyclique contrôlant la demande en courant du bus CC selon la

disponibilité des sources constituant le système. Nous avons adapté le système de manière à intégrer le SHEDAC avec ce type de contrôle par SMA.

La partie correspondante au contrôle de l'injection d'air comprimé dans les cylindres du diesel lorsque le GED est en opération est indépendante de ce contrôle, c'est l'agent diesel qui s'occupe de cette opération, de même que pour la surveillance du SOCac. Lorsque le volume d'air du réservoir est au-delà d'un certain seuil ($>50\%$), l'agent diesel ouvre la valve pour suralimenter le GED. Les essais de simulation qui ont été effectués avec les mêmes paramètres ont permis de vérifier que le système existant fonctionnait sans problème apparent. Cela constitua une base sur laquelle nous pouvions construire un SMA simulé avec STATEFLOW. Selon une partie de l'algorithme documenté dans l'article de Lagorse et al [56, 79], nous avons été en mesure d'obtenir des résultats très encourageant pour les mêmes signaux validant ainsi le concept du SMA pour le contrôle de gestion de puissance. Par le fait même, cela validait l'article [79] concernant cette méthode de contrôle. Il a été assez laborieux d'obtenir les mêmes résultats que Lagorse et al., car il fallut compléter avec cet article le reste des procédures permettant de valider le concept. Il fallait absolument obtenir les mêmes résultats que ceux résultant de la simulation de Lagorse et al. avant d'aller plus loin dans cette recherche. Selon les graphiques de la simulation, il est intéressant de constater la similitude avec les graphiques obtenus de Lagorse et al. confirmant le bon fonctionnement de l'algorithme de gestion de puissance.

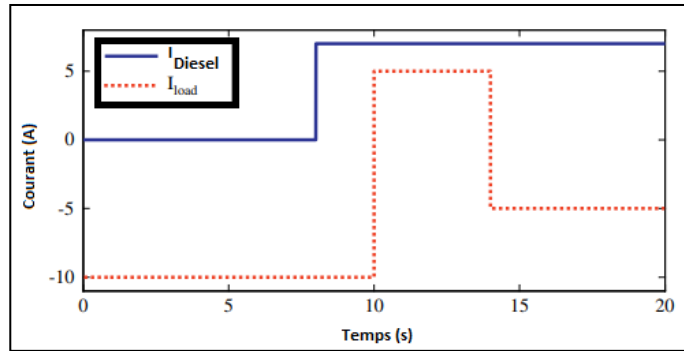


Figure 4-46 - Évolution du courant fourni par le diesel pour une charge donnée.

@Richard Lepage

L'implémentation de l'état des réservoirs pour le MAC-générateur se trouve dans l'algorithme de l'agent MAC-Gen tandis que le contrôle de l'admission d'air dans les cylindres du diesel est inclus dans l'algorithme de l'agent diesel.

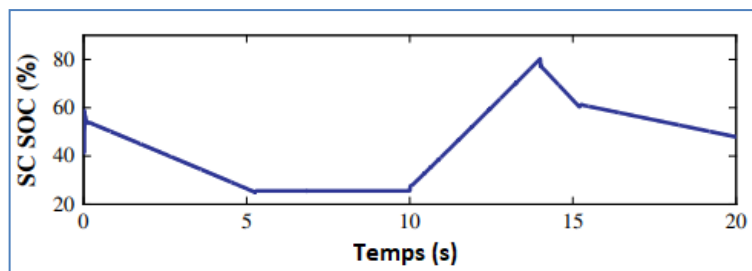


Figure 4-47 - État de charge du supercondensateur. @Richard Lepage

On montre que le SOCsc (Figure 4-47) se recharge après avoir atteint 30 % de la charge. Le SOCac se recharge également au-delà de 30 %. Une modification sur l'état de charge entraînerait peut-être une meilleure dynamique du système, ce qu'il faudra vérifier avec l'expérimentation en temps réel avec les cartes de contrôle. Après de nombreux essais, nous constatons que les algorithmes réagissent telles que souhaités selon l'allure des graphiques.

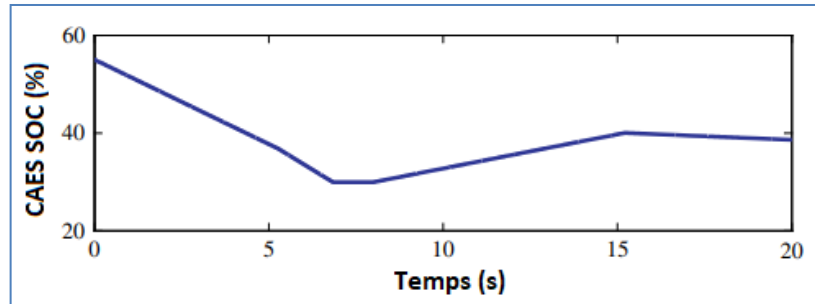


Figure 4-48 - État de charge du réservoir air comprimé du moteur-générateur.

@Richard Lepage

Entre 0 et 5 secondes, la charge du supercondensateur passe de 55 % à 30 % (Figure 4-47) et l'agent SC passe le jeton à un autre agent, ce que l'on peut voir sur la Figure 4-49 par le pic passant de 100 V à 97 V environ. On voit le même phénomène se produire pour le SOC du CAES vers 7 secondes (Figure 4-48), lorsque l'agent CAES passe son jeton à un autre.

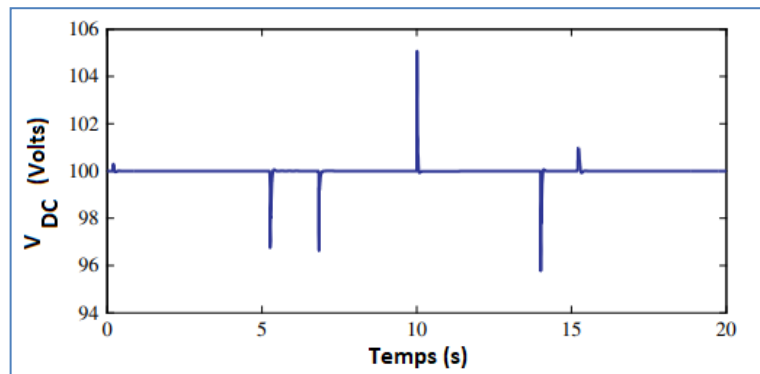


Figure 4-49 - Évolution de la tension du réseau CC. @Richard Lepage

4.4 Comparaison du SMA avec un système hybride existant

Pour concevoir un système de gestion de puissance, il nous fallait un modèle existant fonctionnant sous Simulink. Le modèle suivant fut adopté et servira comme modèle test pour valider le SMA. Nous avons essayé de comparer notre modèle avec la simulation d'un système hybride sous MATLAB/Simulink [93] dont la commande est centralisée. La Figure 4-50 est la schématisation sous Simulink d'un système hybride avec source d'énergie provenant d'une pile à combustible hybridée avec un banc de batteries lithium-ion suivi d'un banc de supercondensateur. Ce système sert comme alimentation d'urgence en avionique. Les caractéristiques du système hybride sont les suivantes:

- Une pile à combustible fournissant une puissance crête de 12.5 kW, 30-60 V avec une puissance nominale de 10 kW;
- Un banc de piles lithium-ions de 48 V, 40 Ah;
- Un banc de supercondensateur (six cellules de 48.6 V, 94 F en série) pour une tension totale de 291.6 V à 15.6 Farads;
- Un convertisseur CC-CC élévateur de tension pour la pile à combustible de 12.5 kW avec régulation de la tension de sortie et limiteur de courant;
- Deux (2) convertisseurs CC-CC, un élévateur de tension de 4 kW (Alimentation du bus CC par la batterie) et un abaisseur de tension de 1.2 kW (Pour recharger le bloc de piles lithium-ions);
- Un convertisseur CC-CA de 15 kVA, 270 V CC à l'entrée, 200 V AC, 400 Hz;

- Une charge triphasée avec puissance apparente variable et régulation du facteur de puissance;
- Une charge résistive secondaire de 15 kW pour éviter la surcharge du bloc de piles lithium-ions et du supercondensateur.

La simulation du modèle comparatif s'effectue selon 5 types de stratégies qui ont été implémentés dans le module de gestion d'énergies. Nous n'en vérifions qu'une soit celle qui correspond à un contrôle par machine à états finis, toutes les autres stratégies donnant les mêmes courbes pour les paramètres mesurés sauf en ce qui concerne la consommation d'hydrogène pour la pile à combustible. On retrouve les stratégies suivantes:

- Une stratégie de contrôle par machine à états finis,
- Une stratégie de contrôle par un PI classique,
- Une stratégie de contrôle par machine à états finis avec découplage en fréquence,
- La stratégie ECMS (la stratégie de minimisation de la consommation équivalente),
- La stratégie de maximisation de l'énergie externe (EEMS).

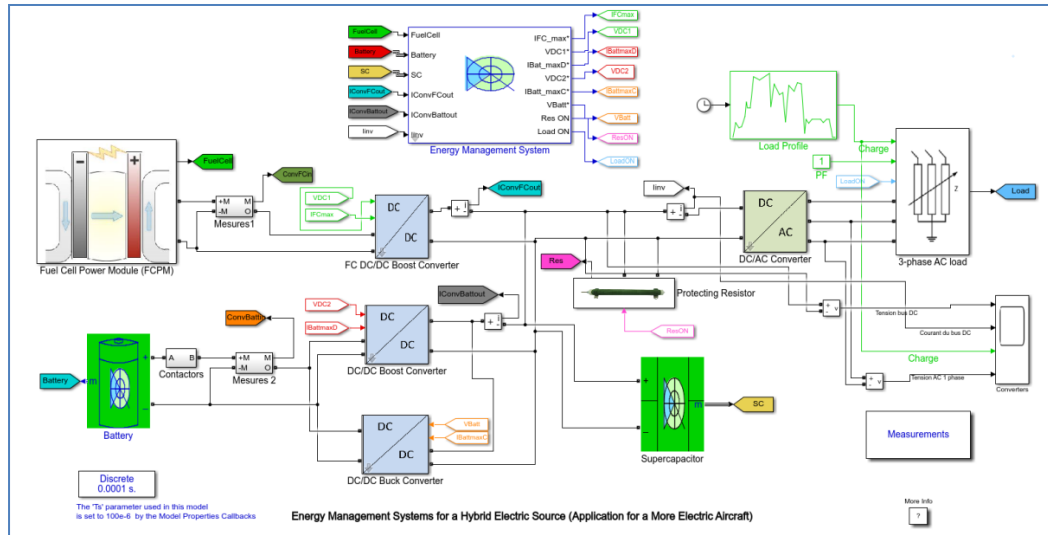


Figure 4-50 - Schéma bloc Matlab/Simulink de référence pour la validation du SMA.

[93]

Pour valider le bon fonctionnement de la simulation avec le SMA, nous avons essayé de modifier le système existant sous SIMSCAPE afin de représenter le système SMA du SHEDAC. Le système de la Figure 4-50 utilise un contrôle par convertisseurs avec un contrôle par machine à états finis lié à un ensemble de contrôleurs PI agissant sur la structure interne des convertisseurs autrement que par rapport cyclique. Pour les modifications avancées, il n'a pas été possible de faire une simulation qui s'apparenterait au SMA du SHEDAC. Cette expérience de simulation sera effectuée lors d'une expérimentation ultérieure indiquée dans les recommandations. Nous allons également comparer cette forme de contrôle centralisée de la forme distribuée sous contrôle d'agents autonomes que nous avons élaboré sous forme d'agents. On devra être en mesure d'arriver aux mêmes courbes que celles apparaissant ci-après et vérifier si la dynamique est conservée.

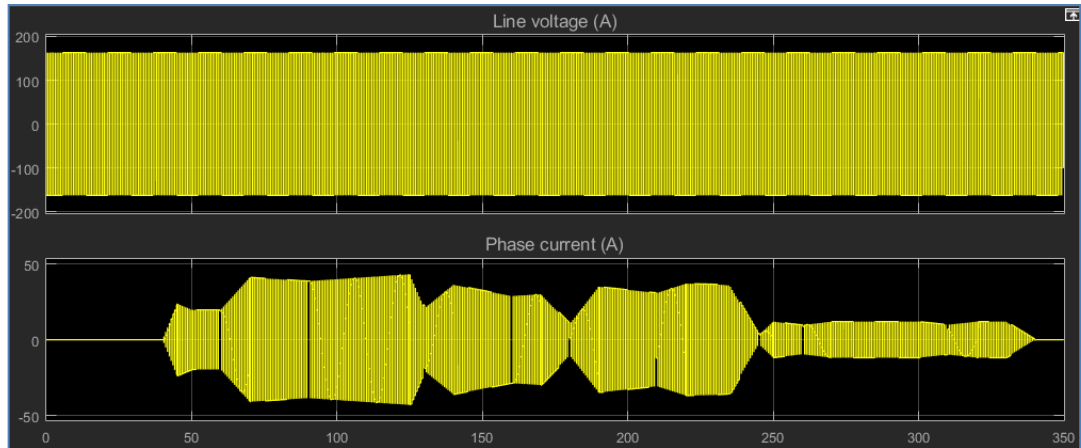


Figure 4-51 - Tension de ligne et phase du courant. [93]

Les courbes des Figure 4-51 à 4-55 seront comparées avec les courbes données par l'implantation de notre contrôle SMA.

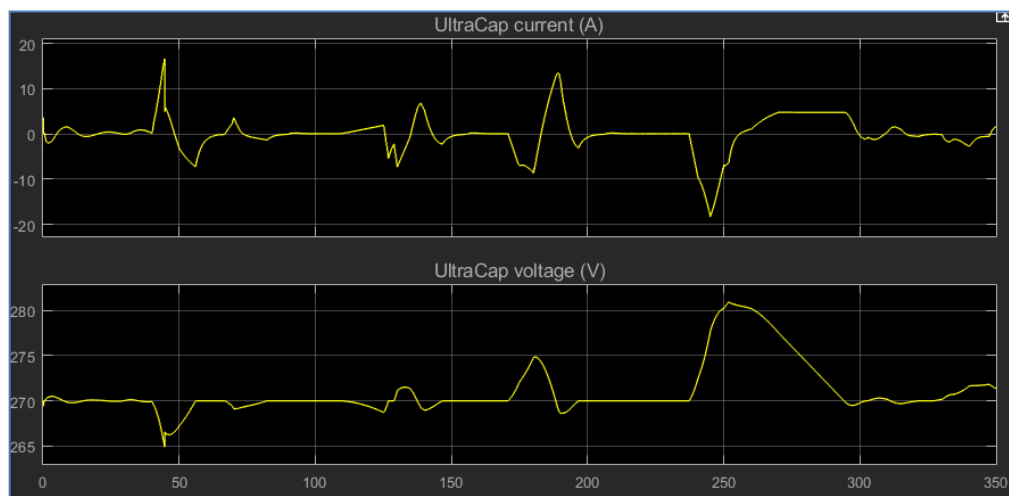


Figure 4-52 Courant et tension CC du banc de supercondensateurs. [93]

On devra être en mesure de retrouver presque les mêmes courbes avec insertion des agents sources.

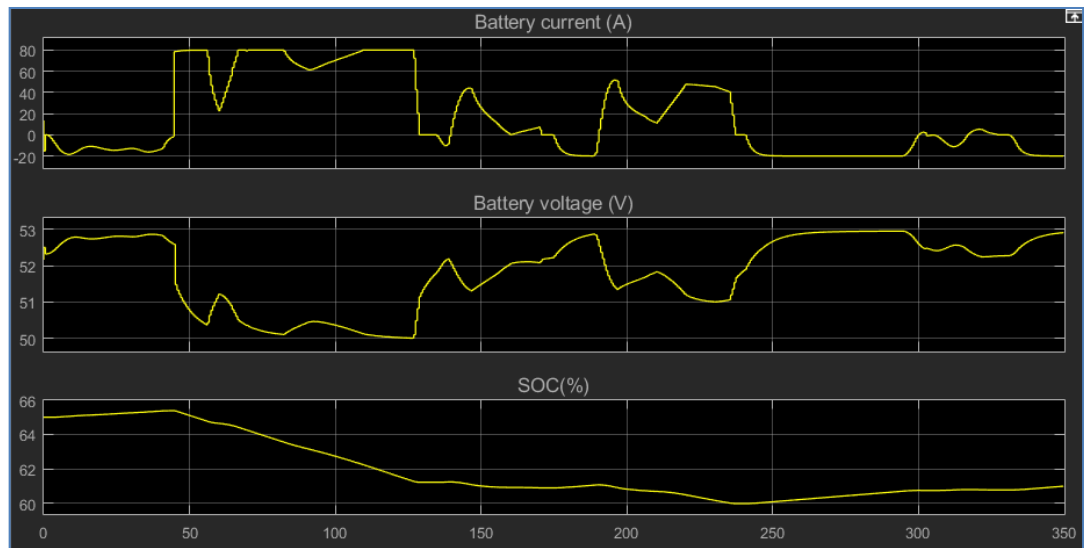


Figure 4-53 Courant, tension et état de charge de la batterie. [93]

On présente également les courbes de puissances pour chacune des sources ainsi que la charge appliquée au système hybride.



Figure 4-54 Courbes de puissances de toutes les sources et de la charge. [93]

Pour utiliser ce modèle, on devra remplacer la pile à combustible par le MAC-Générateur. Le MAC-Générateur se comportera comme cette source avec vérification du SOCac par l'agent GED.

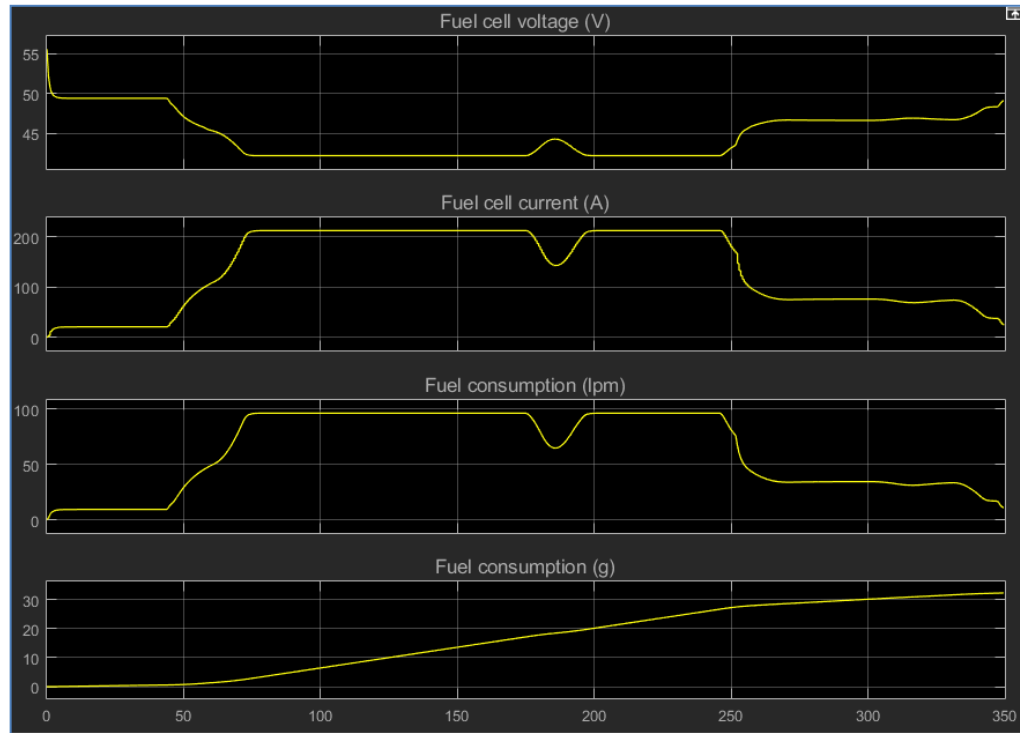


Figure 4-55 Courbes d'évolution de la pile à combustible. [93]

N'ayant pas réussi pour le moment à remplacer le contrôle centralisé de ce système par notre contrôle SMA décentralisé, nous avons néanmoins adapté le modèle de la Figure 4-50 avec quelques modifications afin d'en faire un modèle de simulation pour le SHEDAC que l'on peut voir à la Figure 4-56.

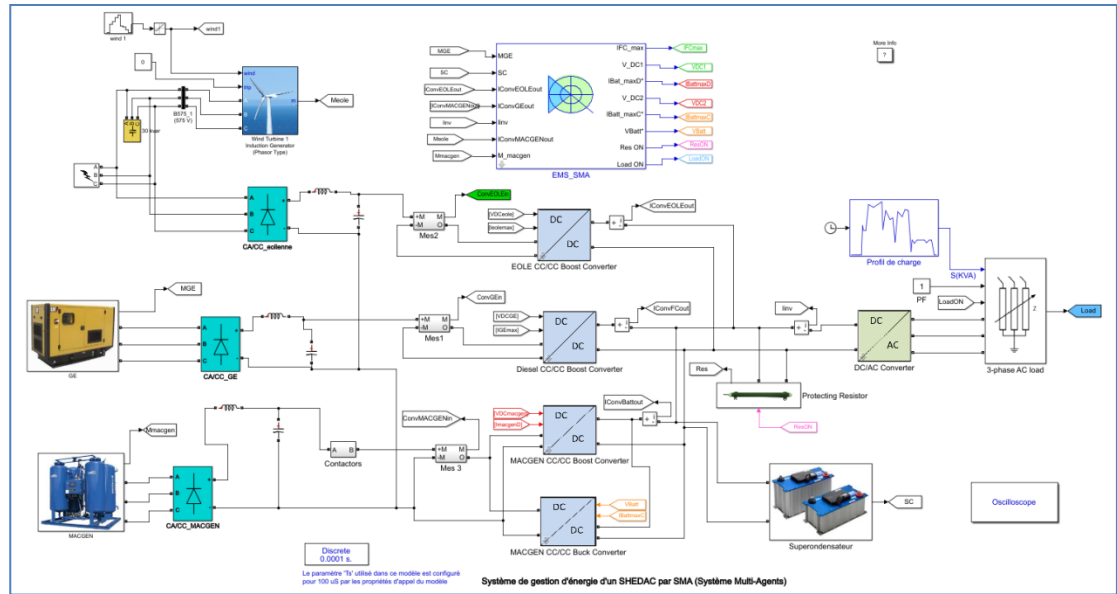


Figure 4-56 Modèle Matlab/Simulink du SHEDAC avec contrôle SMA distribué.
@Richard Lepage

Ce modèle présente la particularité de devenir une plateforme d'essai pour le système de gestion de puissance d'un SHEDAC. On retrouve le GED, le MAC-GEN, l'éolienne ainsi que le banc de supercondensateur. La prise en charge de la recharge et de la détente de l'air comprimé a été simplifiée lors de cette simulation, seule la partie du générateur d'énergie demeure visible. Les équations de comportement de la charge et de la détente de l'air comprimé sont utilisées uniquement comme référence pour valider le SOC lors des opérations en tant que génératrice. Les sources CA sont converties en source CC et passe dans les convertisseurs reliés au bus principal CC de 240 volts. On montre à la Figure 4-60 un exemple de stabilité de l'onde de tension CA pour une phase à la sortie du convertisseur CC/CA triphasé. Comme nous avons affaire à une simulation, il sera important de bien vérifier si la forme d'onde sera stable pour le type de

convertisseur qui sera choisi. La nature de la charge pouvant être autant résistive qu'inductive, le convertisseur devra ajuster le facteur de puissance qui doit être près de l'unité pour éviter les pertes dû à la variation du facteur de puissance. Le convertisseur sera du type Statcom.

La Figure 4-57 donne l'évolution de la tension en fonction du temps de la simulation. Pour arriver à obtenir cette courbe, il fallut, à partir des informations restreintes apparaissant dans l'article de Lagorse et al, déterminer le bon algorithme qui permettrait de donner environ la même courbe que celle obtenue par Lagorse et al. On peut voir que l'évolution de la tension se situe autour de 270 volts à +/- 2 volts lors de la simulation avec le système hybride SHEDAC. Pour cet essai, nous avons mis le bus CC à 270 Volts. On peut voir sur la Figure 4-58 l'évolution du courant sur le bus CC.

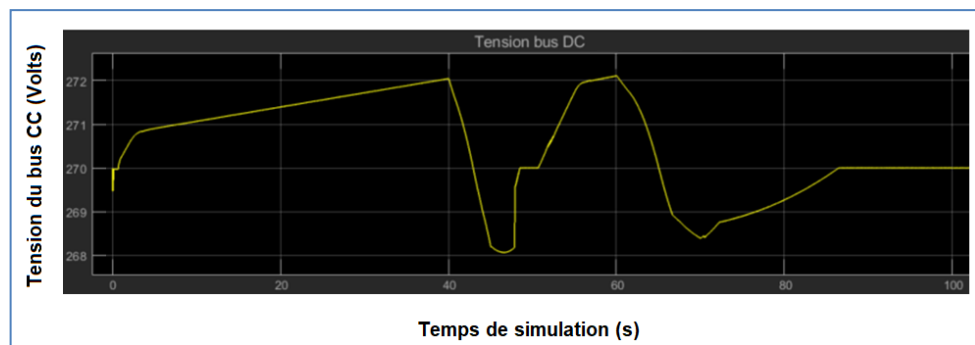


Figure 4-57 - Évolution de la tension en mode simulation. @Richard Lepage

L'échelle des temps étant élevée, on remarque que la tension du bus CC évolue abruptement, cela étant en contradiction avec le comportement d'une capacité lié au bus CC, la raison étant que cette variation brusque de tension

s'effectue durant un court instant de temps, la capacité étant très élevée car la constante de temps est à l'intérieur de la seconde, le banc de supercondensateurs augmentant également la capacité du bus CC.

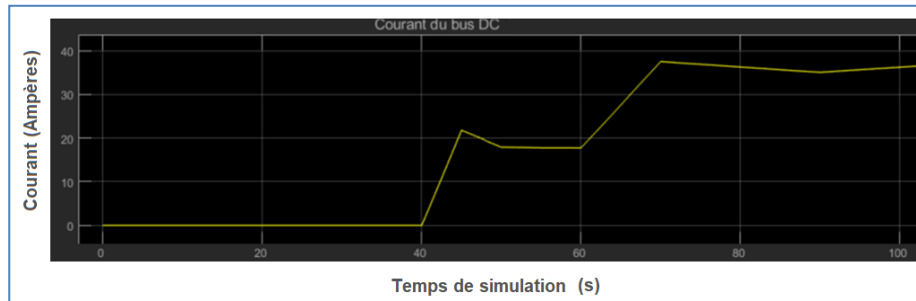


Figure 4-58 Évolution du courant en mode simulation. @Richard Lepage

On peut voir que l'évolution du courant suit la charge. Le temps de réponse lors de la simulation est très court et il faudra vérifier si cette dynamique sera également conservée lors de l'expérimentation en situation réelle. Il est possible que le temps de réaction soit affecté par le débit de la communication entre agents par le mode WIFI. La Figure 4-59 donne le parcours de l'évolution de la charge. Au temps $t=40$ s, la charge devient active avec des paliers de variations afin de vérifier comment réagira la dynamique du système.

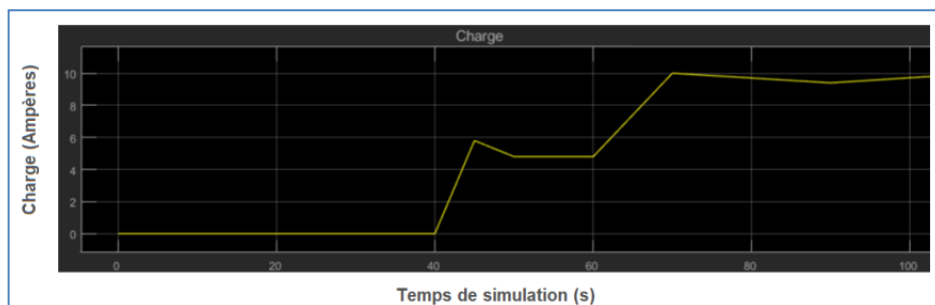


Figure 4-59 Évolution de la charge en fonction du temps de simulation. @Richard Lepage

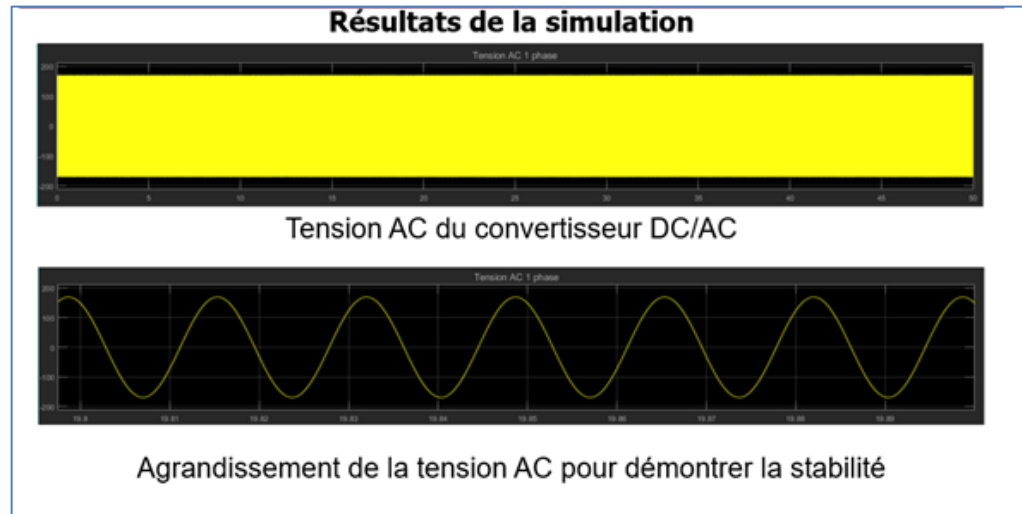


Figure 4-60 – Stabilité de la tension de sortie AC sous charge. @Richard Lepage

4.5 Discussion des résultats

Les résultats obtenus confirment la validité de la méthode de contrôle par SMA en mode simulation. L'idée de pouvoir contrôler la tension du bus par injection de courant sur le bus CC est une méthode fonctionnelle pour la gestion d'énergie d'un système hybride surtout pour le SHEDAC dont la particularité spécifique est son stockage d'énergie sous la forme d'air comprimé. La principale difficulté rencontrée lors de la conception du modèle de simulation du SHEDAC a été l'implantation des différents modules dans un modèle existant fonctionnel mais utilisant des sources d'énergie différentes. Le contrôle était centralisé et la difficulté d'implémentation du contrôle SMA distribué à la place du contrôle centralisé

demandera un peu plus d'astuce qu'à l'ordinaire pour une étape future. Nous sommes arrivés finalement à des résultats acceptables concernant le fonctionnement global du SMA. La suite de ce travail sera validée ultérieurement plus en détail lors de la comparaison des valeurs expérimentales obtenues par les cartes de contrôles avec les données du site de Tuktoyaktuk.

4.6 Conclusion

Pour conclure cette étape de simulation, nous avons vu que le modèle fonctionnait comme prévu et qu'il était mûre pour une implémentation au niveau matériel. L'objectif de cette section a été réalisé, soit de concevoir un SMA qui s'occupe de la gestion d'énergie d'un SHEDAC et par la suite en faire la simulation afin de démontrer la validation de cette méthode de gestion pour les systèmes hybrides-éoliens diesel avec stockage d'air comprimé dans les sites isolés. La revue de littérature réalisée dans la première partie de la thèse nous a permis de poser les fondements théoriques pour la proposition et la conception d'un nouveau système de contrôle par agents intelligents. Trois axes ont été particulièrement abordés dans notre recherche. Le premier a permis de déterminer le type de contrôle qui pourrait être utilisé pour la gestion d'énergie du SHEDAC. Le deuxième axe a été placé sous l'angle de la méthode de conception appropriée (méthode ascendante ou descendante) pour concevoir les procédures qui permettent au SMA de réguler la puissance des sources tout en allégeant le GED. La revue de littérature a permis de statuer sur la meilleure plateforme de gestion

de communication des agents logiciels en utilisant la plateforme SPADE. Le troisième axe a mis en lumière la problématique d'implémentation du SMA sur des cartes de contrôle qui communiquent entre eux pour minimiser la consommation en carburant du GED. Nous avons expérimenté la communication inter-agents sur des cartes simulant les sources implémentées lors de la partie simulation. La Figure 3-16 donnant un aperçu de fonctionnement de la partie communication entre les sources.

Dans une étape ultérieure, il restera à vérifier si l'exploitation de l'air comprimé dans le système de stockage, produisant directement de l'électricité à travers le MAC-GEN et son exploitation dans le système de suralimentation supplémentaire directe dans le moteur diesel, donnera les résultats escomptés.

Parmi les points étudiés et développés dans ce manuscrit, nous évoquerons particulièrement notre conception originale qui consiste en la possibilité d'arrêter totalement le diesel dans des situations diverses par le truchement du banc de supercondensateur et du MAC-GEN qui supporte le réseau durant le temps nécessaire pour un redémarrage du GED. Cette possibilité était permise auparavant pour les systèmes hybrides éoliens-diesel mais avec des cycles très élevés d'arrêt et de redémarrage du GED, ce qui occasionnait une maintenance plus lourde avec des coûts supplémentaires. Il faudra vérifier ultérieurement si, au niveau de l'expérimentation en temps réel, nous pouvons empêcher le GED de fonctionner en cas de charges faibles selon une configuration optimale obtenue par un procédé d'optimisation comme l'algorithme génétique.

On peut conclure que le SMA permet de profiter au maximum des énergies renouvelables disponibles si un processus d'optimisation aura été engagé au préalable avant toute implémentation du SMA. Il n'est pas possible pour le moment de se débarrasser du GED car il servira, lors des creux énergétiques, à soutenir le réseau et ce, indépendamment de la valeur de la pénétration des sources renouvelables. Ces sources seront toujours dépendantes des conditions météorologiques et seront, de plus en plus, imprévisibles selon l'évolution du changement climatique.

5. VALIDATION EXPÉRIMENTALE

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous avons effectué une validation expérimentale du modèle simulé par une expérimentation se déroulant en temps réel avec des cartes de contrôle communiquant entre elles des messages par lien WIFI ou par lien filaire. L'objectif principal de ces messages est de permettre le passage du jeton de contrôle à l'agent qui prendra le contrôle global du système hybride afin de rencontrer un objectif commun selon une fonction coût. Ne pouvant disposer dans les délais prescrits d'un banc d'essai, il a été décidé de faire une expérimentation minimaliste permettant de valider la programmation des agents logiciels implémentés dans une carte de développement. Cette expérimentation minimaliste a permis de vérifier le bon fonctionnement de la stratégie de commande à partir du modèle SMA développé en simulation. Pour effectuer un choix judicieux de la carte de contrôle, il a été nécessaire de suivre des critères spécifiques qui ont été choisis selon la vitesse d'acquisition des données, la vitesse de calcul en point flottant ou en point fixe, les types d'entrées et sorties (logique, PWM, CAN, encodeur par quadrature...), si le processeur du contrôleur manipulait uniquement les entiers et/ou le point flottant ainsi que d'autres critères.

À la lecture des articles concernant le choix du langage de programmation, nous avons réalisé que plusieurs plateformes SMA telles que les plus connues comme SPADE, JADE ou MADKIT ont été écrites dans des langages de programmation de haut niveau tels que python, Java ou C++. Un critère important sur le choix de la carte de développement était que la carte de contrôle puisse prendre aisément en charge l'un ou l'autre de ces langages de programmation d'où la nécessité de disposer d'un système d'exploitation minimaliste tel que Linux ou une couche logiciel de démarrage à chaud tel qu'un système « Bare metal ». Nous en sommes arrivés à la conclusion que SPADE était la plateforme la plus appropriée et la plus efficace en termes de fiabilité en communication et en exécution de processus, les temps de latence étant les plus courts pour conserver une bonne dynamique du système.

5.2 La plateforme SMA

Le SMA est constitué d'agents logiciels autonomes communiquant entre eux des comportements suscitant des actions. La communication s'effectue par WI-FI ou par mode CAN selon la configuration des sources d'énergies renouvelables du système SHEDAC. Le modèle d'agent est composé à la base d'un mécanisme de branchement à une plate-forme de communication, d'un répartiteur de messages et d'un ensemble de comportements envoyés par le répartiteur via ces messages. Chaque agent est identifié par un numéro d'agent ou un nom d'agent (ex :

agentdiesel@fournisseur.com) et un mot de passe pour établir le branchement au serveur WI-FI. Pour éviter des piratages du SMA par des utilisateurs malveillants, Il existe des codes d'encryptage qui agissent comme des pare-feux contre toute intrusion. Le modèle SMA est doté d'un tel code, du moins en ce qui concerne le microcontrôleur.

5.2.1 Implémentation des agents logiciels avec SPADE

Après étude des plateformes existantes [94], il a été prescrit d'utiliser la plateforme SPADE lors de la partie expérimentale, cette plateforme utilise de manière optimale le CPU et la couche de communication pour la distribution des tâches du SMA [95] comparativement à JADE qui est programmé en langage JAVA. Les agents et les fonctions associées dans la plateforme SPADE sont programmés en langage python. Ce langage interprété orienté objet permet de développer rapidement des outils qui, une fois déverminés et exempts de tout problèmes, pourront ensuite être compilé en code natif afin de bénéficier de la rapidité d'exécution dans le mode temps-réel. De plus, SPADE est un logiciel libre qui peut être remodelé pour d'autres situations étant donné la disponibilité du code source [72]. Une partie de la plate-forme a été modifiée afin de rencontrer les spécifications du SHEDAC en termes de stratégie de gestion au niveau énergétique.

5.2.2 Le choix du lien de communication

Pour la partie matérielle de la communication entre les cartes microcontrôleurs, on choisit soit une communication filaire (mode CAN) [96] ou un mode de communication Hertzien (Wi-Fi, Bluetooth...) dépendant de la situation géographique des agents logiciels. Lors d'une recherche non exhaustive sur les protocoles de communication [97], nous avons obtenus un tableau comparatif (Table 5-1) sur les modes les plus courants en communication Hertzienne. Par comparaison, le mode Loran présente une consommation plus élevée mais peut transiger à une distance plus grande et à une vitesse plus élevée que le mode ZigBee ou le mode Wi-Fi.

Table 5-1 Comparaison des protocoles Zigbee, Bluetooth et Wi-Fi pour la communication inter-agents.

Caractéristique	Zigbee	Bluetooth Low Energy	Bluetooth	Wi-Fi
IEEE	802.15.4		802.15.1 (BT 1.x)	802.11a/b/g/n/ac
Besoins mémoire	4-32 ko		250 ko +	1 Mo +
Autonomie avec pile	Années	Années	Mois	Jours
Nombre de nœuds	65 000+	illimité	255	256+
Vitesse de transfert	20-250 kb/s	1 Mb/s	1-3 Mb/s	11-54-108-320-1000 Mb/s
Portée (environ)	10 m ¹	100 m	10 m	100 m

Pour l'expérimentation, nous avons utilisé le mode de communication WIFI parce que la partie programmation présente une facilité d'utilisation que n'a pas le mode filaire. On présente à la Table 5-3 les caractéristiques techniques de la carte "Linkit smart 7688 duo". C'est cette carte qui sera utilisée pour le mode WIFI. Cette carte dispose de deux (2) modes de fonctionnement, soit le mode station WIFI et/ou le mode Client WIFI. Le mode station permet une communication vers un

réseau filaire auquel il est raccordé (devient un point d'accès ou un « nœud ») tandis que le mode client ne permet qu'une communication vers un point d'accès ou communément appelé « nœud ». La Figure 5-1 montre comment le client WIFI se distingue du mode station WIFI.

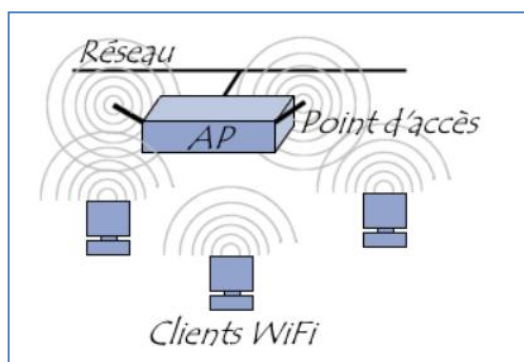


Figure 5-1 - Le point d'accès correspondant au mode station et au mode client.

@Richard Lepage

La communication WIFI contient un protocole de communication et d'échange de données qui est beaucoup plus simple que le mode CAN mais est plus assujettie aux bruits et aux aléas du terrain (les signaux ne traversent pas les structures de béton composées d'armatures). La communication par mode CAN à un meilleur blindage aux bruits mais a le défaut d'être filaire. Le mode CAN est un bus multiplexé doté d'un bus à 2 fils dont l'un est à la masse, associée avec une résistance de 120 Ohms (voir Figure 5-2).

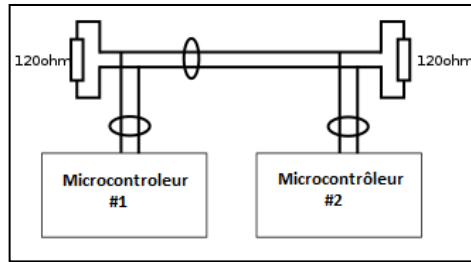


Figure 5-2 – Lien filaire bouclé du mode CAN. @Richard Lepage

Le mode CAN a été normalisé avec la norme ISO 11898 [98]. Ce mode de communication permet de relier au même câble plusieurs calculateurs (microcontrôleurs) qui communiqueront à tour de rôle [99] suivant un protocole de communication standardisé. Le câble de communication est constitué d'une paire torsadée. Une autre paire vient alimenter en tension chacun des microcontrôleurs. La vitesse de transmission est inversement proportionnelle à la distance entre les calculateurs. Par exemple, à 500 m de distance entre deux points, le débit est de 125 kbit/s tandis qu'à 100 m, le débit max est de 500 kbit/s. C'est un mode de communication très structuré mais qui demande une bonne connaissance technique lors de la conception de la banque de message. On retrouve, sur Internet, de nombreux exemples de programmation du mode CAN dans différents langages de programmation.

5.3 Le choix du microcontrôleur

On présente ci-après les critères qui serviront à sélectionner le microcontrôleur qui embarquera l'agent logiciel. Celui-ci surveillera la source d'énergie et contrôlera son débit au moyen du convertisseur de tension. L'agent

logiciel sera programmé soit en langage python, en Java ou en langage C++. Cela signifie que la plateforme devra être munie d'un système d'exploitation tel que linux ou autre, d'un langage Python ou de la plateforme Java soit en mode autonome ou inclus dans un système d'exploitation (Linux, Windows RT, ...). SPADE est la plateforme qui sera utilisé lors de l'expérimentation. Cette plateforme contient toutes les classes nécessaires pour construire un SMA. Il s'agira d'ajouter ce qui est spécifique au SHEDAC pour chacune des sources (surveillance, envoi de messages, contrôle de la source...).

Le choix du microcontrôleur est d'une très grande importance car celui-ci se doit d'être particulièrement rapide sur le temps d'exécution, disposé d'une librairie complète de fonctions pouvant se programmer aisément et rapidement, pouvant communiquer avec un autre processeur soit par bus CAN ou par lien WIFI et posséder suffisamment de mémoire pour la programmation d'un système de gestion intelligent. Le processeur doit également posséder un moyen de stocker de l'information sur un support matériel ("datalogger" avec carte micro-SD) pour enregistrer les étapes de fonctionnement du système afin de pouvoir en faire une étude statistique à long terme. On présente à la Table 5-2 le tableau qui a permis de choisir la bonne carte de développement selon un cahier des charges spécifiques pour ce type de projet. On peut remarquer la grande proximité entre la carte PocketBeagle et la carte PyBoard. En effet, le langage de programmation utilisé sur ces deux cartes est le langage Python. Il est certainement possible de reprogrammer la librairie SPADE en micropython mais cela demanderait plus de

temps que d'utiliser SPADE dans un environnement Python qui tourne sur Linux. Il y aura des tests que l'on devra faire sur la carte Pyboard car celle-ci présente à peu de chose près des caractéristiques qui se rapprochent de la carte PocketBeagle. On disposait d'un grand nombre de carte de microcontrôleur mais comme SPADE fonctionne dans un environnement Python, il fallait s'assurer d'avoir sous la main la meilleure carte de développement pour notre système de gestion de puissance pour le SHEDAC.

Table 5-2 - Tableau comparatif des différentes cartes de microcontrôleur pouvant servir à l'implémentation des agents logiciels du système de gestion de puissance du SHEDAC. Source : Richard Lepage

Facteurs	Cartes microcontrôleur					
	Raspberry PI 3	PocketBeagle	TI (TMS320F28335)	Pyboard	TI TMS320C5515	Intel Galileo gen 2
Système Linux	1	1	0	0	0	1
Carte microSD (min 4 Gbytes)	1	1	0	1	1	1
Accès facile aux ports IO	1	1	1	1	0	0
PWM (min 10 kHz)	0	1	1	1	1	1
Acquisition de données (F_{ech} min 1MHz)	0	1	0	1	1	1
Processeur calcul flottant	1	1	1	1	0	1
Fréquence processeur min 500 Mhz	1	1	1	0	0	0
Communication CAN	0	1	1	1	1	1
Programmation C++	1	1	1	0	1	1
Programmation Java	1	1	0	0	0	1
Programmation Python	1	1	0	1	0	1
Real time clock	0	1	1	1	1	1
Consommation économe (< 2 W)	0	1	1	1	1	0
Watchdog power	0	1	1	1	1	1
Compteur timer 32 bits	1	1	1	1	1	1
Coût (< \$100)	1	1	0	1	0	0
Ram interne (min 500 Mbytes)	1	1	0	0	0	0
WIFI	1	0	0	0	0	1
Bluetooth	1	0	0	0	0	1
Port USB	1	1	1	1	1	1
Température opération (-40 à 80C)	0	1	1	1	1	1
Encodeur par Quadrature	0	1	1	1	1	0
	14	20	13	15	12	16

Au vu des résultats, il appert que le choix du microcontrôleur porte sur la carte de développement "PocketBeagle". Celle-ci dispose d'un mode CAN

advenant le cas où le mode WIFI ne pourrait réaliser la communication entre les cartes représentant les agents logiciels. Les détails techniques sur l'utilisation de cette carte se retrouvent sur Internet sur différents sites pour n'en nommer que quelques-uns [100-102]. Le mode CAN se trouve sur la carte "PocketBeagle" et permettra la communication filaire entre les cartes de développement (voir Figure 5-3).



Figure 5-3 - a) La carte "PocketBeagle" b) la carte WIFI linkit smart 7688 Duo. [101]

Pour la partie programme, c'est la carte "PocketBeagle" qui prend en charge la gestion d'énergie par agent. Chacune des sources porte une carte "PocketBeagle" avec son propre agent de contrôle. La Table 5-2 présente les caractéristiques de la carte "PocketBeagle" tandis que la Table 5-3 présente les caractéristiques de la carte WIFI linkit smart 7688 DUO. On retrouve sur quelques site Web des informations concernant les détails et la programmation de la carte "Linkit Duo" [103-105]. Cette carte est composée de deux CPU, l'un fonctionnant à une fréquence de 580 MHz (MT7688) et l'autre processeur, fonctionnant à 8 MHz (Atmega32U4).

Table 5-3 Caractéristiques techniques de la carte WIFI Linkit smart 7688 Duo. [103]

Category		Linkit Smart 7688	Linkit Smart 7688 Duo
Microprocessor (MPU)	Chipset Core Clock Speed Voltage	MT7688AN MIPS24KEc 580MHz 3.3V	
Connectivity	Wi-Fi Ethernet	1T1R 802.11 b/g/n (2.4G) 1-port 10/100 FE PHY	
Memory	Flash RAM	32MB 128MB DDR2	
Power	Connector Voltage	MicroUSB 5V	
USB Host	Connector	MicroUSB	
Storage	SD Card	MicroSD SDXC	
PCB size	Dimensions	56 x 26 mm (2.2 x 1.0 inches)	61 x 26 mm (2.4 x 1.0 inches)
Microcontroller (MCU)	Chipset Clock Speed Voltage	n/a	ATmega32U4 8MHz 3.3V
Total Digital I/O	Pin Count	22	27
ADC Channel	Pin Count	n/a	12
PWM Channel	Pin Count	4	8
I2C	Set Count	1	1
SPI	Set Count	1	1
I2S	Set Count	1	n/a
UART (Lite)	Set Count	3	2

Dans le cas de la carte de développement, si le mode WIFI n'est pas approprié, on se servira alors d'une seule carte, soit la carte "PocketBeagle" car celle-ci dispose de deux ports de communication en mode CAN (CAN0 et CAN1) sinon on devra utiliser les deux cartes, "PocketBeagle+Linkit Duo". Il y aurait eu possibilité également d'utiliser une carte de développement sans système d'exploitation. On appelle ce type de modèle de développement le modèle "Bare Metal". Cette manière de procéder élimine la nécessité d'un système d'exploitation, ce qui permet une intégration directe du logiciel avec peu de mémoire programme. Le désavantage d'un système "Bare Metal" se trouve dans la difficulté de développement du programme contrairement à un développement du programme de gestion conçu avec les outils installés dans un système d'exploitation. En effet,

on dispose des outils de déverminage associé à un IDE qui corrige les problèmes de conception et permet de tester le programme principal exempt d'erreur et ce, plus rapidement qu'avec le mode "Bare metal". Dans notre cas, c'est avec un système d'exploitation minimal que l'on gèrera le SMA.

a. Texas Instruments® Sitara™ AM3358 Processor (Integrated in the OSD3358-SM): i. 1GHz ARM® Cortex-A8 with NEON floating-point accelerator ii. SGX530 graphics accelerator iii. 2x programmable real-time unit (PRU) 32-bit 200MHz microcontrollers with single-cycle I/O latency iv. ARM® Cortex-M3 for power and security management functions b. Memory: i. 512MB DDR3 800MHZ RAM (Integrated in the OSD3358-SM) ii. 4kB I2C EEPROM (Integrated in the OSD3358-SM) iii. SD/MMC Connector for microSD c. Software Compatibility i. Debian GNU/Linux images customized for BeagleBone ii. Cloud9 IDE on Node.js w/ BoneScript library iii. Any BeagleBone Black software not needing access to unavailable expansion pins d. Connectivity i. High speed USB 2.0 OTG (host/client) micro-B connector (USB0) ii. Bootable microSD card slot (MMC0)
e. Expansion header i. High speed USB 2.0 OTG (host/client) control signals (USB1) ii. 8 analog inputs with 6 at 1.8V and 2 at 3.3V along with 1.8V voltage references iii. 44 digital GPIOs accessible with 18 enabled by default including 2 shared with the 3.3V analog input pins iv. 3 UARTs accessible with 2 enabled by default (UART0, UART4) v. 2 I2C busses enabled by default (I2C1, I2C2) vi. 2 SPI busses with single chip selects enabled by default (SPI0, SPI1) vii. 4 PWM outputs accessible with 2 enabled by default (PWM0A, PWM1A) viii. 2 quadrature encoder inputs accessible ix. 2 CAN bus controllers accessible x. 23 programmable real-time unit (PRU) 32-bit microcontroller I/O pins including options for the PRU UART and eCAP accessible with 7 I/O pins enabled by default for PRU0 and 1 enabled by default for PRU1

Figure 5-4 - Caractéristiques techniques de la carte "PocketBeagle". [102]

Le système "Bare Metal" sera utile si la carte de développement ne dispose pas assez de mémoire pour contenir un système d'exploitation et les outils de développement pour la conception du programme. Aujourd'hui, les cartes de

développement disposent d'une mémoire de 512 Mo qui peut stocker un système Linux minimaliste et de la place mémoire pour le programme.

Le système d'exploitation utilisé lors de l'expérimentation est le système Linux. Ce système d'exploitation est disponible en image que l'on peut graver sur une carte micro-SD disposant d'un espace minimal de 4 Go. On retrouve également des implantations minimales de Linux qui peuvent s'installer aisément sur des cartes de microcontrôleur ayant un processeur de type ARM fonctionnant avec une fréquence de plus de 200 MHz. La plupart des systèmes linux minimaliste sont des images d'environ 500 Mo copiées sur une carte micro-SD de 4 Go qui se charge automatiquement dans la carte de contrôle lors de sa mise en marche.

La version du système d'exploitation LINUX qui a été utilisée lors de l'expérimentation sur les cartes de développement est la version Debian 9.9 2019-08-03 4GB SD IoT. Ce système est gratuit et contient un compilateur gcc pour C++, un logiciel de programmation Python (interpréteur et compilateur) ainsi qu'un compilateur JAVA associé à un JIT (Just In Time) permettant de compiler en code natif (le code machine du processeur de la carte microcontrôleur).

Le développement logiciel s'effectue à partir d'un IDE installé dans Windows sous le nom de Cloud9. La documentation de cet IDE se retrouve sur Amazon Web Service [106]. Cet IDE est utilisé par d'autres chercheurs pour le développement rapide de modèles de conception [107]. Si le développement se

fait en C++, Cloud9 dispose du compilateur gcc par défaut. Si on veut développer du code en Python, on se sert de l'IDE pour écrire le code et ensuite nous ouvrons une fenêtre terminale pour accéder à Linux sur la carte de développement. On démarre ensuite l'interpréteur Python pour tester le code qui a été sauvegardé au préalable dans un fichier avec extension ".py". La Figure 5-5 donne un aperçu de l'IDE comportant une fenêtre de dossier et fichier, un éditeur de code et une fenêtre de sortie pour les résultats transmis par le programme en cours de fonctionnement.

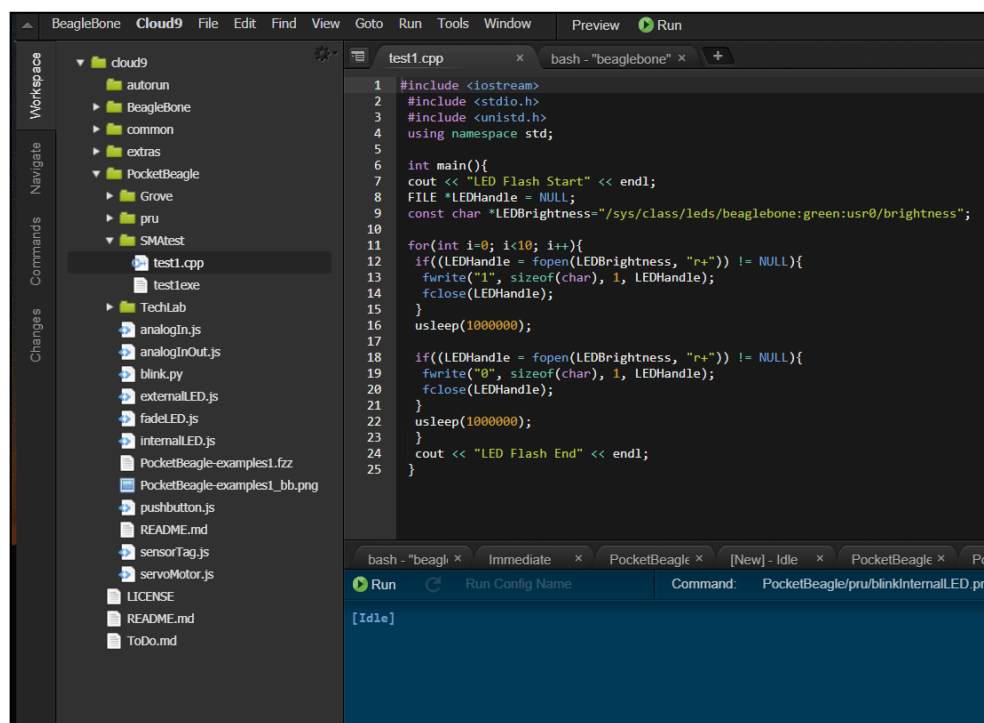
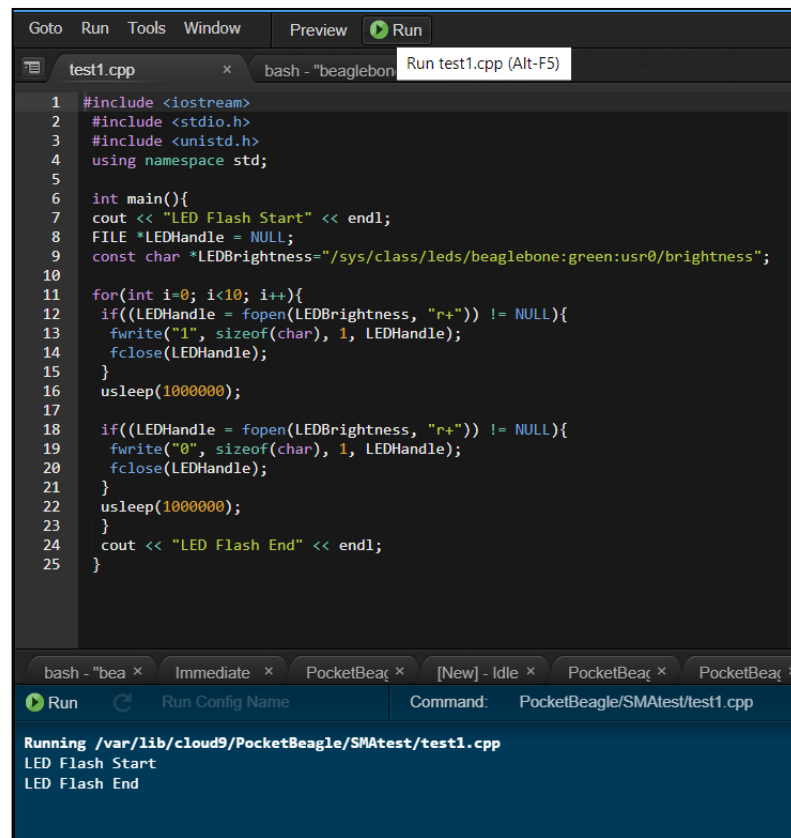


Figure 5-5 Un exemple de programme codé en C++ conçu avec Cloud9. [106]

Lorsque le codage du programme est terminé, on clique sur l'icône Run qui activera le compilateur et le module de liaison de librairie. Si le code ne contient

pas d'erreur, le code s'exécute jusqu'à ce qu'une action conditionnelle ou non arrête celui-ci.

Si la programmation est en langage Python comme c'est le cas dans le cadre de notre expérimentation, tout le code se trouve dans un dossier et le programme principal est démarré lors du démarrage de la carte.



The screenshot shows an IDE window with a C++ file named `test1.cpp`. The code is as follows:

```
1 #include <iostream>
2 #include <stdio.h>
3 #include <unistd.h>
4 using namespace std;
5
6 int main(){
7     cout << "LED Flash Start" << endl;
8     FILE *LEDHandle = NULL;
9     const char *LEDBrightness="/sys/class/leds/beaglebone:green:usr0/brightness";
10
11     for(int i=0; i<10; i++){
12         if((LEDHandle = fopen(LEDBrightness, "r+")) != NULL){
13             fwrite("1", sizeof(char), 1, LEDHandle);
14             fclose(LEDHandle);
15         }
16         usleep(1000000);
17
18         if((LEDHandle = fopen(LEDBrightness, "r+")) != NULL){
19             fwrite("0", sizeof(char), 1, LEDHandle);
20             fclose(LEDHandle);
21         }
22         usleep(1000000);
23     }
24     cout << "LED Flash End" << endl;
25 }
```

Below the code editor, the terminal output shows the command used to run the program and its output:

```
Running /var/lib/cloud9/PocketBeagle/SMAtest/test1.cpp
LED Flash Start
LED Flash End
```

Figure 5-6 Compilation du code C++ et résultats dans la fenêtre de sortie. [106]

On peut également ouvrir une fenêtre terminale par l'intermédiaire d'un terminal comme Putty en mode serial. Vous vérifiez le numéro du "com port" de votre carte "PocketBeagle" (com4 dans notre cas) en vérifiant dans le gestionnaire

de périphériques. La Figure 5-7 montre la fenêtre de configuration de Putty en mode serial.

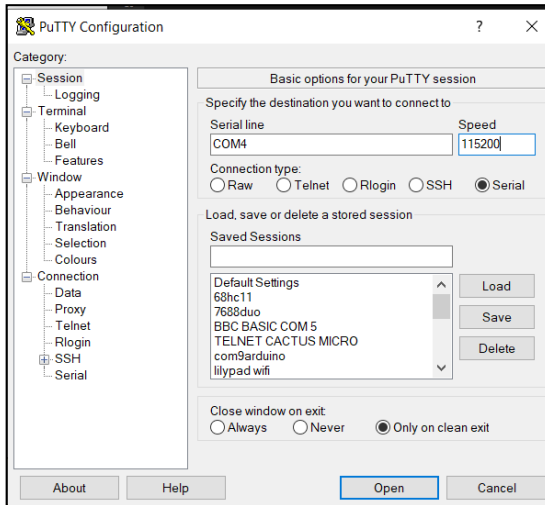
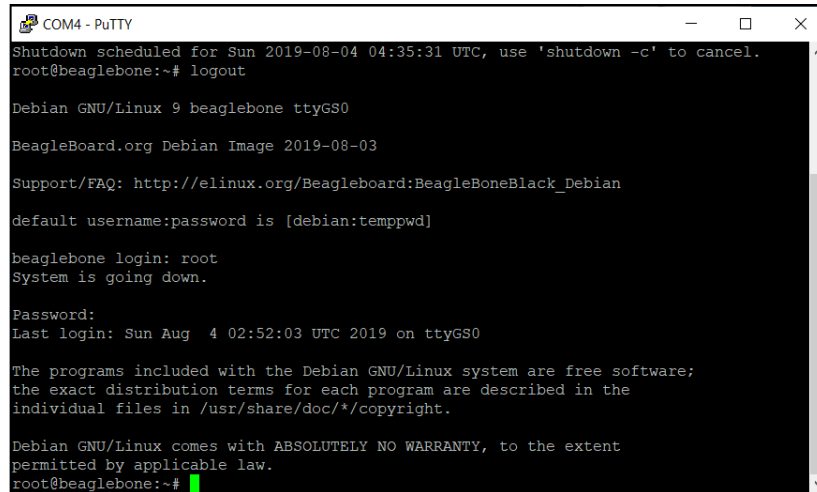


Figure 5-7 Configuration de Putty pour accéder à Linux. [101]

Pour entrer dans l'environnement Linux, nous tapons le mot "root" à l'annonce du Login et du mot de passe, le mot "root" étant tapé à ces deux entrées. Une fois dans Linux, on peut ouvrir l'éditeur nano pour créer un fichier de code (Figure 5-8) et ensuite compiler et exécuter le programme selon les procédures prescrites dépendant du compilateur.



```
COM4 - PuTTY
Shutdown scheduled for Sun 2019-08-04 04:35:31 UTC, use 'shutdown -c' to cancel.
root@beaglebone:~# logout

Debian GNU/Linux 9 beaglebone ttyGS0
BeagleBoard.org Debian Image 2019-08-03
Support/FAQ: http://elinux.org/Beagleboard:BeagleBoneBlack_Debian
default username:password is [debian:tempwd]

beaglebone login: root
System is going down.

Password:
Last login: Sun Aug  4 02:52:03 UTC 2019 on ttyGS0

The programs included with the Debian GNU/Linux system are free software;
the exact distribution terms for each program are described in the
individual files in /usr/share/doc/*/copyright.

Debian GNU/Linux comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY, to the extent
permitted by applicable law.
root@beaglebone:~#
```

Figure 5-8 Environnement Linux sur terminal Putty. [101]

5.4 Programmation des agents logiciels

Le matériel étant établi, il reste à programmer les agents logiciels. Nous avons utilisé une plateforme existante dont le code a été modifié afin d'être utilisable sur un microcontrôleur. Le SMA est constitué des mêmes agents dont la structure de base est la même sauf en ce qui concerne l'aspect local car les sources d'énergies sont différentes entre elles. La Figure 5-9 présente la configuration générale du SHEDAC qui sera utilisée lors de la programmation des agents. Dans une étape ultérieure, nous aurons à greffer une carte pour chacune des sources se présentant dans le SHEDAC.

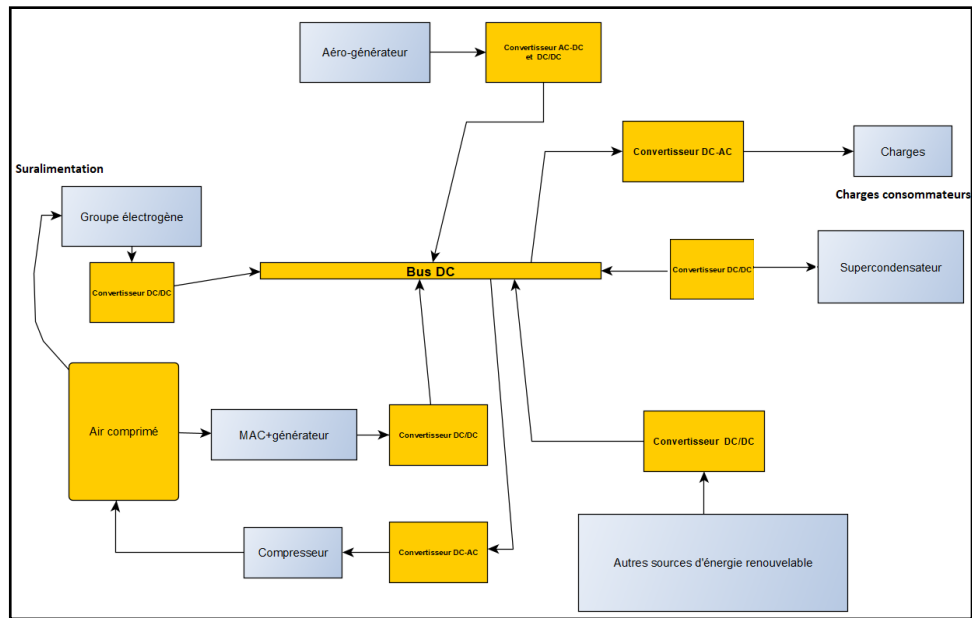


Figure 5-9 - Schéma synoptique du SHEDAC. @Richard Lepage

Nous avons implémenté avec succès des agents dans quatre cartes de développement. Dans la première carte, nous avons implémenté l'algorithme de l'agent GED, dans la seconde on retrouve l'agent MAC-GEN, dans la troisième l'agent éolien et finalement dans la dernière carte l'agent SC pour le banc de supercondensateurs. La communication entre les cartes de développement a été établie en mode WIFI. Chacun des agents s'occupait de paramètres préprogrammés simulant chacune des sources. Il fallait trouver un moyen pour savoir si les cartes communiquaient bien entre elles et agissait selon les protocoles établis par la programmation. Nous avons branché des indicateurs lumineux (LED) à des sorties spécifiques indiquant si la carte possédait le jeton de contrôle, soit un LED bleu indiquant le fonctionnement de l'agent, un LED rouge indiquant la

possession du jeton de contrôle et un LED jaune indiquant que le GED est mis hors fonction.

C'est de cette manière que nous avons mesuré l'efficacité du contrôle du jeton en programmant une simulation d'un bus CC qui évoluait aléatoirement et qui était remis à la valeur de tension de référence par le module PID. Ce module activait un compteur ou un décompteur qui augmentait ou diminuait la tension du bus toujours selon la référence demandée ou la consigne (voir annexe A pour le PID et sa programmation en python). On présente à la figure 5-10 la plaquette d'expérimentation qui a servi à vérifier le protocole de communication inter-agent. Le module WI-FI représenté par la carte LinkitDuo envoie les données de la carte sélectionnée vers le PC qui contient un programme permettant d'enregistrer les données de la carte. L'information de retour est ensuite envoyée vers la carte LinkitDuo qui transmettra le retour d'information à l'agent qui en a fait la demande.

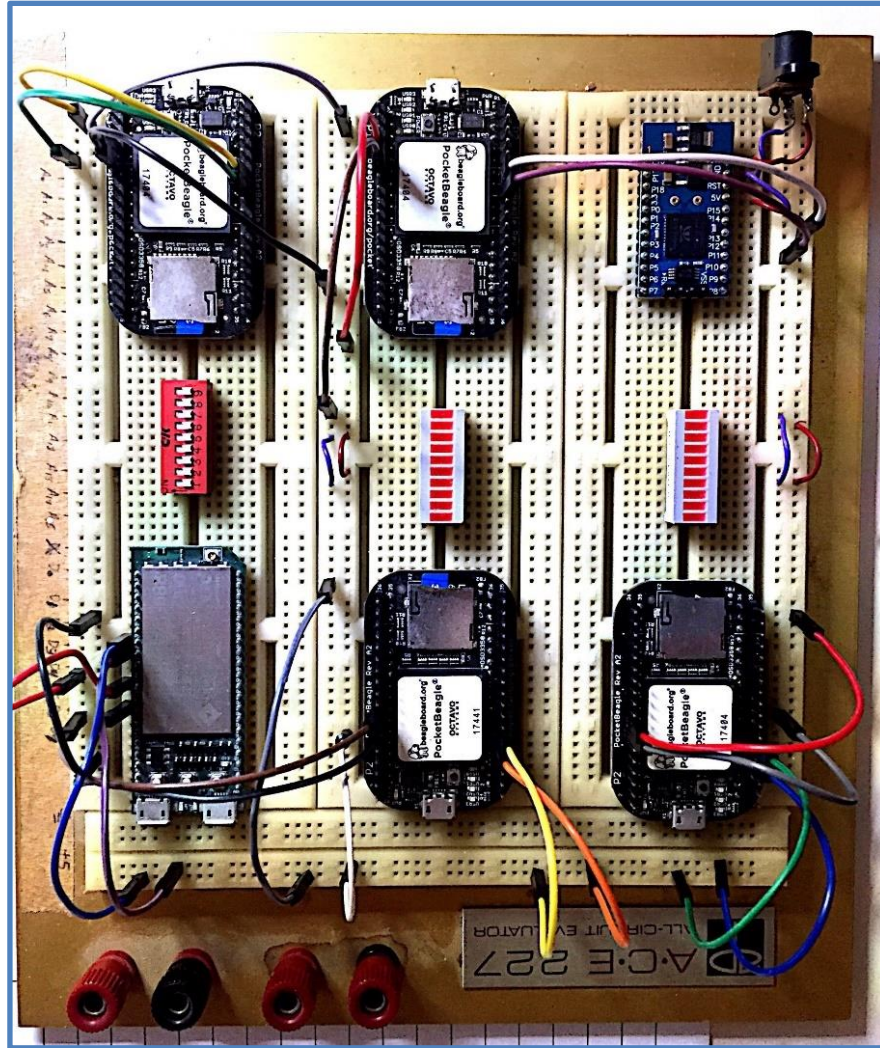


Figure 5-10 - Carte d'expérimentation pour la validation de la communication inter-agents. @Richard Lepage

La carte d'expérimentation de la Figure 5-10 a été dénudée intentionnellement des connecteurs reliant les microcontrôleurs aux modules LEDs de manière à montrer les connexions entre les microcontrôleurs et le bus de communication. Le bus est du type UART constitué d'une ligne TX et RX. Les informations de chaque microcontrôleur transitent vers ce bus de manière

synchrone pour éviter les conflits de croisement des données. Le module WIFI représenté par la carte LinkitDuo envoie les informations vers un PC qui seront par la suite décryptées par un petit programme. L'objectif de ce programme est de retourner une réponse vers la carte LinkitDuo qui transmettra l'information désirée vers le microcontrôleur via le bus de communication. C'est de cette manière que la communication inter-agents a été validée avec succès. Il est entendu que cette étape permet de vérifier uniquement la dynamique de communication entre les agents. Lors d'une expérimentation en temps réel, on devra utiliser le mode CAN qui sera plus rapide et moins limitatif concernant la distance de communication entre les sources.

5.5 Résultats et discussion de l'expérimentation

Pour la partie fonctionnelle du SMA implémentée sur carte de développement, nous n'avons rencontré que peu de problèmes. On retrouve sur Internet toutes les informations concernant le développement du programme avec les bibliothèques adéquates pour accéder aux fonctions de la carte. Dans une étape future, on devra finaliser l'étude par un essai sur un petit système hybride avec GED. Un système expérimental de 1 kW est à l'étude pour tester le système complet en simulant les sources sur chacune des cartes de développement. Chacune des sources sera en mesure de fournir 500 W sauf pour le GED qui devra fournir 1 kW.

5.6 Conclusion

Pour conclure ce chapitre, le mode de gestion par agents démontre que pour des systèmes complexes qui sont difficilement modélisables du point de vue mathématique, il est plus qu'avantageux d'utiliser ce mode de gestion que d'utiliser des modèles conçus par la méthode analytique. La rapidité à laquelle réagi le système de gestion d'énergie pour contenir la tension du bus principal autour d'une valeur prescrite donne un nouveau souffle à la recherche sur les systèmes hybrides à énergies renouvelables.

6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusion

La portée de l'étude a permis de mettre en évidence la complexité d'implémentation d'un SMA tout en démontrant la simplicité d'un tel système lors de sa mission de contrôle d'un système électrique hybride. La contribution dans cette recherche a été de réaliser un gestionnaire d'énergie pour un SHEDAC en utilisant un système multi-agents pour le contrôle d'un système électrique hybride AC-CC-CA, le contrôle s'effectuant sur des convertisseurs CC-CC et CA-CC par le biais d'un contrôle du rapport cyclique permettant aux convertisseurs de fournir la demande en puissance requise afin de maintenir constant le réseau CC. Nous avons également utilisé une méthode ascendante contrairement à une méthode descendante, i.e. que nous avons mis l'emphasis sur un contrôle fermé sur chacune des sources avant d'appliquer une solution par agents intelligents, chacune des sources étant indépendantes et s'assurant de son bon fonctionnement, les agents de chacune des sources communiquant entre eux pour régir un objectif global. La méthode descendante qui est couramment mise en application met l'emphasis sur la recherche d'une solution à un comportement global avec l'hypothèse que le comportement des sources est connu pour toutes les situations, ce qui n'est généralement pas le cas car des particularités

surviennent et font que le système engendrera souvent des défaillances qui n'auront pas été prévues lors d'une simulation. On retrouve aujourd'hui une technologie qui emprunte des éléments faisant partie intégrante de l'intelligence artificielle et qui ne peut compenser pour les cas particuliers, on parle notamment des réseaux de neurones, de la logique floue et des bases de connaissances qui contiennent des procédures qu'emploierait un expert dans le domaine d'intérêt.

Notre recherche apporte un air frais sur une méthode de contrôle qui a fait ses preuves tant dans des applications militaires que spatiales. Cette méthode de contrôle élimine les pannes d'un SHEDAC à moins que le GED ne soit défectueux, auquel cas il y aura un autre GED qui prendra la relève en tant que système de sauvegarde de sécurité. Cette méthode de contrôle par système multi-agents permet également l'ajout ou la suppression de sources à énergies renouvelables sans affecter l'opération du système électrique hybride. La méthodologie développée lors de cette étude apporte une sécurité et une fiabilité maximale du système hybride afin d'éviter des pannes intempestives qui se produisent couramment avec les technologies actuelles.

6.2 Recommandations et perspectives

La technologie des batteries se développant à une vitesse fulgurante, il est loisible de penser que très bientôt, le GED sera soit mis au rancart ou sera considéré comme source secondaire pour les cas où les énergies renouvelables

ne pourraient rencontrer la demande étant donné la variabilité du vent et de l'ensoleillement. On est en droit de se doter de solutions intelligentes qui respecteront l'environnement de notre gigantesque vaisseau spatial. Pour tous les systèmes isolés, la solution devra nécessairement passer par un dimensionnement du système hybride et par l'implémentation d'une gestion efficace de l'énergie par agents intelligents. L'optimisation pourra se faire soit par algorithme génétique ou par une autre technique d'optimisation évolutive. Cette recherche est une suite logique à cette thèse lors d'une étude plus approfondie sur l'algorithme génétique ou d'autres méthodes d'optimisation. Dans cette recherche, les conditions météorologiques n'ont pas été prises en comptes et seront intégrées, dans un futur proche, dans le SMA du SHEDAC.

Lors de la simulation, il n'a pas été possible de vérifier convenablement si la méthode SMA que nous avons utilisé pour cette recherche pouvait s'appliquer également comme variante pour le système hybride de comparaison; la démarche était par trop empreinte de lourdeur pour être effectuée efficacement et dans le temps imparti. Cette démarche sera effectuée à la suite de cette thèse.

Pour la partie expérimentale, il restera à vérifier le remplacement de la communication WIFI par une communication par mode CAN. Il faudra vérifier également si celle-ci sera plus appropriée ou non concernant la dynamique du système de gestion. Il faudra bien dimensionner le système hybride de sorte que le stockage pour l'air comprimé et le stockage d'énergie dans le banc de supercondensateur soient suffisant pour rencontrer la puissance moyenne du

réseau pendant 30 minutes au minimum, ceci de manière que le GED soit en pause pendant ce temps minimum. Cela permettra de diminuer considérablement les cycles arrêt-marche qui risquerait d'user prématurément le GED. Le fait d'utiliser l'air comprimé à une pression de 2.5 bars pour la suralimentation du GED améliorera considérablement sa durée de vie et diminuera par le fait même les émanations de CO₂ ainsi que d'autres gaz nocifs pour l'environnement tels que NO_x, SO_x pour n'en nommer que quelques-uns.

Une autre manière d'augmenter la durée de vie du groupe électrogène est d'engager le compresseur à air comprimé lorsque le GED est à 30% de sa charge, le compresseur augmentant la charge du GED pour le faire fonctionner au-delà de sa puissance nominale ce qui encrassera moins les cylindres du GED et permettra de maintenir le SOC du MAC-GEN. Le banc de supercondensateur pourrait également profiter de cette occasion pour augmenter son SOC permettant de soutenir régulièrement le réseau CC du système hybride, ce qui permettra une meilleure inertie du système lors de fluctuation de la ressource éolienne.

6.3 Listes des articles acceptés par les pairs et en révision

- **R.Lepage**, "Contribution to control of the SHEDAC Scheme", Conférence sur les technologies, DOI: 10.13140/RG.2.2.10070.60480, UQAR, 2019,
- M.Issa, H. Ibrahim, **R. Lepage**, A. Ilinca, "A Review and Comparison on Recent Optimization Methodologies for Diesel Engines and Diesel Power Generators", Journal of Power and Energy Engineering. 7:31-56, doi.org/10.4236/jpee.2019.76003, 2019.
- Mohamad Issa , **Richard Lepage** , Adrian Ilinca, Karim Ait-Yahia , Hussein Ibrahim, Mazen Ghandour, "Integrated A Variable Frequency Drive For A Diesel-Generating Set Using The Genset-Synchro Concept", International Journal of Engineering and Technical Research 8(8):232-239, Août 2019.
- H. Ibrahim, M. Issa, **R. Lepage**, A. Ilinca, J. Perron, "Supercharging of Diesel Engine with Compressed Air: Experimental Investigation on Greenhouse Gases and Performance for a Hybrid Wind-Diesel System", Smart grid and Renewable energy, 10, 213-236, ISSN Online: 2151-4844, DOI: 10.4236/sgre.2019.109014, 2019.
- **R. Lepage**, M. Issa, M. Ouhrouche, A. Ilinca, "A Review on Recent Control Methodologies for Hybrid Wind-Diesel Systems", 2019 (Article en preparation et soumission prevue pour 2021).
- **R. Lepage**, M. Ouhrouche, A. Ilinca, M. Issa, "Optimal control of hybrid power system SHEDAC (Wind-Diesel-Compressed Air) using Multi-Agent System", 2019 (Article en preparation et soumission prevue pour 2021)
- **Richard Lepage**, Philippe Beaulac, Mohamad Issa, Adrian Ilinca. *Sizing MAS-SHEDAC optimisation using genetic algorithm*. (Article en preparation et soumission prevue pour 2021).

Références:

<https://orcid.org/0000-0001-5070-2148>

<https://www.researchgate.net>

BIBLIOGRAPHIE

- [1] T. Weis, A. Ilinca, and J. S. Pinard, "Perspectives on barriers to remote wind–diesel power plants in Canada," *Energy Policy*, vol. 36, no. 5, pp. 1611-1621, 2008.
- [2] G. d. Canada, ""Status of remote/off-grid communities in Canada"," *Ressources naturelles Canada*. [Online]. Available: https://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/canmetenergy/files/pubs/2013-118_en.pdf
- [3] H. Ibrahim, M. Issa, R. Lepage, A. Ilinca, and J. Perron, "Supercharging of Diesel Engine with Compressed Air: Experimental Investigation on Greenhouse Gases and Performance for a Hybrid Wind-Diesel System," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 10, pp. 213-236, 2019.
- [4] H.-Q. Distribution, "Réseaux autonomes, portrait d'ensemble et perspectives d'avenir : Demande R3776-2011."
- [5] Perspective Monde. "Site de recherche sur les émission de CO2 dans le monde." <http://perspective.usherbrooke.ca/>. <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/tend/CAN/fr/EN.ATM.CO2E.PC.html> (accessed 2019).
- [6] Knowles, "Electricity for Canada's remote communities," *The conference board of Canada*, 2016.
- [7] M. Issa, H. Ibrahim, R. Lepage, and A. Ilinca, "A Review and Comparison on Recent Optimization Methodologies for Diesel Engines and Diesel Power Generators," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 7, pp. 31-56, 2019.
- [8] H. Ibrahim, "Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé," Doctorat, Ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, 2010.
- [9] T. Basbous, "ÉTUDE DE FAISABILITÉ D'UN JUMELAGE ÉOLIEN — DIESEL AVEC STOCKAGE D'ÉNERGIE SOUS FORME D'AIR COMPRIMÉ," Master, UQAR, 2009.
- [10] G. Fay, Katherine Keith, and Tobias Schwörer. (2010). Alaska Isolated Wind-Diesel Systems: Performance and Economic Analysis.
- [11] H. Ibrahim. and M. Ghandour., "Optimization of Energy Management of a Microgrid Based on Solar-Diesel-Battery Hybrid System," presented at the MATEC Web of Conferences, 2018.
- [12] P. Arul, V. K. Ramachandaramurthy, and R. Rajkumar, "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 597–608, 2015.
- [13] V Pop, H J Bergveld, P H L Notten, and P. P. L. Regtien, "State-of-the-art of battery state-of-charge determination," *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*, no. 16, 2005.

- [14] A. Serpi, M. Porru, and A. Damiano, "An Optimal Power and Energy Management by Hybrid Energy Storage Systems in Microgrids.," *Energies*, no. 10, 2017.
- [15] Y. H. Saad, "Gestion optimale des systèmes hybrides pour la production de l'énergie dans les sites isolés," Doctorat, École Doctorale SPIM Spécialité énergétique, UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ HAL Archives-ouvertes.fr, 2018.
- [16] Y. Kalinci, A. Hepbasli, and I. Dincer, "Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options," *Int. J. Hydrogen Energy*, no. 40, pp. 7652–7664, 2015.
- [17] A. Muzaffara., M. B. Ahamed., K. Deshmukha., and J. Thirumalaib, "A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 123–145, 2019.
- [18] J. Xie., P. Yang., Y. Wang., T. Qi., Y. Lei., and C. M. Li., "Puzzles and confusions in supercapacitor and battery: Theory and solutions," *Journal of Power Sources*, vol. 401, pp. 213–223, 2018.
- [19] M. E. Amiryar. and K. R. Pullen., "A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications," *Applied. Sciences.*, no. 7, p. 286, 2017.
- [20] 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 télécommunication isolée," *EJEE Réseaux isolés*, pp. 701-731, 2009.
- [21] H. Ibrahim, R. Younes, A. Ilinca, and J. Perron, "Investigation des générateurs hybrides d'électricité de type éolien-air comprimé," presented at the Revue des Energies Renouvelable, CER'07 Oujda, 2007.
- [22] W. Q. Jeffries, "Analysis and modeling of wind/diesel systems without storage," PhD, 1994.
- [23] G. Huppman, "Wind Energy Converter For Aerobic Treatment Of Sewage," *Wind-Diesel and Wind Autonomous Energy Systems*, vol. 1, pp. 109-118, 1988.
- [24] R. Gagnon., B. Saulnier., G. Sybille., and P. Giroux., "Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using MATLAB®/Power System Blockset," presented at the Global Windpower Conference, Paris, France, Avril, 2002.
- [25] B. Saulnier., A. O. Barry., B. Dube., and R. Reid., "Design and Development of a Regulation and Control System for the High-Penetration No-Storage Wind/Diesel Scheme," presented at the European Community Wind Energy Conference Herning, Denmark, 6-10 june, 1988.
- [26] R. Gagnon and B. Saulnier, "Engineering of wind-diesel systems using Matlab/Power system blockset," Anchorage, Alaska, 23-24 september, 2002: Wind Diesel 2002 Workshop, Hotel Captain Cook.
- [27] L. Mott. and B. Saulnier., "Commercial Wind-Diesel Project, St. Paul Island, Alaska," presented at the 14th Prime Power Diesel Inter-Utility Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada, May 28-June 2, 2000.

- [28] K. T. V. Gevorgian, "“Wind-Diesel Hybrid Systems for Russia’s Northern Territories”, " Burlington, Vermont, 20-23 juin, 1999: Wind Power 1999, National Renewable Energy Laboratory.
- [29] M. C. A.J. Bowen, N. Zakay. (2001) "The performance of a remote wind-diesel power system". *Renewable Energy*.
- [30] I. Kamwa, B. Saulnier, and R. Reid, "Petri net based specification of a real-time supervisory controller for an autonomous wind-diesel system," *Electric Power Systems Research*, vol. 21, no. 3, pp. 203-216, 1991.
- [31] P. B. Malatesta, M. P. Papadopoulos, and G. Stavrakakis, "Modeling and identification of diesel-wind turbines systems for wind penetration assessment," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 1091-1097, 1993.
- [32] F. Perron, "Stratégie de commande pour un système hybride éolien diésel avec stockage d’air comprimé," Master, Énergies Renouvelables et efficacité énergétique, École de Technologie Supérieure, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2016.
- [33] T. A. T. Tamaghe, "Modélisation et simulation d’un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale," Master, Université du Québec à Trois-Rivières (UQAT), 2012.
- [34] F. Olsina and C. Larisson, "Optimization of Spinning Reserve in Standalone Wind-Diesel Power Systems," *Wind Power*, p. 558, 2010.
- [35] S. Lotfi, T. Farid Lotfi, and M. Ghiamy, "Optimal Design of a Hybrid Solar -Wind-Diesel Power System for Rural Electrification Using Imperialist Competitive Algorithm," *International Journal of Renewable Energy Research IJRE*, vol. 3, no. 2, pp. 403-411, 2013.
- [36] M. Ghada, C. Berger, and D. U. Sauer, "Optimization of an off-grid hybrid PV–Wind–Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm," *Solar Energy*, vol. 97, pp. 460 - 473, 2013.
- [37] T. Basbous, R. Younes, A. Ilinca, and J. Perron, "Pneumatic hybridization of a diesel engine using compressed air storage for wind-diesel energy generation," *Energy*, vol. 38, no. 1, pp. 264 - 275, 2012.
- [38] F. M. Crotagino, Klaus-Uwe & Scharf, Roland., " Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation. ," presented at the Nat Gas., 2001.
- [39] M. Saadat. and P. Y. Li., "Modeling and Control of a Novel Compressed Air Energy Storage System for Offshore Wind Turbine," presented at the 2012 American Control Conference, Fairmont Queen Elizabeth, Montréal, Canada, June 27-June 29, 2012, 2012.
- [40] H. Ibrahim., K. Belmokhtar., and M. Ghandour., "Investigation of Usage of Compressed Air Energy Storage for Power Generation System Improving - Application in a Microgrid Integrating Wind Energy," *Energy Procedia*, no. 73, pp. 305 – 316, 2015.
- [41] A. H. Alami., K. Aokal., J. Abed., and M. Alhemyari., "Low pressure, modular compressed air energy storage (CAES) system for wind energy storage applications," *Renewable Energy*, no. 106, pp. 201-211, 2017.

- [42] A. Odukumaiya. *et al.*, "Thermal analysis of near-isothermal compressed gas energy storage system," *Applied Energy*, no. 179, pp. 948–960, 2016.
- [43] H. Wang., L. Wang., X. Wang., and E. Yao., "A Novel Pumped Hydro Combined with Compressed Air Energy Storage System," *energies*, no. 6, pp. 1554-1567, 2013.
- [44] E. Planas, J. Andreu, J. I. Gárate, I. Martínez de Alegría, and E. Ibarra, "AC and DC technology in microgrids: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 726–749, 2015.
- [45] A. Elsayed, A. Mohamed, and O. Mohammed, "DC microgrids and distribution systems: An overview," *Electric Power Systems Research*, vol. 119, pp. 407 - 417, 2015.
- [46] M. Sechilariu and F. Locment, Eds. *Urban DC Microgrid: Intelligent Control and Power Flow Optimization*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [47] A. Dizqah, A. Maheri, K. Busawon, and P. Fritzson, "Standalone DC microgrids as complementarity dynamical systems: Modeling and applications," *Control Engineering Practice*, vol. 35, pp. 102 - 112, 2015.
- [48] H. Tazvinga, "Switched model predictive control for energy dispatching of a photovoltaic-diesel-battery hybrid power system.," *IEEE Trans Control Syst Technol*, vol. 23, pp. 1229-1236, 2015.
- [49] A. dizqah, A. Maheri, K. Busawon, and A. Kamjoo, "A multivariable optimal energy management strategy for standalone DC microgrids.," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 30, pp. 2278-2287, 2015.
- [50] S. Pourmousavi, M. Nehrir, and R. Sharma, "Multi-timescale power management for islanded microgrids including storage and demand response. ," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 6, pp. 1185-1195, 2015.
- [51] S. Mishra, D. Ramasubramanian, and P. Sekhar, "A seamless control methodology for a grid connected and isolated PV-diesel microgrid.," *IEEE Trans Power Syst*, vol. 28, pp. 4393-4404, 2013.
- [52] M.Surya and S.Karthikeyan, "Energy Management Using Battery And Ultra Capacitor Of Wind Turbine Generating System," *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS)*, vol. Vol. 2, no. 1, January 2016.
- [53] R. Chakole., M. V. Palandurkar., and M. M. Renge., "Energy Management of Supercapacitor with DC-DC Converter," presented at the 1st IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2016), 2016.
- [54] D. C. Tarraf., "Control of Hybrid Systems: a Robust Finite State Machine Approach," University of California at Berkeley, 2006.
- [55] P. G. Rullo., R. Costa-Castelló., V. Roda., and D. Feroldi., "Energy Management Strategy for a Bioethanol Isolated Hybrid System: Simulations and Experiments," *energies (MDPI)*, no. 11, p. 1362, 2018.
- [56] J. Lagorse, M. G. Simoes, and A. Miraoui, "A multiagent Fuzzy-logic-based energy management of hybrid systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 6, pp. 2123-2129, 2009.

- [57] Yin Changjie, Wu Hongwei, Locment Fabrice, and Sechilariu Manuela, "Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor," *Energy Conversion and Management, Elsevier*, vol. 132, pp. 14-27, 2017.
- [58] G. H. Merabet. *et al.*, "Applications of Multi-Agent Systems in Smart Grids: A Survey," *IEEE*, 2014.
- [59] M. h. Rebhi, A. Benatallah, and M. Sellam, "Fuzzy logic control for Photovoltaic- Diesel Hybrid System.," 2019.
- [60] Z. Roumila., D. Rekioua., and T. Rekioua., "Energy management based fuzzy logic controller of hybrid system wind/photovoltaic/diesel withstorage battery," *international journal of hydrogen energy*, no. 42, pp. 19525-19535, 2017.
- [61] R. Todd., D. Wu., J. A. d. S. Girio., M. Poucand., and A. J. Forsyth., "Supercapacitor-Based Energy Management for Future Aircraft Systems," *IEEE*, 2010.
- [62] M. A. Tankari., M. B. Camara., B. Dakyo., and G. Lefebvre., "Use of Ultracapacitors and Batteries for Efficient Energy Management in Wind–Diesel Hybrid System," *IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY*, vol. 4, no. 2, 2013.
- [63] B. Sami., N. Sihem., S. Gherairi., and C. Adnane., "A Multi-Agent System for Smart Energy Management Devoted to Vehicle Applications: Realistic Dynamic Hybrid Electric System Using Hydrogen as a Fuel," *Energies*, vol. 12, 2019.
- [64] A. M. A. El-Rahim., M. Abd_El-Geliel., and A. Helal., "Micro Grid Energy Management Using Multi-agent Systems," *IEEE*, 2016.
- [65] The Mathworks Inc, *Stateflow: Getting Started Guide*, MathWorks, ed., 2019, p. 70.
- [66] MathWorks. "Stateflow documentation." <https://www.mathworks.com/help/stateflow/> (accessed sept 2019, 2019).
- [67] N. D. H. McArthur Stephen DJ, Victoria M. Catterson, Toshihisa Funabashi, "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part I: Concepts, Approaches and Technical Challenges," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. VOL. 22, NO. 4, NOVEMBER 2007.
- [68] E. M. D. S. D. J. McArthur, V. M. Catterson, A. L. Dimeas, N. D. Hatziaargyriou, F. Ponci, T. Funabashi, "Multi-Agent Systems for Power Engineering Applications—Part 2: Technologies, Standards, and Tools for Building Multi-Agent Systems," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. VOL. 22, NO. 4,, NOVEMBER 2007.
- [69] E. Natsheh and A. Albarbar, "Hybrid Power Systems Energy Controller Based on Neural Network and Fuzzy Logic," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 187-197, 2013.
- [70] M. Koulali., M. Mohamed, N. Karim, and M. Abdelkader, "Energy Management of Hybrid Power System PV Wind and Battery Based Three Level Converter," *Italian Journal of Engineering Science*, vol. 63, no. 2-4, pp. 297-304, 2019.
- [71] M. Glavic, "Agents and Multi-Agent Systems: A Short Introduction for Power Engineers," *University of Liege, Electrical Engineering and Computer Science Department*, Technical Report 2006.

- [72] J. Palanca. "SPADE documentation, 2017." <https://spade-mas.readthedocs.io/en/latest/readme.html> (accessed sept, 2019).
- [73] J. Ferber, "Les systèmes multi-agents: un aperçu général," *Techniques et Science informatiques*, vol. 16, no. 8, pp. 979-1012, 1997.
- [74] M. Wooldridge, "Agent-based software engineering," *In IEEE Proceedings on Software Engineering*, 1997.
- [75] S. J. Russell and P. Norvig, P. Hall, Ed. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, 2nd ed. New Jersey: Upper Saddle River, 2003.
- [76] L. Vercoeur, "Conception et mise en oeuvre de systèmes multi-agents ouverts et distribués," PhD, Informatique, l'Université Jean Monnet et de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, 2000.
- [77] J.-P. Sansonnet, "Modèles de programmation et Architectures Multi Agents, Approches Concurrentes et Cellulaires," ed. LIMSI-CNRS, 2004.
- [78] L. Zaffalon, Ed. *Programmation concurrente et temps réel avec Java.*: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2007.
- [79] J. Lagorse, D. Paire, and A. Miraoui, "A multi-agent system for energy management of distributed power sources," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 174-182, 2010.
- [80] J. G. Gomez-Gualdron and M. Velez-Reyes, "Simulating a multi-agent based self-reconfigurable electric power distribution system," *Proc. of SPIE*, vol. 6229, pp. 1-7, 2006.
- [81] I. S. Baxevanos and D. P. Labridis, "Implementing multiagent systems technology for power distribution network control and protection management," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 433-442, 2007.
- [82] P. Pant, K. Schoder, and A. Feliachi, "An integrated electric shipboard power system testbed," *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, pp. 438-442, 2007.
- [83] S. Knox., P. Meier., J. Yoon., and J. J. Harou., "A python framework for multi-agent simulation of networked resource systems," *Environmental Modelling & Software*, vol. 103, pp. 16-28, 2018.
- [84] Python Software Foundation. "SPADE 3.1.4, Multi-Agents Platform." <https://pypi.org/project/spade/> (accessed Nov, 2019).
- [85] F. Michel., J. Ferber., and O. Gutknecht. "MaDKit 5.3." <http://www.madkit.net/madkit/repository/MaDKit-5.3/README.html> (accessed november, 2019).
- [86] J. Ferber., F. Michel., and O. GUTKNECHT. "MaDKit The multiagent development kit." <http://www.madkit.net/madkit/> (accessed November, 2019).
- [87] H. Fangohr., "Introduction to Python for Computational Science and Engineering (A beginner's guide)," p. 167, 2015.

- [88] A. Amato., M. Scialdone., and S. Venticinque., "An application of learning agents to smart energy domains," in *Proc. of the 16th Workshop "From Object to Agents" (WOA15)*, Naples, Italy, June 17-19 2015.
- [89] H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable," ENSAM, Bordeaux, 2003.
- [90] M. Zandi., A. Payman., J.-P. Martin., S. Pierfederici., B. Davat., and F. Meibody-Tabar., "Energy Management of a Fuel Cell/Supercapacitor/Battery Power Source for Electric Vehicular Applications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 2 pp. 433–443, 2011.
- [91] RENESAS. "How to Charge Supercapacitor Banks for Energy Storage." <https://www.renesas.com/cn/en/products/power-management/pwm-switching-controller/how-to-charge-supercapacitor-banks.html> (accessed 26 Août, 2019).
- [92] M. A. DJEHAF., S. A. ZIDI., and Y. D. KOBIBI., "AC Versus DC Link Comparison Based on Power Flow Analysis of a Multimachine Power System," *Leonardo Journal of Sciences* no. 24, pp. 61-74, 2014.
- [93] S. Njoya Motapon, L.A. Dessaint, and K. Al-Haddad, "A Comparative Study of Energy Management Schemes for a Fuel Cell Hybrid Emergency Power System of More Electric Aircraft," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013.
- [94] Iorin Leon, Marcin Paprzycki, and M. Ganzha, "A Review of Agent Platforms," *Multi-Paradigm Modelling for Cyber-Physical Systems (MPM4CPS)*, vol. ICT COST Action IC1404, no. Technical Report, 2018.
- [95] R. Geetha, V. Chithambaram, and K. Shunmuganathan, "COMPARATIVE STUDY OF JADE AND SPADE MULTI AGENT SYSTEM," *International Journal of advanced Research IJAR*, vol. 6, no. 11, pp. 1035-1042, 2018.
- [96] W. Lawrenz, *CAN System Engineering From Theory to Practical Applications*. Springer, 1997.
- [97] K. M. Stanislav Safaric, "ZigBee wireless standard," in *48th International Symposium ELMAR-2006, 07-09 June 2006, Zadar, Croatia*, 2006.
- [98] ISO. "Road vehicles — Controller area network (CAN) 11898-1:2015." <https://www.iso.org/standard/63648.html> (accessed september, 2019).
- [99] K. Ismail, A. Muharam, and M. Pratama, "Design of CAN Bus for Research Applications Purpose Hybrid Electric Vehicle Using ARM Microcontroller," *Energy Procedia*, no. 68, pp. 288-296, 2015.
- [100] J. Kridner. "System Reference Manual PocketBeagle." (accessed Septembre 15, 2019).
- [101] R. C. Nelson. "PocketBeagle getting start: Linux on ARM." <https://forum.digikey.com/t/pocketbeagle-getting-started/567> (accessed sept 15, 2019).
- [102] J. Kridner and C. Long. "beagleboard.org." <http://beagleboard.org/pocket> (accessed sept 15, 2019).
- [103] MEDIATEK Labs. "Linkit Smart 7688 Resources." <https://docs.labs.mediatek.com/resource/linkit-smart-7688/en/documentation> (accessed sept, 2019).

- [104] present-PlatformIO. "LinkIt Smart 7688 Duo Contents." <https://docs.platformio.org/en/latest/boards/atmelavr/smart7688.html> (accessed sept, 2019).
- [105] MEDIATEK Labs, *MediaTek LinkIt™ Smart 7688 Developer's Guide*, 2015, p. 97. Accessed on: sept 2019.
- [106] Amazon Web Services, *AWS Cloud9: User Guide*, Amazon, ed., 2019.
- [107] A. Škraba, R. Stojanović, A. Zupan, A. Koložvari, and D. Kofjač, "Speech-controlled cloud-based wheelchair platform for disabled person.," *Microprocessors and Microsystems*, vol. Vol. 39, no. 8, pp. 819–828, 2015.

La carte de développement PocketBeagle

Le microcontrôleur qui a été utilisé lors de l'expérimentation est présenté aux Figure A-1 et Figure A-2. Sur la Figure A-1, on peut voir le processeur, le port USB à gauche du processeur qui sert à la programmation et un connecteur de carte microSD à la droite du processeur. On demande un minimum de 4 GB d'espace mémoire pour contenir le système d'exploitation LINUX ainsi que le programme principal. La capacité maximale de la carte microSD est de 128 GB. Les données d'opération de tout le système sont sauvegardées par pas de 1 minute et ensuite compressées pour optimiser au maximum la place nécessaire pour enregistrer des données d'opération durant une année complète.

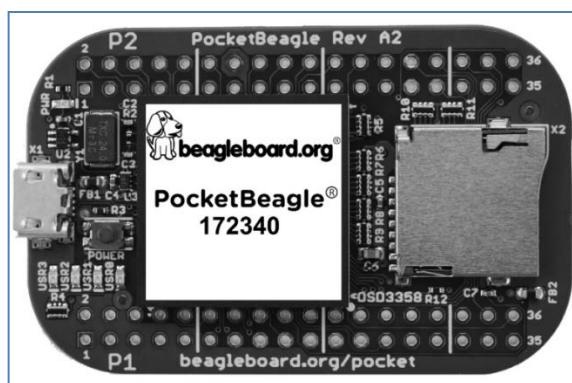


Figure A-1 - Module PocketBeagle côté processeur [102]

Pour la Figure A-2, on retrouve la configuration pour les broches en entrée et en sortie dont le détail est présenté aux figures A-3 et A-4. On peut donner

Sur les figures A-3 et A-4 sont présentées les signaux disponibles sur les ports d'entrées-sorties de la carte PocketBeagle. La communication s'effectue sur le port CAN0. Durant l'expérimentation, nous avons utilisé le port UART0 représenté par les broches TX et RX.

P1												
SYS		VIN	1	2	87			6	AIN 3.3V	9	PRU1	
USB1	V_EN	GPIO	109	3	4	89				11	PRU1	
USB1		VBUS	5	6	5	GPIO		CS	SPI0	TX	PRU	
		VIN	7	8	2			CLK		RX	UART2	
		DN	9	10	3			MISO		TX		
		DP	11	12	4			MOSI		RX	PRU	
		ID	13	14	3.3V							
		GND	15	16	GND	SYS						
AIN 1.8V		REF-	17	18	REF+	AIN 1.8V						
		0	19	20	20	GPIO			16(in)	PRU0		
		1	21	22	GND	SYS						
		2	23	24	VOUT							
		3	25	26	12							
		4	27	28	13	GPIO		SDA	I2C2	TX	CAN0	
		117	29	30	43			SCL	RX			
PRU0	7	QEP0	STRB	A				TX	UART0	15	PRU1	
		114	31	32	42					RX	14	
		110	33	34	26							
PRU1	10	1	PWM0	B					A	PWM0	0	PRU0
		88	35	36	110							

189

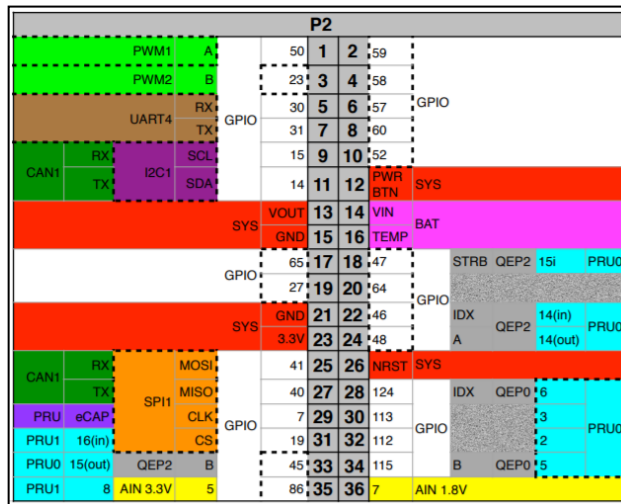


Figure A-4 - Détail de la seconde couche de signaux de la carte contrôleur [101]

Cette carte dispose de deux ports de communication par mode CAN, soit CAN0 que l'on retrouve sur la première couche de signaux et CAN1 sur la seconde couche. On présente à la page suivante deux courts programmes pour l'envoi (Figure A-5) et la réception de messages par mode CAN (Figure A-6). Ces programmes sont codés en langage python, la version de python étant 2.7. Dans le cadre de l'expérimentation, c'est la version 3.6 de python qui a été utilisé dans l'environnement LINUX de la carte PocketBeagle.

Exemple de communication par mode CAN

On présente aux figures A-5 et A-6 deux exemples d'utilisation du mode CAN codé en langage python. La figure A-5 permet l'envoi de message tandis que la figure A-6 permet la réception du message. Ces deux procédures sont incluses

dans chacun des agents. Comme la communication est asynchrone, nous avons associé un vecteur d'interruption qui redirige l'exécution du programme de prise de jeton vers la procédure de lecture du message. Selon le contenu du message reçu, le programme est dérouté vers une procédure de lancement d'un message vers le tableau noir. Ce tableau est ensuite lu par les autres agents. Les informations recueillis dans ce tableau renseigne sur quel agent a le jeton de contrôle et quelles sont les disponibilités des autres sources. Cela renseigne également sur la bonne marche des opérations sur chacun des agents ainsi que leurs existences.

```
// Le nom du programme est sendcan.py

#!/usr/bin/python

import can
can.rc['interface'] = 'socketcan_ctypes'

from can.interfaces.interface import Bus
from can import Message

def main():
    can_interface = 'can1'
    bus = Bus(can_interface)

    print "Send a message..."
    Message.extended_id = True
    Message.is_remote_frame = False
    Message.id_type = 1
    Message.is_error_frame = False
    Message.arbitration_id = 0x00E07123
    Message.dlc = 1
    Message.data = [ 0x01]
    try:
        bus.send(Message);
    except:
        print "Ups something went wrong!"

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Figure A-5 Exemple d'envoi de message par mode CAN codé en python. @Richard Lepage

```
#!/usr/bin/python
import datetime
import time
import can

can.rc['interface'] = 'socketcan_ctypes'
from can.interfaces.interface import Bus
from can import Message

def check_rx(id,data):
    now = datetime.datetime.now()
    timeString = now.strftime("%d.%m.%Y %H:%M:%S ")
    print timeString," ID ",id," Data",data

def main():
    can_interface = 'can1'
    bus = Bus(can_interface)

    try:
        while True:
            Message = bus.recv(0.0)
            if Message:
                check_rx(Message.arbitration_id, Message.data[0])

    except KeyboardInterrupt:
        bus.shutdown()

if __name__ == "__main__":
    main()
```

Figure A-6 Exemple de réception de message en mode CAN codé en python. @Richard Lepage

Pour une utilisation en mode WIFI, il est possible d'ajouter un connecteur USB à la carte PocketBeagle qui portera un dongle WIFI comme le montre la Figure A-7 et la Figure A-9. On devra configurer le mode WIFI dans l'environnement LINUX. Les démarches de configuration pour ce mode se trouvent aisément sur Internet. On présente également à la Figure A-8 une autre configuration du branchement qu'il faut effectuer sur la carte PocketBeagle afin de brancher un port USB externe. Le port mini-USB existant sur la carte mère est dédié uniquement pour la programmation.

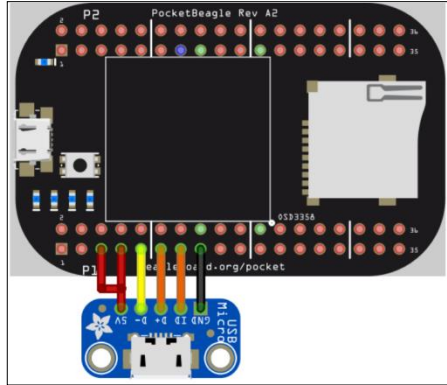


Figure A-7 Branchement du connecteur USB externe pour Dongle WIFI. @Richard Lepage

Une autre configuration qui permet de brancher un connecteur USB qui portera le dongle WIFI.

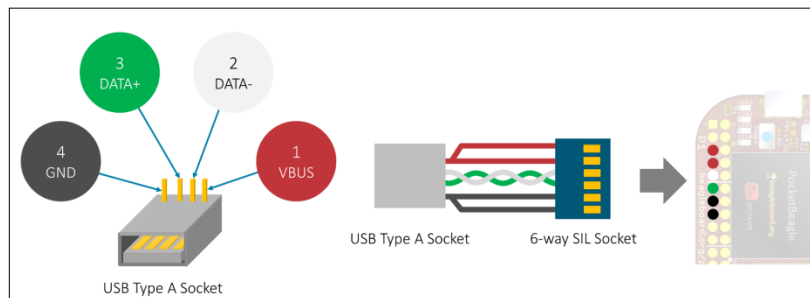


Figure A-8 Branchement du connecteur USB1 sur carte PocketBeagle. @Richard Lepage



Figure A-9 Dongle WIFI qui se branche dans le port USB. @Richard Lepage

Programmation du PID en langage python

Pour le contrôle des convertisseurs de tension, on utilise un contrôle PID numérique. Le PID est constitué des blocs suivants apparaissant à la Figure A-10. La variable $r(t)$ est la consigne, $e(t)$ l'erreur entre la sortie $y(t)$ et la consigne et finalement $u(t)$ le procédé appliqué au processus.

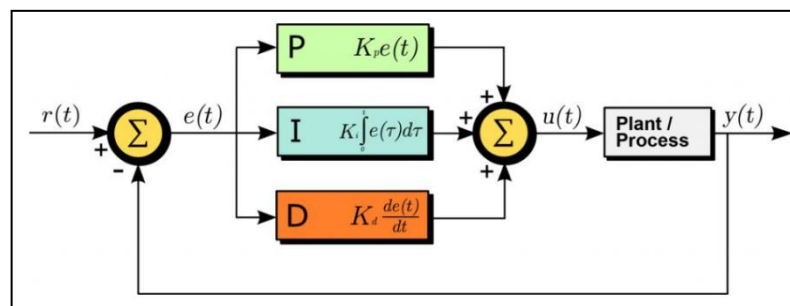


Figure A-10 Diagramme par blocs d'un contrôleur PID. @Richard Lepage

Pour programmer le PID dans le contrôleur, nous avons utilisé le code présenté à la Figure A-11, code écrit en langage python. Les paramètres et fonctions associés au contrôleur PID proviennent du module PID qui contient la classe PID. À cette classe est associée des propriétés et des méthodes qui seront utilisées dans le programme principal qui apparaît à la Figure A-13. La Figure A-11 présente un exemple de configuration du contrôleur PID. On retrouve cette configuration dans le code de la Figure A-12 lors de la définition de la fonction ReadConfig(). La fonction CreateConfig() écrit cette configuration dans un fichier

texte du nom de pid.conf. Ce fichier est par la suite utilisé par la fonction ReadConfig().

```
import PID
import time
import os.path

from OmegaExpansion import AdcExp
from OmegaExpansion import pwmExp

pwmExp.setVerbosity(-1)
pwmExp.driverInit()
adc = AdcExp.AdcExp()

targetT = 35
P = 10
I = 1
D = 1

pid = PID.PID(P, I, D)
pid.SetPoint = targetT
pid.setSampleTime(1)
```

Figure A-11 Section d'initialisation des paramètres de contrôle. @Richard Lepage

```
def readConfig ():
    global targetT
    with open ('/tmp/pid.conf', 'r') as f:
        config = f.readline().split(',')
        pid.SetPoint = float(config[0])
        targetT = pid.SetPoint
        pid.setKp (float(config[1]))
        pid.setKi (float(config[2]))
        pid.setKd (float(config[3]))

def createConfig ():
    if not os.path.isfile('/tmp/pid.conf'):
        with open ('/tmp/pid.conf', 'w') as f:
            f.write('%s,%s,%s,%s'%(targetT,P,I,D))
```

Figure A-12 Vérification entre la sortie et la consigne. @Richard Lepage

Dans cette portion de code, on retrouve deux procédures, soit la lecture de la consigne et la lecture de la sortie après application de la consigne par

l'exécution de la procédure "readConfig()" et ensuite une seconde procédure "createConfig()" qui écrit le résultat du contrôleur. On retrouve ensuite le programme principal représenté par la Figure A-13.

```
while 1:
    readConfig()
    #read temperature data
    a0 = adc.read_voltage(0)
    temperature = (a0 - 0.5) * 100

    pid.update(temperature)
    targetPwm = pid.output
    targetPwm = max(min( int(targetPwm), 100 ),0)

    print "Target: %.1f C | Current: %.1f C | PWM: %s %%"%(targetT, temperature, targetPwm)

    # Set PWM expansion channel 0 to the target setting
    pwmExp.setupDriver(0, targetPwm, 0)
    time.sleep(0.5)
```

Figure A-13 - Programme principal du contrôleur PID. @Richard Lepage

Pour trouver les valeurs optimales de contrôle, nous pouvons construire une procédure qui établira, selon la méthode proposée, les paramètres de contrôle. La configuration optimale des paramètres fait en sorte que le dépassement soit minimal avec un temps le plus court possible et la meilleure stabilité possible à l'atteinte de la consigne. Cette stabilité dépendra du seuil d'évolution de la consigne en prenant l'hypothèse d'une certaine linéarité du processus exempte de perturbation extérieure. Si on se retrouve avec des perturbations liées à un vieillissement des composants, on devra réajuster les paramètres du PID pour obtenir l'équilibre recherché dans l'atteinte de la consigne.

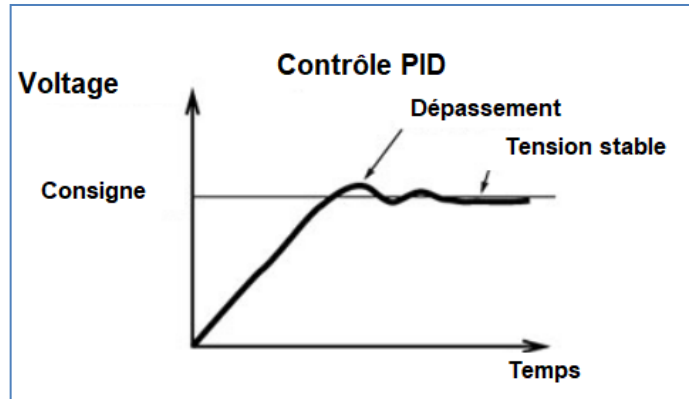


Figure A-14 Évolution de la sortie selon la consigne appliquée, @Richard Lepage

Pour les méthodes de contrôle, nous avons utilisé la méthode par placement des pôles. Dans Matlab, on retrouve plusieurs méthodes efficaces de détermination des paramètres de contrôle utilisant soit la méthode de Ziegler-Nichols, soit une méthode simplifiée dont les paramètres ont été déterminés par l'expérience.

Expérimentation sur la suralimentation en air comprimé du GED.

Pour connaître réellement l'impact que pouvait avoir la suralimentation en air comprimé du GED, une expérience a été réalisée au LIMA à l'université du Québec à Chicoutimi (UQAC) en collaboration avec Mohamad Issa. L'expérience consistait à suralimenter une génératrice de 5 kW entraînée par un moteur diesel de 7,5 kW. On disposait d'un banc d'essai dont plusieurs appareils de mesure donnaient des informations concernant les gaz d'échappement, la consommation de carburant et la charge appliquée sur la génératrice. On montre à la Figure A-15 le banc d'essai ainsi que la configuration du montage qui a donné lieu à la série de graphique de la Figure A-16 à la Figure A-19.

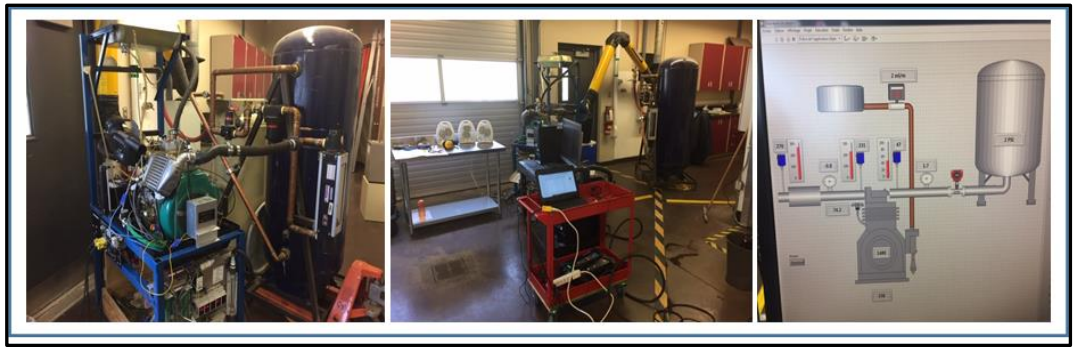


Figure A-15 – Banc d'essai pour la suralimentation du GED. Co-auteur [3]

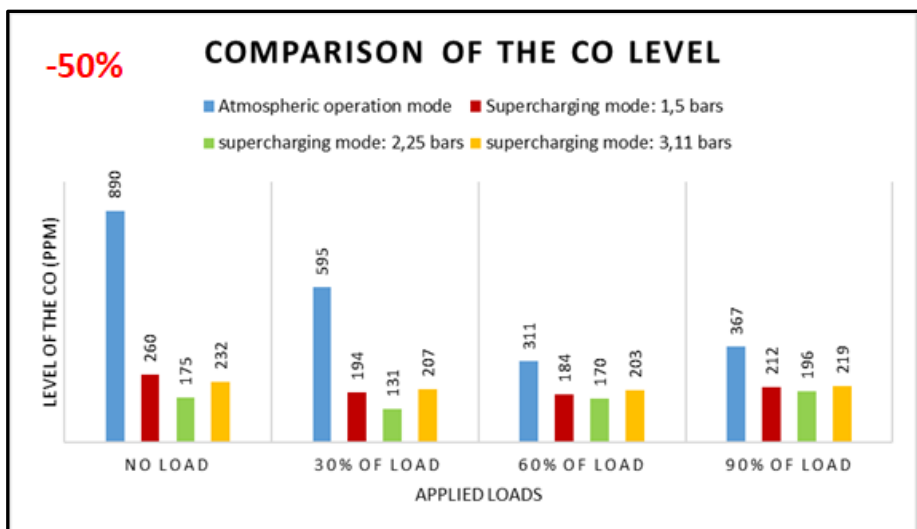


Figure A-16 – Niveaux de CO vs charges et pressions de suralimentation. Co-auteur [3]

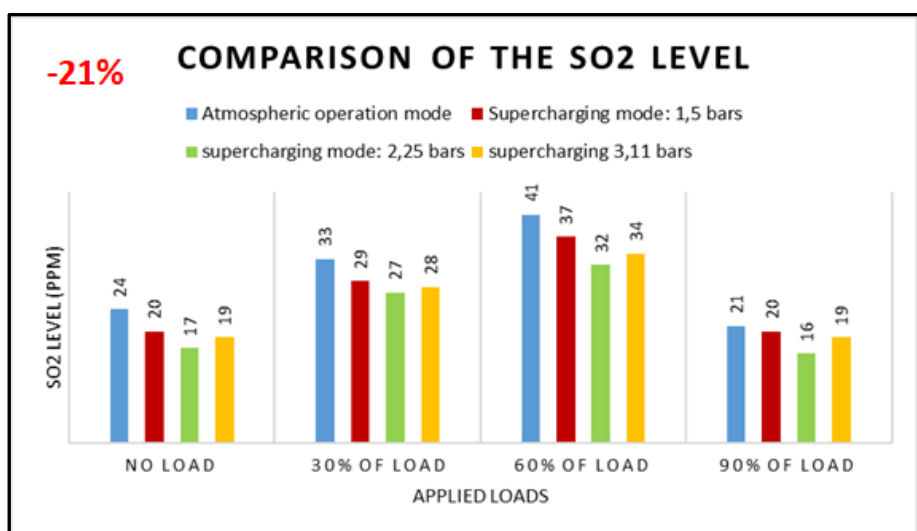


Figure A-17 – Niveaux de SO2 vs charges et pressions de suralimentation. Co-auteur [3]

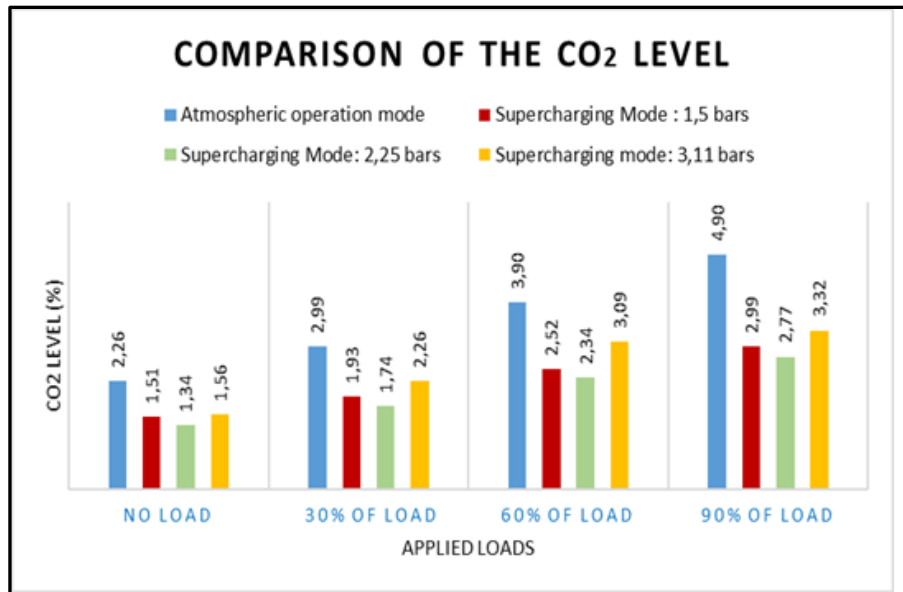


Figure A-18 – Niveau de CO₂ vs charges et pressions de suralimentation. Co-auteur [3]

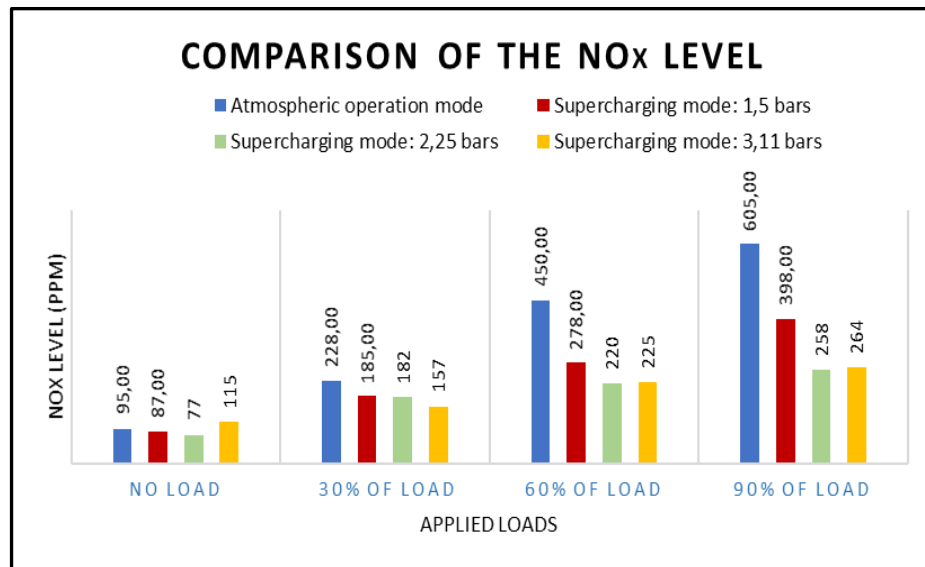


Figure A-19 – Niveaux de No_x vs charges et pressions de suralimentation. Co-auteur [3]

Chacune de ses figures dénotent, selon la charge et la pression de suralimentation appliquée, des comparaisons sur les niveaux d'émanations

d'oxyde de soufre (SO_x), de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂) et des oxydes d'azote (NO_x) qui sont particulièrement très polluant pour l'environnement.