UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

CONTRÔLE ET GESTION D'UN SYSTÈME HYBRIDE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE SOLAIRE-BIOMASSE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MWINTOUR CHRISTELLE MARIE JUSTIN SOMDA

JUILLET 2026

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M.Sc.A.)

Direction de recherche :

Mamadou Lamine DOUMBIA	Directeur de recherche
Abdeldjebar HAZZAB	Codirecteur de recherche

Jury d'évaluation

Mamadou Lamine DOUMBIA	Université du Québec à Trois-Rivières
Hamidou TEMBINE	Université du Québec à Trois-Rivières
Fils Pascal LINGOM	GE Vernova

Résumé

L'accès au réseau électrique demeure limité, voire inexistant dans de nombreuses régions, rurales ou isolées. Cette situation représente un frein au développement socio-économique et justifie le recours à des solutions énergétiques autonomes, fiables et durables. Sur cette lancée, les systèmes hybrides d'énergie renouvelable apparaissent comme une alternative, en combinant différentes sources afin d'améliorer la disponibilité de l'énergie et de réduire les coûts d'exploitation.

Toutefois, l'utilisation des énergies renouvelables est fortement contrainte par la variabilité et l'intermittence de certaines ressources, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque, dont la production dépend directement des conditions climatiques et du cycle jour/nuit. À cet effet, la biomasse constitue une solution particulièrement intéressante, car elle représente une source d'énergie renouvelable pilotable, pouvant fournir une puissance stable dans le système.

Dans ce contexte, ce travail de recherche vise à étudier, modéliser et simuler un système hybride autonome photovoltaïque-biomasse de puissance 10 kW, et à proposer une stratégie de gestion énergétique.

Le système proposé associe un générateur photovoltaïque, commandé par un algorithme de poursuite du point de puissance maximale de type Perturbation et Observation, à une chaîne de conversion biomasse composée d'une turbine à gaz couplée à une génératrice synchrone. Les deux sources sont raccordées à un bus continu commun. La stabilisation de la tension du bus est assurée par un régulateur proportionnel-intégral, tandis qu'une stratégie de gestion énergétique à base de règles permet de coordonner les échanges de puissance entre les sources. L'ensemble du système a été implémenté sous MATLAB/Simulink afin d'évaluer son comportement dynamique face aux variations de

l'irradiance solaire et de la demande énergétique.

Par ailleurs, à partir de données existantes sur la production et la consommation énergétique, un modèle d'intelligence artificielle basé sur un réseau de neurones artificiels à trois couches cachées, a été développé pour la prédiction des variables énergétiques du système dans le but de mieux gérer les besoins en énergie, et également d'établir une priorité d'utilisation des ressources et des charges. L'apprentissage du modèle est réalisé à l'aide de l'algorithme d'optimisation Adam.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration de la biomasse améliore la continuité de service et contribue à la stabilité du bus continu fixé a 470 V. Les performances du convertisseur du bus de connexion sont analysées par un temps de montée et de descente de 1.49 ms et une vitesse de variation de 16.13 ms indiquant une réponse rapide du stabilisateur de bus.

Mots clés: Biomasse, Photovoltaïque, Énergie renouvelable, MATLAB/Simulink, Génératrice synchrone, Algorithme de puissance maximale, Système hybride d'énergie, Régulateur proportionnel-intégral, Intelligence artificielle.

Remerciements

Je ne saurais commencer sans remercier Mon Seigneur et Créateur de m'avoir permis d'en arriver là, merci pour toutes les grâces et bienfaits reçus dans ma vie.

Je tiens à remercier Monsieur Mamadou Lamine DOUMBIA, mon directeur de recherche et Directeur du département de génie électrique et génie informatique à l'Université du Québec à Trois-Rivières pour son assistance, sa disponibilité et ses remarques constructives tout au long de mes recherches.

Également à Monsieur Abdeldjebar HAZZAB, mon codirecteur je vous dis un grand merci, pour votre accompagnement et vos recommandations à l'aboutissement de mes travaux.

Toute ma gratitude aux professeurs du département de génie électrique et génie informatique et à toute l'équipe de l'Université du Québec à Trois-Rivières pour la formation de qualité reçue lors de mon parcours à l'univertsité et dont les différents cours me sont bénéfiques. Également au programme de bourse Universalis Causa pour l'aide financière.

Mes sincères remerciements aussi aux professeurs du jury pour avoir accepté de faire l'évaluation de mon mémoire.

Je conclue cette série en adressant ma reconnaissance à mes parents, frères et amis pour le soutien, les prières et encouragements à mon égard. Un merci particulier à mon frère Christian et son épouse pour l'hospitalité et l'accompagnement depuis mon arrivée au Québec.

Table des matières

Résumé iii

Remerciements v

Table des matières vi

Liste des tableaux ix

Liste des figures x

Liste des symboles xii

Liste des abréviations, sigles et acronymes xiv

Chapitre 1 - Introduction 1

1.1 Contexte et problématique 1

1.2 Objectifs et méthodologie 3

Chapitre 2 - Recherche bibliographique sur les systèmes d'énergie renouvelable ... 5

2.1 Conversion de l'énergie solaire 5

2.1.1 Solaire photovoltaïque 6

2.1.2 Solaire thermique 10

2.2 Généralités sur la biomasse 11

2.2.1 Type et source de biomasse 12

2.2.2 Contraintes logistiques 13

2.2.3 Processus de conversion de la biomasse en énergie et conditions de transformation 13

2.2.4 Applications 16
2.3 Définition et importance des systèmes hybrides 18
2.4 Revue sur les systèmes hybrides solaire-biomasse et leur gestion 19
2.4.1 Disponibilité de la biomasse 20
2.4.2 Exploitation du potentiel et différentes applications 21
2.4.3 Techniques de gestion et d'optimisation des systèmes hybrides à biomasse 23

Chapitre 3 - Modélisation du système hybride solaire-biomasse 29
3.1 Modélisation du système solaire 30
3.1.1 Caractéristique tension-courant 32
3.1.2 Modélisation des convertisseurs 35
3.2 Modélisation du système biomasse 38
3.2.1 Choix de la technologie et caractéristique 38
3.2.2 Modélisation de la turbine et de la machine synchrone 40
3.2.3 Dimensionnement et choix des puissances 48

Chapitre 4 - Contrôle, gestion et simulation du système hybride 51
4.1 Méthode de contrôle 51
4.1.1 Algorithme du point de puissance maximale 53
4.1.2 Régulation du système 55
4.2 Stratégies de gestion 57
4.2.1 Gestion par priorité d'utilisation de la source 57
4.2.2 Gestion par utilisation des charges 59
4.2.3 Gestion par l'intelligence artificielle 59
4.3 Simulation du système hybride 63

4.3.1 Système photovoltaïque 64
4.3.2 Système biomasse 65
4.3.3 Résultats de la gestion du système hybride 67

Chapitre 5 - Conclusion et perspectives 80
5.1 Retombées et impact industriel 80
5.2 Conclusion 81

Annexe A - Représentation du système sous MATLAB/Simulink 89

Annexe B - Représentation de la stratégie de gestion 90

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Tableau comparatif des sources d'énergie 17

Tableau 2-2 Tableau comparatif des méthodes employées 27

Tableau 3-1 Composition élémentaire de la biomasse 39

Tableau 3-2 Pouvoir calorifique inférieur et humidité de différentes biomasses .. 39

Tableau 3-3 Caractéristique panneau PV 49

Tableau 4-1 Méthodes MPPT 52

Tableau 4-2 Paramètres du système hybride 63

Liste des figures

Figure 2.1 Cellule PV de silicium cristallin 6

Figure 2.2 Images des différents types de modules PV 9

Figure 2.3 Organigramme illustratif de la biomasse et des voies de transformation 14

Figure 3.1 Représentation globale du système 29

Figure 3.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule PV 30

Figure 3.3 Caractéristique du courant et de la puissance en fonction de la tension avec variation de l'irradiance 33

Figure 3.4 Caractéristique du courant en fonction de la tension selon la température 34

Figure 3.5 Convertisseur élevateur 36

Figure 3.6 Convertisseur abaisseur 37

Figure 3.7 Circuit équivalent des axes direct et quadratique de la machine synchrone 44

Figure 3.8 Redresseur triphasé 47

Figure 3.9 Schéma du convertisseur de tension 48

Figure 3.10 Schéma bloc du système 50

Figure 4.1 Organigramme de l'algorithme MPPT 54

Figure 4.2 Bloc de commande du convertisseur 56

Figure 4.3 Gestion par priorité de source 58

Figure 4.4 Représentation des données et prédiction 62

Figure 4.5 Schéma du gouverneur et turbine 63

Figure 4.6 Tension du PV avant et après le convertisseur boost 64
Figure 4.7 Puissance du PV 65
Figure 4.8 Tension du système PV 65
Figure 4.9 Vitesse de rotation 66
Figure 4.10 Puissance mécanique 66
Figure 4.11 Puissance et vitesse pour une faible charge 68
Figure 4.12 Puissance et vitesse pour une lourde charge 69
Figure 4.13 Variation au niveau de la charge 70
Figure 4.14 Variation des puissances du système 71
Figure 4.15 Variation des puissances selon la disponibilité des sources 72
Figure 4.16 Variation de la tension, du courant et puissance de charge 73
Figure 4.17 Variation de vitesse et puissance mécanique lors d'un changement de charge 74
Figure 4.18 Variation du courant de la tension au niveau biomasse 74
Figure 4.19 Variation de l'irradiance 75
Figure 4.20 Régulation de la tension au bus continu 76
Figure 4.21 Répartition des puissances 77
Figure 4.22 Stratégie de gestion 78

Figure A.1 Représentation du système global sous MATLAB/Simulink 89

Figure B.1 Stratégie de gestion représentée sous MATLAB/Simulink 90

Liste des symboles

A : Ampère

CRF : Facteur d'ondulation

F : Farad

f_s : Fréquence de commutation en hertz

H : Henry

I_{mp} : Courant au point de puissance maximale

I_0 : Courant de saturation de la diode

I_{ph} : Photocourant

I_{sh} : Courant de shunt

K : Constante de Boltzmann

K_d : Coefficient d'amortissement

P_{max} : Puissance maximale du panneau

PJ : Pétajoule

q : Charge de l'électron (1.6025×10^{-19} C)

R_p : Résistance parallèle

R_s : Résistance série

T_e : Couple électromagnétique

T_m : Couple mécanique

TWh : Térawattheure

V_{oc} : Tension à circuit ouvert

v_f : Tension d'excitation

V_{mp} : Tension au point de puissance maximale

ω_0 : Vitesse de fonctionnement

$\omega(t)$: Vitesse mécanique du rotor

ΔI_L : Courant d'ondulation de l'inductance d'entrée

ΔV_o : Tension d'ondulation de sortie

$\Delta\omega(t)$: Variation de vitesse par rapport à la vitesse de fonctionnement

Liste des abréviations, sigles et acronymes

AC : Alternating Current (Courant Alternatif)

ANN : Artificial neural network (Réseau neuronal artificiel)

CV : Cheval-vapeur

DC : Direct Current (Courant Continu)

DSM : Déchets Solides Municipaux

$C_6H_{12}O_6$: Glucose ou sucre

C_2H_5OH : Éthanol

CO_2 : Dioxyde de carbone

CH_4 : Méthane

CSP : Concentrated Solar Power (Solaire thermodynamique à concentration)

FOCV : Fractional Open Circuit Voltage

FSCC : Fractional Short Circuit Current

GES : Gaz à Effet de Serre

IA : Intellligence Artificielle

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

INC : Incremental Conductance

kVA : Kilovoltampère

MAE : Mean absolute Error (Erreur moyenne absolue)

MOSFET : Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

MPPT : Maximum Power Point Tracking

MSE : Mean square error (Erreur quadratique moyenne)

PCI : Pouvoir Calorifique inférieur

PCS : Pouvoir Calorifique Supérieur

PPM : Point de Puissance Maximal

P&O : Perturbation et Observation

PI : Proportionnel Intégral

PMSG : Générateur synchrone à aimant permanent

PV : Photovoltaïque

RMSE : Root mean square error (Racine de l'erreur quadratique moyenne)

RNN : Recurrent neural network (Réseau neuronal récurrent)

SHE : Système Hybride d'Énergie

SIG : Système d'Information Géographique

TAV : Turbine à Vapeur

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Contexte et problématique

L' énergie est un facteur essentiel au développement socioéconomique de tout pays. Elle est indispensable à l'homme et la demande énergétique augmente avec la croissance démographique. Cette demande est majoritairement satisfaite par les combustibles fossiles, dont les réserves s'amenuisent progressivement et dont l'exploitation engendre des émissions importantes de gaz à effet de serre (GES), contribuant ainsi au réchauffement climatique [1].

Face à ces enjeux environnementaux et énergétiques, la transition vers les énergies renouvelables s'impose comme une nécessité. Parmi celles-ci, l'énergie solaire et la biomasse occupent une place importante en raison de leur disponibilité et de leur faible impact environnemental [2]. Leur intégration dans le réseau électrique est possible grâce aux réseaux de plus en plus flexibles et intelligents.

Au Québec, bien que l'hydroélectricité domine largement, la biomasse représente un potentiel énergétique significatif encore sous-exploité [3].

De plus, avec l'avancée des technologies, les systèmes d'énergie renouvelable se développent au fil du temps. Les combustibles fossiles par exemple peuvent être remplacés par des combustibles renouvelables comme la biomasse dans les génératrices fonctionnant au diesel ou au mazout servant à desservir les communautés non connectées au réseau électrique. C'est le cas de la centrale d'Atikokan en Ontario qui utilisait autrefois le charbon comme combustible, mais en 2012 a été amenée à fonctionner avec la biomasse (copeaux forestiers, copeaux de bois recyclés). Elle est devenue la plus importante productrice d'électricité d'origine propre et renouvelable, avec une capacité installée de

200 mégawatts [4].

En effet, la biomasse est présente partout dans le monde sous différentes formes et la bioénergie est la technologie permettant de la convertir en services énergétiques [2]. La biomasse forestière, qui comprend tous les résidus de la transformation et de la coupe du bois, se distingue de la biomasse agroalimentaire avec les résidus agricoles, les déjections animales, et encore de la biomasse urbaine (les déchets des collectivités).

Le Québec, compte environ 10 millions de tonnes métriques de biomasse forestière, agroalimentaire et urbaine disponibles pour la valorisation énergétique, soit l'équivalent d'une énergie thermique brute de 174 PJ (48 TWh), qui n'est plus exploitée par combustion [5]. Cependant, selon le type et l'usage prévu de la biomasse, il existe différentes voies de conversion énergétique de la ressource [6]. Une étude réalisée pour le gouvernement a évalué le potentiel technique de la valorisation énergétique de la biomasse du Québec à 333 PJ/an en 2030 [5].

L'engouement autour des énergies renouvelables présente néanmoins de nombreux défis. Liées aux conditions météorologiques très variables, elles sont de nature imprévisibles et intermittentes. Cette intermittence impacte leur production posant ainsi des difficultés d'intégration [7]. Les fluctuations de puissance ainsi créées peuvent engendrer des variations de tension et de fréquence, affectant la qualité de l'énergie.

Dans ce contexte, les systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergie apparaissent comme une solution prometteuse. D'où la problématique suivante : comment assurer une gestion optimale d'un système hybride afin de garantir la stabilité du réseau, de limiter les fluctuations dues à l'intermittence des sources renouvelables et de maximiser l'exploitation des ressources disponibles ?

1.2 Objectifs et méthodologie

Afin de développer l'utilisation limitée de la bioénergie et de compenser l'intermittence du renouvelable, nous nous intéresserons à l'étude d'un système hybride solaire et biomasse. L'objectif principal de notre projet est de développer et valider une stratégie de gestion énergétique optimale pour le système hybride solaire–biomasse, permettant d'assurer une production stable, fiable et efficace en fonction de la disponibilité des ressources. Un tel système dans le but de favoriser :

- Une exploitation des ressources naturelles;
- Une valorisation des résidus;
- Une fourniture énergétique plus stable et fiable;
- Une réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et;
- Une optimisation du mix énergétique permettant le lissage de la production.

C'est dans cette même lancée que, les auteurs de [1] dans leurs travaux de recherche ont choisi d'intégrer une turbine hybride biomasse-solaire PV-éolienne dans une application de micro-réseau avec un système de stockage. Il s'agira donc spécifiquement pour nous de:

- Modéliser les systèmes photovoltaïque et biomasse à partir de modèles mathématiques issus de la littérature;
- Analyser le comportement dynamique du système hybride en présence de variations de charge et d'irradiation;
- Concevoir une stratégie de contrôle et de gestion énergétique adaptée;
- Valider les performances du système à travers des simulations numériques sous MATLAB/Simulink.

En effet, la simple association de plusieurs sources d'énergie ne suffit pas à garantir un fonctionnement optimal du système hybride. Une stratégie de gestion énergétique

efficace est indispensable afin d'assurer une répartition optimale de la puissance entre les différentes sources, de prioriser l'utilisation des ressources renouvelables gratuites et de garantir l'alimentation des charges en toute circonstance.

Dans le cadre de cette étude, le système biomasse considéré repose sur un procédé de conversion thermique par combustion. La biomasse est brûlée dans une chaudière afin de produire de la chaleur sous forme de vapeur, laquelle alimente un système thermodynamique (turbine) couplé à un générateur synchrone pour la production d'électricité.

Parallèlement, le système photovoltaïque est modélisé à partir des équations caractéristiques courant-tension du générateur PV, permettant de représenter son comportement en fonction des conditions d'irradiation et de température. Un algorithme de suivi du point de puissance maximale est utilisé afin d'optimiser en temps réel l'extraction de la puissance disponible.

L'association de ces deux sources permet ainsi de tirer parti de la complémentarité entre une source intermittente (photovoltaïque) et une source pilotable (biomasse), dans le but d'assurer une production énergétique stable et continue.

Par la suite, dans le chapitre 2, nous dresserons l'état de l'art sur les systèmes solaires, la biomasse, et les systèmes hybrides. Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation du modèle de l'unité de production sous MATLAB/Simulink. Le quatrième chapitre présentera la stratégie de gestion énergétique proposée, les simulations réalisées ainsi que l'analyse des résultats obtenus. En dernier lieu, nous conclurons le travail en résumant les contributions principales et proposerons des perspectives d'amélioration.

Chapitre 2 - Recherche bibliographique sur les systèmes d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables constituent des sources d'énergie propres et durables, dont le potentiel est considéré comme inépuisable à l'échelle humaine. Elles regroupent notamment l'énergie solaire issue du rayonnement du soleil, l'énergie éolienne exploitant la force du vent, l'énergie hydraulique provenant des ressources en eau, la biomasse dérivée de matières organiques, ainsi que la géothermie exploitant la chaleur interne de la terre. Ces différentes sources se distinguent par la diversité de leurs mécanismes de conversion et de leurs caractéristiques de production.

Dans ce chapitre, en s'appuyant sur des articles et publications scientifiques, une présentation détaillée des systèmes d'énergie solaire et de la biomasse sera réalisée, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs avantages ainsi que leurs limites.

2.1 Conversion de l'énergie solaire

L'énergie solaire se décline principalement en deux formes : l'énergie photovoltaïque et l'énergie solaire thermique. Elle représente l'une des sources d'énergie renouvelable les plus abondantes et largement disponibles à la surface de la terre.

Le rayonnement solaire se compose de trois contributions principales : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement global, résultant de la combinaison des deux premiers. La quantité d'énergie reçue par une surface dépend de plusieurs paramètres, notamment l'angle d'incidence (défini comme l'angle entre les rayons solaires et la normale à la surface considérée), l'azimut solaire qui correspond à la direction horizontale du soleil, ainsi que des conditions environnementales telles que la température

et les phénomènes d'ombrage.

Par conséquent, la prise en compte de ces paramètres est essentielle lors de l'installation des systèmes photovoltaïques, afin d'optimiser la captation de l'énergie solaire et d'améliorer les performances du système [8].

2.1.1 Solaire photovoltaïque

Effet photovoltaïque et cellules photovoltaïques

L'effet photovoltaïque (PV) est un phénomène physique propre aux semiconducteurs qui, exposés à la lumière produisent de l'électricité [9]. La figure 2.1 illustre ce phénomène [10]. La cellule PV est généralement faite de silicium (matériau semi-conducteur). C'est l'élément fondamental qui convertit l'énergie du rayonnement en énergie électrique. Elle peut être assimilée à une photodiode en convention générateur. Lorsque la lumière du soleil frappe une cellule solaire, elle excite les électrons dans le silicium.

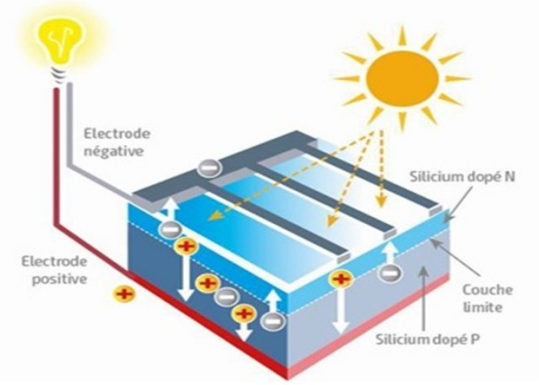


Figure 2.1 Cellule PV de silicium cristallin

En effet, l'énergie des photons est transférée aux électrons dans le matériau semi-conducteur, ce qui leur permet de se libérer de leur position normale à l'intérieur de la grille atomique. Cela crée des "trous" (les positions vacantes laissées par les électrons libérés). La séparation des charges électriques (électrons et trous) crée un potentiel électrique. Les cellules sont fabriquées avec une jonction P-N, qui est essentiellement une interface entre deux types de matériaux semi-conducteurs, type P et type N. Le côté P est dopé par des éléments qui ont moins d'électrons que le silicium, tandis que le côté N est dopé par des éléments qui ont plus d'électrons. Cette jonction crée un champ électrique permanent à l'interface entre les deux matériaux. Lorsque les électrons sont libérés, ils sont attirés vers le côté N, tandis que les trous sont attirés sur le côté P [11].

Système solaire PV

Un système solaire photovoltaïque est un dispositif qui convertit directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque et à l'aide de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont regroupées en modules reliés entre eux pour former un champ photovoltaïque. L'électricité produite en courant continu (DC) est généralement convertie en courant alternatif (AC) à l'aide d'un onduleur pour l'alimentation des charges ou l'injection dans le réseau [9]. Les principaux composants de ce système sont les panneaux solaires, l'onduleur, les batteries, le contrôleur, etc.

Les applications du PV sont variées et touchent de nombreux secteurs. Les systèmes d'énergie solaire peuvent être appliqués pour l'autoconsommation ou l'injection au réseau. Ils permettent aussi l'électrification rurale, le pompage solaire, les télécommunications. Le système PV offre de nombreux avantages :

- L'énergie est renouvelable et inépuisable car la ressource soleil est quasi illimitée.
- Sur le plan environnemental, l'énergie est propre pas d'émission de gaz à effet de

serre pendant l'exploitation.

- Le système est flexible, il est adapté aussi bien pour de petites installations hors réseau que pour de grandes centrales solaires.
- Le coût est en baisse, le prix des modules PV a chuté de plus de 80% entre 2010 et 2022 [12].
- Les panneaux ont une longue durée de vie de 20 à 30 ans et nécessite moins d'entretien car, il y'a absence de pièces mobiles.

Cependant, dans un système solaire,

- La production dépend de l'ensoleillement, entraînant des fluctuations journalières et saisonnières.
- Les panneaux solaires occupent assez d'espace, pour des centrales de grande puissance, une superficie importante est nécessaire.
- Pour un usage autonome, les frais d'installations augmentent avec le stockage dans des batteries, encore chères et à durée de vie limitée.
- L'extraction des matières premières telles que le silicium, les métaux rares comme le tellure ou le cobalt et le recyclage des panneaux posent des défis [13].

L'orientation des panneaux solaires et les conditions météorologiques influencent fortement l'irradiation reçue et donc leur efficacité. Il existe différents types de modules PV au silicium avec des rendements propres à chacun [9] comme on peut le constater à la figure 2.2 suivante [14].

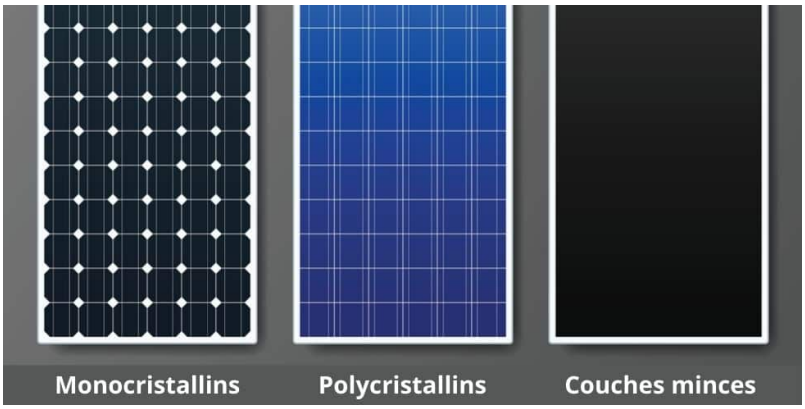


Figure 2.2 Images des différents types de modules PV

- **Les monocristallins :** ils ont un aspect noir uniforme et sont assez onéreux du fait de la pureté et de l'importante quantité d'énergie nécessaire à sa formation. Ils offrent en revanche une efficacité élevée de 17%;
- **Les polycristallins :** d'aspect bleu moins uniforme et d'une efficacité d'environ 15%, ils sont les plus répandus sur le marché mondial en raison du bon rapport qualité/prix;
- **Les couches minces (CdTe, a-Si) :** la technologie est différente avec un coût de production plus bas et un rendement de conversion faible 10%. En plus les cellules ont tendance à se dégrader plus rapidement sous la lumière. Le tellure de cadmium ou le silicium amorphe sont employées lorsque peu d'électricité est nécessaire (montres, calculatrices, luminaires de secours).

En revanche, le photovoltaïque connaît une évolution rapide grâce à :

- La nouvelle génération de cellules (pérovskites, organiques, tandem Si–pérovskite).
- L'intégration avec le stockage (batteries lithium-ion, hydrogène).
- Le développement de réseaux intelligents (smartgrids) permettant une meilleure gestion de l'intermittence.

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie [15], le solaire photovoltaïque devrait

représenter la première source mondiale d'électricité d'ici 2050.

2.1.2 Solaire thermique

Un système solaire thermique est un dispositif qui utilise la chaleur du soleil en la transformant en énergie thermique à l'aide des capteurs solaires pour le chauffage ou la production d'électricité. Le principe repose sur l'absorption du rayonnement par un capteur solaire, qui transfère la chaleur à un fluide caloporteur (eau, antigel, air ou huile thermique). Elle est ensuite utilisée directement dans le chauffage, l'eau chaude sanitaire ou indirectement avec la production de vapeur pour entraîner une turbine [16]. Les systèmes se déclinent principalement en trois catégories :

- **Capteurs plans vitrés :** adaptés au chauffage domestique et à l'eau chaude sanitaire.
- **Capteurs à tubes sous vide :** limitent les pertes thermiques, performants dans les climats froids.
- **Systèmes à concentration solaire (CSP) :** utilisent des miroirs paraboliques, tours solaires ou lentilles de Fresnel pour atteindre de très hautes températures et produire de l'électricité. L'avantage des CSP est le stockage en grande quantité d'énergie, il y a moins de contraintes et il est plus facile de stocker la chaleur que l'électricité.

La technologie est mature et fiable, utilisée depuis plusieurs décennies pour le chauffage. De plus, elle présente une large gamme d'applications, domestique, industrielle (séchoirs, pasteurisation, désalinisation), et agricole (séchage de produit, chauffage de serres, distillation). Le solaire thermique présente principalement les mêmes inconvénients que le photovoltaïque liés à l'intermittence de la source, au stockage, à l'espace pour l'implémentation et au coût d'installation.

Les recherches actuelles visent à améliorer les matériaux absorbants (revêtements

sélectifs) pour réduire les pertes, les systèmes de stockage thermique (sels fondus, matériaux à changement de phase) et l'intégration avec d'autres énergies renouvelables dans des systèmes hybrides.

Le solaire thermique, notamment les CSP, jouera un rôle majeur dans la décarbonation de l'industrie et la production d'électricité renouvelable à grande échelle, selon l'Agence Internationale de l'Énergie [12].

2.2 Généralités sur la biomasse

La biomasse désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale, animale ou issue de déchets, pouvant être utilisée comme ressource énergétique renouvelable. Elle constitue une source polyvalente pour la production de chaleur, d'électricité et de carburants alternatifs.

Sur le plan environnemental, la biomasse est généralement considérée comme neutre en carbone. Lorsqu'elle est exploitée de manière durable, le dioxyde de carbone émis lors de sa conversion énergétique est en partie compensé par celui absorbé durant la croissance des végétaux [17]. Elle représente ainsi un complément important pour améliorer la fiabilité et la rentabilité des systèmes de production d'énergie, en limitant le recours aux combustibles fossiles et en réduisant les besoins en stockage électrique. La biomasse présente plusieurs avantages significatifs :

- Énergie renouvelable et disponible localement;
- Valorisation des déchets organiques (agricoles, forestiers, urbains);
- Énergie pilotable, permettant une production à la demande contrairement aux sources intermittentes;
- Contribution à la réduction des émissions nettes de CO_2;

- Intégration favorable dans les systèmes hybrides pour améliorer la stabilité énergétique.

Malgré ses atouts, la biomasse présente également certaines contraintes:

- Faible densité énergétique, nécessitant des volumes importants de combustible;
- Coûts logistiques élevés liés au transport, au stockage et au traitement;
- Concurrence potentielle avec les usages agricoles et alimentaires;
- Rendements variables selon les technologies de conversion utilisées.

2.2.1 Type et source de biomasse

La biomasse peut être simplement disponible naturellement ou encore produite volontairement avec les gisements concentrés et la production de ressources dédiées. On distingue principalement:

- **La biomasse lignocellulosique ou biomasse végétale**, issue de l'agriculture (coproduits agricoles), des résidus forestiers (bois, paille) riches en cellulose, hémicellulose et lignine. C'est la source la plus abondante de biomasse et historiquement la plus exploitée avec le bois de chauffe.

- **La biomasse humide** qui englobe les déchets organiques ménagers, les effluents d'élevage, les boues de stations d'épuration, riches en eau et en matière organique biodégradable. Plus adaptée en particulier aux procédés biologiques comme la biométhanisation.

- **Les algues et cultures énergétiques** : les algues (microalgues et macroalgues) offrent un potentiel élevé grâce à leur rapidité de croissance et leur forte teneur en lipides et glucides, tandis que les cultures énergétiques dédiées (miscanthus, maïs, canne à sucre) sont cultivées spécifiquement pour produire du bioéthanol, du

biogaz ou de la biomasse solide.

2.2.2 Contraintes logistiques

La logistique peut se définir comme étant l'art et la manière de mettre en disposition un produit au bon moment, au bon endroit, au moindre coût et avec la meilleure qualité. La collecte de matières premières constitue le plus grand obstacle dans la filière bioénergie car la ressource est souvent dispersée, loin des unités de transformation et difficile d'accès à certains endroits [18]. Il faut en effet établir un plan d'approvisionnement en identifiant la demande énergétique nécessaire, le planning de fonctionnement des unités de transformation et également les sources en définissant un rayon d'approvisionnement (inférieur à 50km au Québec).

De nouveaux procédés permettent de fabriquer des biocombustibles solides comme le biochar afin de mieux rentabiliser la production d'énergie. De plus, la densification et le prétraitement de la matière première sont des techniques de rentabilité de la biomasse lignocellulosique.

2.2.3 Processus de conversion de la biomasse en énergie et conditions de transformation

La biomasse sous ses différentes formes peut être transformée en vecteurs énergétiques exploitables (chaleur, électricité, carburants) par plusieurs filières, à savoir les procédés thermochimiques, biologiques ou physico-chimiques [19], comme le présente la figure 2.3 [20]. Généralement, les procédés biologiques ou biochimiques consistent à la fermentation de la biomasse à des fins de production d'alcool, de méthane ou d'autres gaz.

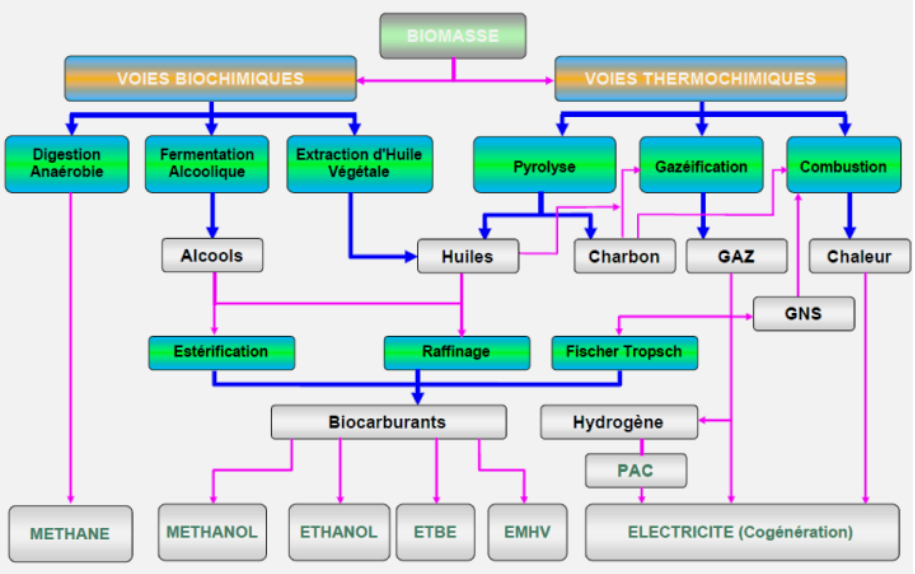


Figure 2.3 Organigramme illustratif de la biomasse et des voies de transformation

Procédés thermochimiques :

- **Combustion :** c'est la pratique la plus courante consistant à brûler directement la biomasse. Elle correspond à une oxydation complète de la biomasse sèche (< 20 % d'humidité) pour produire chaleur et électricité. La chaleur produite fait tourner des turbines à vapeur.
- **Gazéification :** procédé de conversion de la biomasse à haute température (800–1200°C) avec un agent oxydant limité (air, O_2, vapeur), générant un gaz de synthèse combustible (syngas) riche en CO, H_2 et CH_4 utilisé dans des moteurs ou turbines à gaz [21].
- **Pyrolyse :** dégradation thermique sans oxygène (400–800°C) produisant du bio-huile, du biochar et des gaz combustibles. Peut être considérée comme la seconde phase de la gazéification après le séchage.

Procédés biologiques :

- **Méthanisation ou digestion anaérobie :** décomposition de la biomasse humide

par des micro-organismes en absence d'oxygène, produisant du biogaz et un digestat utilisé comme engrais. Le biogaz principalement composé de méthane est utilisé dans des moteurs à gaz. Les étapes biologiques de la méthanisation sont l'hydrolyse, l'acidogenèse, l'acétogenèse et la méthanogenèse. Chaque phase du processus est réalisée par une classe de micro-organismes spécifiques [22]. La méthanogenèse est une étape limitante car elle est sensible aux conditions environnementales. Elle est de ce fait la plus contrôlée et se fait suivant l'équation 2.1 ci-dessous:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3\,CO_2 + 3\,CH_4 \tag{2.1}$$

- **Fermentation alcoolique :** transformation des sucres de cultures (maïs, canne à sucre, betterave) en bioéthanol, utilisé comme biocarburant. L'équation 2.2 de transformation peut être résumée ainsi :

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\,C_2H_5OH + 2\,CO_2 \tag{2.2}$$

Procédés physico-chimiques :

- **Transestérification :** réaction d'huile végétale ou graisse animale avec un alcool (méthanol, éthanol) en présence d'un catalyseur pour produire du biodiesel et de la glycérine comme coproduit.

Le choix du procédé dépend principalement de la nature de la biomasse, des conditions opératoires (température, humidité, catalyseurs) et du vecteur énergétique recherché dont la production d'électricité et de chaleur, de biocarburants et de gaz naturel renouvelable.

2.2.4 Applications

L'utilisation de la biomasse est toujours rattachée à une technologie de cogénération. La cogénération est en effet une technique de rentabilisation des systèmes énergétiques par la production simultanée d'électricité et de chaleur à partir d'une même source primaire. Dans le fonctionnement, un combustible est brûlé pour faire fonctionner un moteur entraînant un alternateur qui produit ainsi de l'électricité [23]. La chaleur générée lors de la combustion est récupérée par des échangeurs thermiques puis valorisée d'eau chaude ou de vapeur pour le chauffage. En 2018, la centrale de Bécancour d'une capacité de 550 MW produisait de l'électricité à partir de cogénération répondant ainsi à la demande de la province. Elle utilisait comme combustible du gaz naturel [24]. Pour nos simulations, seulement la production d'électricité sera étudiée. Nous pouvons citer comme technologie de cogénération :

- **La machine à combustion interne**, moteur à explosion, couplé à un alternateur produisant l'électricité et la chaleur récupérée sur les gaz d'échappement à plusieurs niveaux et le circuit de refroidissement produit l'eau chaude ou la vapeur. Disponible dans une grande large gamme de puissance.

- **La turbine à gaz** produit la plus grosse part de l'énergie thermique sous forme de gaz d'échappement, convient à des puissances moyennes 100kW à plusieurs MW. Elle peut être couplée en cycle combiné pour améliorer le rendement global.

- **La turbine à vapeur (TAV):** la combustion du combustible alimente une chaudière en chauffant de l'eau et produisant de la vapeur à haute pression qui entraine la TAV reliée à un alternateur. Elle est la plus ancienne des techniques et est beaucoup rencontrée dans l'industrie.

Il est possible de concevoir des solutions énergétiques à la fois efficaces, durables et adaptées aux ressources locales en intégrant la biomasse dans un système hybride d'énergie (SHE) aux côtés du solaire, de l'éolien et de la pile à combustible, répondant ainsi aux enjeux actuels de la transition énergétique. Quelques critères de comparaison des ressources sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau 2-1 Tableau comparatif des sources d'énergie

Critères	**Biomasse**	**Solaire**	**Éolien**
Disponibilité	pilotable	Intermittente	Intermittente
Stockage	Possible	Difficile	Difficile
Impact environnemental	Modéré	Faible	Faible
Complexité	Élevée	Moyenne	Moyenne

Contrairement au solaire ou à l'éolien, le caractère pilotable ou continu de la biomasse fait d'elle une source idéale pour stabiliser un système hybride d'énergie. Sa production peut être contrôlée en fonction des besoins, à condition que le combustible soit disponible. En effet, la biomasse peut être stockée (granulés, résidus forestiers, biogaz, etc.), ce qui permet de produire de l'électricité à la demande [19]. De plus, la biomasse valorise des ressources locales, ce qui contribue à la réduction des impacts environnementaux liés à la gestion des déchets.

En revanche, l'exploitation de l'énergie issue de la biomasse demeure limitée en raison des contraintes liées à la logistique de collecte, aux coûts d'investissement initiaux ainsi qu'à des rendements énergétiques souvent inférieurs à ceux des technologies à haute efficacité.

Dans ce contexte, nous nous pencherons sur cette biomasse énergie en l'utilisant comme source complémentaire au sein du système hybride PV.

2.3 Définition et importance des systèmes hybrides

Un système hybride d'énergie est une solution qui combine deux ou plusieurs sources d'énergie, généralement renouvelables (solaire, éolienne, biomasse, hydraulique), éventuellement associées à des systèmes de conversion, tels que les piles à combustible à hydrogène, et parfois à une source conventionnelle (diesel ou gaz naturel), afin d'assurer une alimentation électrique continue et fiable [17]. Ces systèmes d'énergie renouvelable, individuellement employés dépendent fortement de la situation géographique, des conditions climatiques à savoir l'ensoleillement, la vitesse du vent, la saison, etc... Ils s'appuient souvent sur des dispositifs de stockage à savoir les batteries ou l'hydrogène et sur des stratégies de contrôle intelligentes pour équilibrer la production et la demande. Les systèmes hybrides peuvent être autonomes lorsqu'ils sont prévus pour desservir les zones éloignées ou connectés au réseau pour venir en appoint et gérer les fluctuations.

La littérature scientifique récente indique que l'intégration de l'hydrogène ou de systèmes de stockage, combinée aux énergies variables, permet d'optimiser fiabilité et impact environnemental global. Par exemple, Xingyin Zhang et al., montrent que l'optimisation d'un système hybride PV-éolien-hydrogène peut atteindre un compromis optimal entre coût, émissions et fiabilité [25]. L'importance des SHE réside à plusieurs niveaux :

- **La fiabilité énergétique**

Les SHE garantissent une alimentation stable en compensant l'intermittence du solaire et de l'éolien par des sources pilotables (biomasse, pile à combustible, stockage). Cela les rend adaptés aux zones isolées, rurales ou non connectées au réseau.

- **La réduction des impacts environnementaux**

Ils diminuent significativement les émissions de gaz à effet de serre en remplaçant

ou en réduisant l'usage des combustibles fossiles. L'intégration de la biomasse ou de l'hydrogène « vert » contribue à la neutralité carbone [12].

- **L'optimisation économique**

Les SHE permettent de réduire les coûts d'exploitation sur le long terme, grâce à une meilleure utilisation des ressources locales (soleil, vent, déchets organiques). Ils limitent aussi les coûts liés aux importations de carburants fossiles.

- **L'indépendance énergétique et la contribution à la transition énergétique**

Les SHE s'inscrivent dans les objectifs internationaux de décarbonation, en augmentant la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Ils favorisent l'intégration de technologies innovantes (réseaux intelligents, stockage avancé, hydrogène vert). De plus, l'utilisation de ressources locales (biomasse, solaire, vent) réduit la dépendance aux énergies importées.

Le système hybride d'énergie est donc une solution énergétique intelligente, durable et flexible, capable d'optimiser la complémentarité des différentes sources d'énergie. La stratégie de gestion et de fonctionnement est cependant importante car elle permet la prise de décision et des actions à mener pour le fonctionnement du système [26].

2.4 Revue sur les systèmes hybrides solaire-biomasse et leur gestion

La transition énergétique mondiale s'appuie de plus en plus sur les SHE, qui combinent différentes sources d'énergie renouvelable afin de pallier les limites inhérentes à chacune d'elles. De nombreux chercheurs avec leurs études montrent l'intérêt des sources renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, et la biomasse dans la production d'électricité.

2.4.1 Disponibilité de la biomasse

En résumé, d'après la littérature, les technologies les plus couramment associées dans les systèmes hybrides et micro-réseau sont le solaire photovoltaïque, l'éolien, la pile à combustible et, de manière croissante, la biomasse [27]. Cependant les recherches sur les micro-réseaux biomasse-solaire photovoltaïque sont moindres malgré la présence de la ressource forestière. À cet effet, la biomasse principalement forestière non mise en valeur par l'industrie de la transformation du bois servait à fabriquer les biocombustibles au Québec, représentant ainsi environ 6% du bilan énergétique, en 2021.

De ce fait, D. Gnanasangeetha et ses collaborateurs ont examiné la viabilité énergétique, environnementale et financière de l'énergie de la biomasse afin de fournir une évaluation de son potentiel. La recherche adopte une approche quantitative, de régression et d'analyse de la variance pour identifier les facteurs les plus importants qui influencent la croissance de la biomasse et ses conséquences pour l'environnement et l'économie. Les résultats montrent que l'énergie de la biomasse peut exercer une grande influence, mais qu'elle dépend aussi de beaucoup d'autres facteurs, tels que le type de biomasse utilisée, la technologie de conversion employée [28].

D'un point de vue économique, des études par exemple l'étude sur le chauffage par biomasse forestière au Québec montrent que l'usage de la biomasse peut être rentable, créer des emplois locaux et diminuer les dépenses liées aux combustibles fossiles. De même, des travaux sur des mini-SHE "solaire-biomasse" mettent en évidence des rendements élevés en cogénération, ce qui améliore l'efficacité globale du système [17].

[29] estime que l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques pourrait contribuer à la réduction des émissions de GES. Leur recherche évalue ainsi la disponibilité de la

biomasse dans l'Ouest canadien, y compris en Alberta et en Saskatchewan, pouvant être utilisée pour fournir de l'énergie et des produits à l'industrie des sables bitumineux en Alberta. Quatre principales sources de biomasse sont considérées en fonction de leur abondance en Alberta. Ces sources comprennent la biomasse agricole (la paille de blé, d'orge, d'avoine et de canola ainsi que les balles de céréales), la biomasse forestière (les arbres entiers, les résidus forestiers générés par les opérations d'exploitation forestière et les résidus d'usine), les déchets solides municipaux (DSM) dans le site d'enfouissement et le fumier de bétail... La disponibilité des matières premières est évaluée par l'élaboration de cartes SIG qui montrent l'intensité et l'emplacement de la biomasse pour ces zones. Leur étude est donc utile pour des décisions d'investissement et le développement d'installations basées sur la biomasse.

2.4.2 Exploitation du potentiel et différentes applications

Les micro-réseaux hybrides hors réseau, intégrant plusieurs sources d'énergie en fonction de la disponibilité des ressources et des prises en compte environnementales ou économiques, suscitent un intérêt croissant comme alternative aux systèmes électriques conventionnels. L'étude faite par Adra Aliyu Muhammad et ses collaborateurs explore la faisabilité de combiner l'énergie photovoltaïque et la biomasse pour développer un système d'énergie renouvelable hybride durable. Utilisant le logiciel HOMER Pro v3.14.5, le système est conçu pour répondre à la demande énergétique d'une communauté rurale avec une charge estimée à 264 781 kWh, un rayonnement solaire de 5,3785 $kWh/m^2/jour$ et une disponibilité de biomasse de 8 tonnes/jour. Il comprend un module photovoltaïque de 733,23 kW avec un taux de pénétration de 77%, un générateur biomasse de 800 kW produisant 69 508 kWh par an, un convertisseur de 482,49 kW et deux options de stockage sur batterie. Les indicateurs de performance clés, notamment la part d'énergie

renouvelable, le coût d'investissement initial, le coût actuel net, le coût d'exploitation et le coût de l'énergie ont permis d'évaluer les configurations du système. Cette étude offre une solution énergétique évolutive et plus propre pour l'électrification rurale, démontrant le potentiel des systèmes hybrides renouvelables pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et les émissions de carbone dans les zones hors réseau [30].

B. Modu et ses collaborateurs ont travaillé sur la conception d'un système d'énergie solaire pile à combustible biomasse utilisant un algorithme d'essaim de salpes amélioré prenant en compte une stratégie de gestion de l'énergie basée sur des règles. Les auteurs ont proposé un algorithme d'optimisation pour une gestion optimale d'un système hybride d'énergie renouvelable à base de solaire au Nigéria. En tant que solution potentielle, la biomasse apparaît comme une option prometteuse en raison de sa capacité à produire de l'électricité sans émettre de dioxyde de carbone, et est utilisée pour combler la demande lorsque les systèmes PV et batteries ne sont pas en mesure [31]. Dans leur étude le potentiel énergétique de la biomasse est élevé car les agriculteurs prédominent dans le lieu choisi, de sorte que les déchets agricoles puissent être utilisés comme matière première du gazéificateur. Ces matériaux sont abondants et comprennent les parties non comestibles des plantes qui sont généralement jetées et laissées.

L'augmentation de la demande énergétique due au déploiement des sources conventionnelles entraîne une transition vers les énergies renouvelables. Comme les énergies renouvelables ne peuvent pas être exploitées en continu, il est très pratique d'ajouter une autre source d'énergie aux sources d'énergie solaire et éolienne. Dans l'article présent, deux sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire et l'énergie issue de la biomasse, sont combinées pour former une source d'énergie hybride. En Inde, l'énergie solaire est disponible en abondance et dans les villages où l'agriculture est la

principale source de revenus, favorise la biomasse. Cette combinaison aide ainsi à réduire la pollution, car les déchets obtenus à partir des plantes agricoles seront utilisés pour produire de l'électricité et permettre également de disposer gratuitement d'énergie solaire sans carbone. [32] Dans la même optique, une étude de cas d'une centrale à vapeur à biomasse à Ogan Ilir, Sumatra Sud est faite en 2021 par Achmad Royhan et Imade Brunner. Cette centrale électrique est la première à utiliser la balle de riz comme combustible unique en Indonésie [33]. De plus, l'optimisation de la conception d'un système hybride d'énergie renouvelable basé sur l'énergie solaire et la biomasse a été étudié par Mohd Izhwan Muhamad et al., en Malaisie, riche en arbres et en beaucoup d'autres produits agricoles. Comme le palmier à huile un des produits agricoles le plus important où de nombreuses recherches et applications ont été développées [34]. Cette optimisation est réalisée à l'aide du logiciel HOMER afin d'obtenir le meilleur système d'exploitation.

S. H. Badruhisham et ses collaborateurs ont aussi fait une étude en Malaisie sur l'intégration d'un micro-réseau hybride PV éolienne biomasse hors réseau. L'objectif de leur travail repose sur le contrôle et la stabilité de la tension du système à l'aide d'un contrôleur PI à filtre harmonique [35].

2.4.3 Techniques de gestion et d'optimisation des systèmes hybrides à biomasse

La référence [36] propose comme solution pour une production stable d'énergie l'emploi d'une station de biogaz en plus d'une unité photovoltaïque pouvant être contrôlée pour répondre aux besoins journaliers. La méthode de contrôle employée est le contrôle incrémental à un étage. Un autre article présente un système hybride solaire-biogaz conçu pour des applications agricoles, répondant à la demande croissante de systèmes automatisés pour améliorer la productivité. Le système utilise un onduleur hybride de 5 kVA, une batterie de secours de 48V-400AH et un générateur de biogaz de 6,5 CV, utilisant

la bouse de vache comme source de biogaz. L'intégration d'un contrôleur automatisé et d'un système de commutation garantit une alimentation électrique continue, même pendant les soirées, les nuits et les périodes de faible ensoleillement. Le composant biogaz, qui utilise la bouse de vache, fonctionne à des vitesses comparables à celles d'un moteur à pétrole, ce qui atteste de ses performances optimales [37].

Mohamad Nassereddine et al., dans l'article publié sur l'hybridation pour un système électrique stable ont également utilisé le photovoltaïque et le biogaz comme sources d'énergie. Le biogaz vient en secours pour obtenir une alimentation électrique cohérente et fiable [38]. Cette méthode permet de prévoir la demande quotidienne de déchets pour un réseau électrique fiable. L'étude introduit des équations mathématiques pour répondre aux besoins quotidiens en biomasse du système et met en œuvre une méthode de calcul de la capacité de production de biogaz et de la quantité de déchets. Ils ont mis en place un système de contrôle évaluant la production anticipée en fonction de la charge, un modèle basé sur la technique du régresseur à vecteur.

Toujours dans la même optique, l'article de Abu Bakar Waqas et al., présente une solution de gestion de la charge de pointe pour les foyers à l'aide d'un système de conversion d'énergie à base de biogaz. L'objectif est de fournir un support énergétique durant les périodes de forte demande (matin et soir), en complément de l'alimentation réseau classique. Le système combine l'alimentation du réseau et un système de production à base de biogaz. La production de biogaz provient de déchets organiques (par fermentation anaérobie) pour alimenter un moteur à gaz relié à un générateur synchrone de 10 kW. Un système de contrôle basé sur la logique floue a été développé pour réguler automatiquement l'apport en biogaz selon la charge dynamique. Il permet ainsi de prendre en charge la surcharge (>15 kW) lors des pics de consommation, en ajustant la quantité de

gaz pour maintenir une fréquence stable (50 Hz).
Les auteurs ont démontré qu'un système de production à base de biogaz, couplé à un contrôleur à logique floue, peut efficacement partager la charge pendant les pics, tout en réduisant les perturbations du réseau et en stabilisant la fréquence. C'est une solution robuste, économique, et écologique pour les zones résidentielles [2].

Les collaborateurs de [39] présentent une méthode de dimensionnement optimal pour un système hybride PV-biomasse, à la fois autonome et connecté au réseau public, pour alimenter en électricité un emplacement typique près de Patiala, au Pendjab. L'étude utilise un algorithme nouvellement développé appelé optimiseur d'équilibre (EO) pour trouver la meilleure configuration de système hybride avec le coût annualisé le plus bas du système (ACS) et le coût actualisé de l'énergie le plus bas (LCOE). Les résultats montrent qu'un système hybride PV-biomasse connecté au réseau public utilisant l'algorithme EO est un choix plus fiable et plus rentable pour l'électrification rurale qu'un système hybride PV-biomasse avec un modèle d'optimisation hybride pour les algorithmes d'énergie renouvelable électrique (HOMER) et de colonie d'abeilles artificielle (ABC). Le système recommandé génère une électricité abordable et durable en utilisant les ressources naturelles disponibles localement. De plus, les résultats démontrent que l'algorithme EO surpasse HOMER et ABC.

S. H. Badruhisham et al., ont posé comme objectif principal de leur article l'intégration de l'éolienne hybride biomasse-solaire PV-éolienne dans une application microgrid avec un système de stockage de batterie, des convertisseurs de puissance, un tracker de point de puissance maximale (MPPT) et un générateur synchrone à aimant permanent (PMSG) afin de garantir que le système puisse répondre à la demande de charge, que ce soit en connexion au réseau ou hors réseau [1]. Selon [40], les systèmes énergétiques hybrides

basés sur des gazéificateurs de biomasse n'ont pas été mentionnés dans la littérature. L'objectif de leur travail a donc été de développer un système énergétique hybride basé sur un gazéificateur de biomasse et d'élaborer une stratégie de fonctionnement optimale réalisée à l'aide du logiciel HOMER. Un modèle d'optimisation a été développé pour le fonctionnement optimal du système, à partir des données météorologiques, des variations saisonnières non linéaires et tenant compte de la demande de charge collectée dans un village type ainsi que des contraintes liées aux équipements. S. Fawzy, M. Saeed et al., ont présenté un système de contrôle adaptatif utilisant le contrôle prédictif de modèle pour un système d'alimentation électrique alimenté au biogaz. le contrôle vient du modèle de la digestion anaérobique incluant la concentration de solides volatils biodégradables, des acidogènes et méthanogènes qui sont des variables d'état du contrôle [41]. L'ensemble du système d'alimentation électrique alimenté au biogaz a été mis en œuvre et testé dans l'environnement MATLAB/Simulink. Différentes conditions de fonctionnement ont été étudiées et analysées afin de valider les performances du contrôleur proposé. [42] présente le développement d'un modèle de contrôle haut niveau permettant de maintenir les opérations pour un système de micro-réseau hybride comprenant à la fois des sous-réseaux à courant continu et à courant alternatif.

Le système énergétique hybride est une bonne solution pour la production d'électricité dans les zones rurales où l'extension du réseau est difficile et peu rentable. Afin d'obtenir de l'électricité de manière fiable et économique à partir de ce type de système, la conception doit être optimale en termes de dimensionnement et de fonctionnement.

Tous ces travaux de recherche ont été consacrés à l'étude des systèmes hybrides intégrant des sources renouvelables.

Certains auteurs ont étudié des systèmes hybrides PV–éolien–biomasse, montrant que

la biomasse permet de compenser les fluctuations des sources intermittentes. D'autres recherches se sont concentrées sur des systèmes PV–biomasse-biogaz avec stockage, mettant en évidence l'amélioration de la stabilité du réseau et la réduction des pertes d'énergie. Des études ont également porté sur l'intégration de turbines à biomasse couplées à des générateurs synchrones, démontrant leur capacité à fournir une puissance de base dans les micro-réseaux isolés.

Ils ont eu à utiliser des techniques d'optimisation, d'intelligence artificielle et de contrôle classique pour la régulation du système hybride. Le tableau suivant présente et fait une comparaison de ces différentes méthodes.

Tableau 2-2 Tableau comparatif des méthodes employées

Méthodes employées	**Avantages**	**Inconvénients**
Optimisation (algorithme d'essaim de salpes PSO, optimiseur HOMER, optimiseur d'équilibre EO) [39], [40]	Optimisation globale des performances, bonne gestion multi-objectifs	Difficulté d'implémentation en temps réel, coût élevé
Intelligence artificielle (logique floue) [2], [38]	Capacité d'apprentissage et de prédiction	Besoin de données importantes, complexité de mise en œuvre, coût computationnel élevé
Contrôle classique (PID, PI, commande à hystérésis) [35], [41]	Simplicité, facilité d'implémentation	Performances limitées face aux non-linéarités, sensibilité aux variations du système

Bien que plusieurs approches avancées de gestion énergétique, telles que les algorithmes d'optimisation, la logique floue ou les méthodes d'apprentissage automatique, aient démontré leur efficacité dans les systèmes hybrides, leur mise en œuvre nécessite généralement une puissance de calcul importante ainsi qu'une phase de paramétrage relativement complexe. Dans le cadre de cette étude, une stratégie de gestion énergétique basée sur des règles de priorité a été privilégiée en raison de sa simplicité, de sa robustesse

et de sa facilité d'implantation sous MATLAB/Simulink. Notre étude se distingue de ces dernières par:

- L'utilisation des sources renouvelables (PV–biomasse sans stockage) montrant que la biomasse assure un même rôle dans la continuité énergétique;
- La mise en œuvre d'une stratégie de gestion simple et robuste;
- L'analyse du comportement dynamique du système face à l'intermittence;
- L'évaluation des performances du régulateur de tension et du MPPT Perturbation et Observation dans ce contexte hybride.

Pour la suite des travaux, la modélisation des systèmes est nécessaire. Dans le chapitre qui suivra sera présentée toute la modélisation des sous systèmes biomasse et solaire ainsi que les différents résultats des simulations.

Chapitre 3 - Modélisation du système hybride solaire-biomasse

L'un des objectifs de ce travail consiste à modéliser l'ensemble du système hybride solaire–biomasse, tel qu'illustré globalement à la figure 3.1. Cette étape est essentielle pour analyser le comportement dynamique des différentes composantes et élaborer une stratégie de gestion énergétique adaptée.

Pour ce faire, chaque sous-système est étudié de manière indépendante. L'analyse porte d'une part sur le système photovoltaïque, et d'autre part sur le système biomasse, basé sur des procédés de conversion thermique (combustion ou gazéification) des copeaux de bois et résidus forestiers.

Ces modèles sont ensuite implémentés sous MATLAB/Simulink, où le système photovoltaïque est associé à un convertisseur adapté, tandis que la chaîne biomasse est représentée par une génératrice thermique (turbine à gaz) couplée à une machine synchrone, permettant ainsi de simuler le fonctionnement global du système hybride.

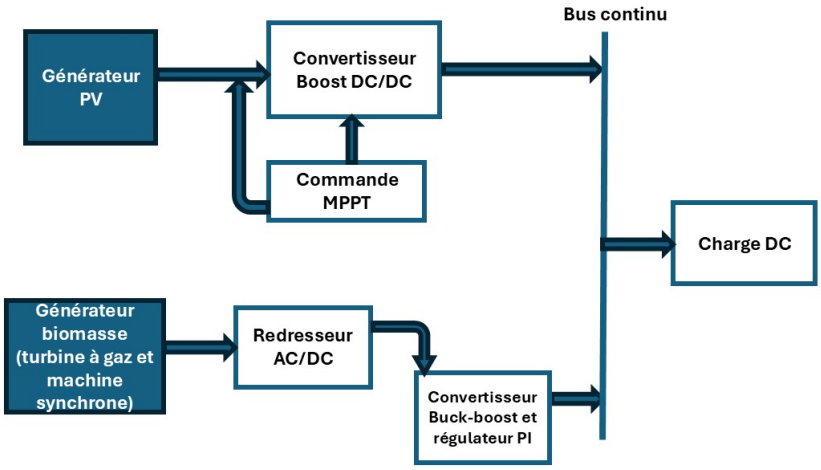


Figure 3.1 Représentation globale du système

3.1 Modélisation du système solaire

La modélisation du générateur PV sous MATLAB/Simulink est généralement réalisée en utilisant le modèle à diode unique. En effet, la conception de la cellule PV repose sur le choix du circuit électrique. Afin de représenter le comportement non linéaire des connexions semiconductrices, des modèles mathématiques sont employés (modèle à une diode et deux diodes). Le circuit de la cellule PV à une diode est illustré à la figure 3.2 [43].

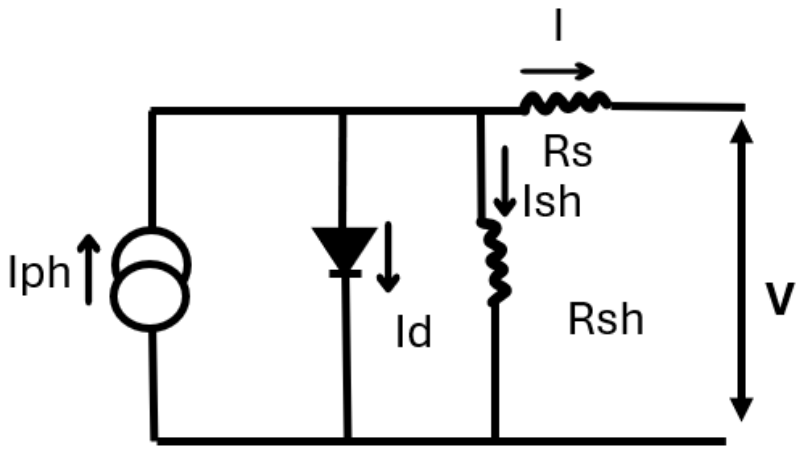


Figure 3.2 Circuit électrique équivalent d'une cellule PV

La résistance R_s représente la résistance du matériau et des contacts ohmiques lorsque la cellule est connectée à un circuit externe, R_{sh} est celle causée par la recombinaison des porteurs de charges à l'interface des électrodes [44].

- Équations régissant la cellule photovoltaïque [45]

$$I = I_{\text{ph}} - I_d - I_{\text{sh}} \tag{3.1}$$

Avec:

$$I_{\text{sh}} = \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{3.2}$$

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right] \tag{3.3}$$

$$I_{\text{ph}} = I_{\text{cc}} \left(\frac{G}{G_{\text{ref}}} \right) \tag{3.4}$$

$$I_{\text{sh}} = \frac{AKT}{q} \tag{3.5}$$

où :

- I_{ph} : courant photo-généré dépendant de l'éclairement,
- I_d : courant de la diode,
- I_0 : courant de saturation de la diode,
- I_{sh} : courant de shunt,
- G_{ref} : irradiance de référence,
- V_t : tension thermique,

$$V_t = \frac{KT}{q} \tag{3.6}$$

- T : température de fonctionnement (en Kelvin),
- q : charge de l'électron (1.6025×10^{-19} C),
- K : constante de Boltzmann,
- R_s : résistance série,
- R_p : résistance parallèle.

Le courant I devient:

$$I = I_{\text{ph}} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \tag{3.7}$$

Lorsque la température tend vers 0 K, la tension thermique tend vers zéro. Par conséquent, l'argument de la fonction exponentielle devient très élevé, ce qui conduit à une divergence du terme exponentiel dans le modèle à une diode. Cette singularité est toutefois purement

mathématique et ne possède pas de signification physique, puisque le modèle n'est valide que dans la plage normale de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ainsi le modèle à une diode n'est pas valide à des températures proches du zéro absolu, car les hypothèses physiques sur lesquelles il repose ne sont plus vérifiées dans ces conditions extrêmes.

Le bloc utilisé pour le générateur est le PV Array disponible dans la bibliothèque Simscape. Ce bloc permet de paramétrer l'ensemble PV en spécifiant le nombre de modules en série et en parallèle, ainsi que leurs caractéristiques électriques à des conditions standard (STC). Le modèle PV requiert des inputs dynamiques continus, notamment l'irradiance et la température de la cellule. Le courant et la tension produits, varient en fonction du niveau d'irradiation solaire essentiel pour la boucle de contrôle.

3.1.1 Caractéristique tension-courant

La première caractéristique intéressante est de savoir comment la cellule réagit à différentes intensités lumineuses [8]. Soumis à une irradiance, dans le tracé de la variation du courant par rapport à la tension du panneau solaire ainsi que celle de la puissance par rapport à la tension, on remarque que la courbe de puissance passe par un maximum. Cette caractéristique est représentée à la figure 3.3. Elle permet de déterminer quelques paramètres techniques tels que la tension en circuit ouvert V_{OC}, le courant de court-circuit I_{SC}, le facteur de forme FF, le rendement de conversion et le point de fonctionnement optimal.

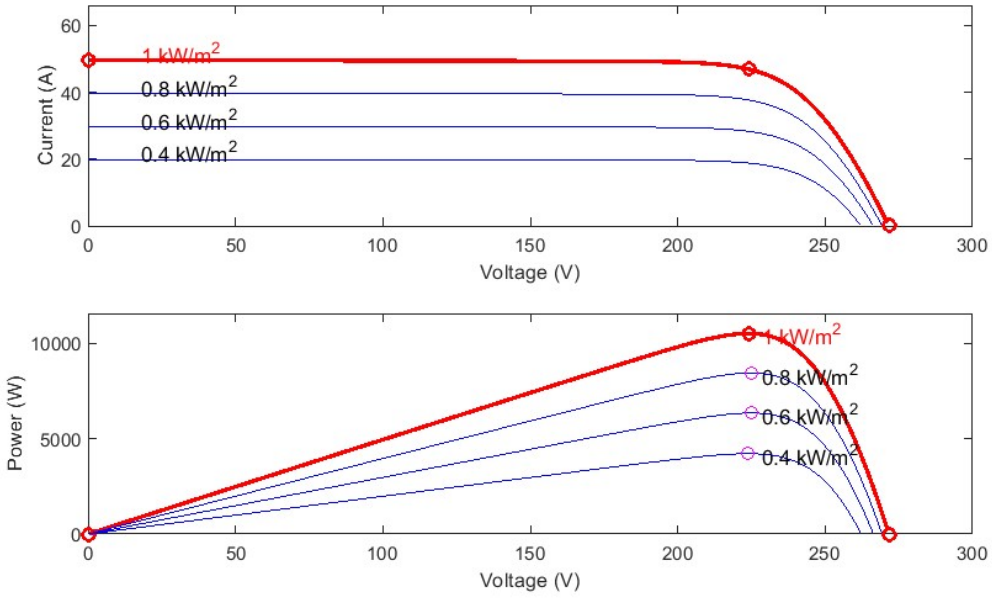


Figure 3.3 Caractéristique du courant et de la puissance en fonction de la tension avec variation de l'irradiance

Dans une cellule exposée à plusieurs niveaux d'éclairage, le courant est proportionnel à ces niveaux, la tension en revanche n'est pas très dégradée et est pratiquement constante. Lorsque c'est la température qui varie en augmentant, la tension de circuit ouvert diminue, le courant de court-circuit augmente peu.

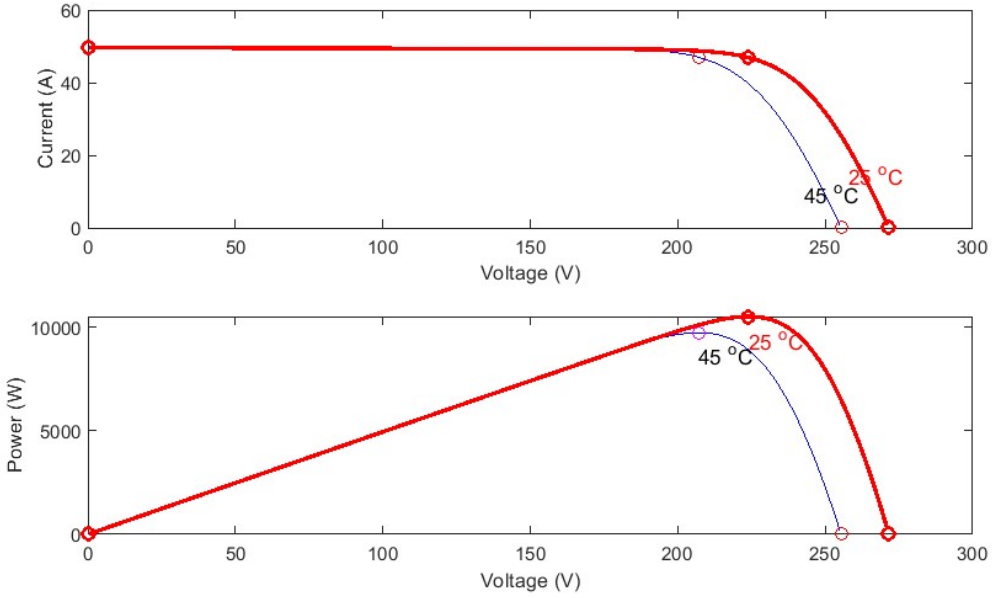


Figure 3.4 Caractéristique du courant en fonction de la tension selon la température

- Tension V_{OC} : pour un courant nul, elle correspond à la tension maximale que peut fournir la cellule PV placée sous une source lumineuse constante. Son expression est donnée :

$$V_{\mathrm{OC}} = \frac{K_b T}{e} \ln\left(\frac{I_{\mathrm{ph}}}{I_0} + 1\right) \tag{3.8}$$

- Courant I_{SC} : correspond au courant circulant dans la cellule lorsque ses bornes sont court-circuitées, la tension est nulle.
- Facteur de forme : il représente le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule solaire et le produit du courant de court-circuit et de la tension en circuit ouvert d'où son expression :

$$\mathrm{FF} = \frac{P_m}{V_{\mathrm{OC}} I_{\mathrm{SC}}} \tag{3.9}$$

- Rendement de conversion : correspond à la relation entre la puissance maximale fournie par la cellule et la puissance incidente reçue, comme on peut le voir à

l'équation :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{V_{\mathrm{OC}} I_{\mathrm{SC}}}{P_i} \times \mathrm{FF} \tag{3.10}$$

3.1.2 Modélisation des convertisseurs

Afin de contrôler le flux d'énergie entre le champ PV et la charge via le bus continu DC, nous avons besoin d'un convertisseur DC-DC, également appelé hacheur. Ce convertisseur est placé entre le générateur PV et le bus continu pour s'assurer que la puissance captée par les panneaux PV soit transférée au point de connexion des deux sources, le bus continu. Ce dispositif permet aussi d'extraire la puissance maximale des panneaux PV en suivant des stratégies de contrôle spécifiques. Les systèmes alimentés par un générateur photovoltaïque utilisent souvent plusieurs modules en série afin d'avoir un niveau de tension suffisamment élevé [9]. Il existe différents types de convertisseurs, élévateur, abaisseur ou une combinaison des deux qui s'adapte en fonction des besoins dans les applications PV [46].

Un convertisseur survolteur (boost) permet d'augmenter la tension fournie par le générateur photovoltaïque et ainsi diminuer le nombre de modules nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. C'est pour cela que le convertisseur DC-DC le plus utilisé est le hacheur élévateur ou hacheur parallèle ou encore « boost converter » en anglais, qui est un élévateur de tension où la tension de sortie est toujours supérieure à la tension d'entrée. Sa structure est principalement composée d'une inductance, d'un condensateur, d'un interrupteur (IGBT ou MOSFET) et d'une diode comme on peut le voir à la figure 3.5 suivante.

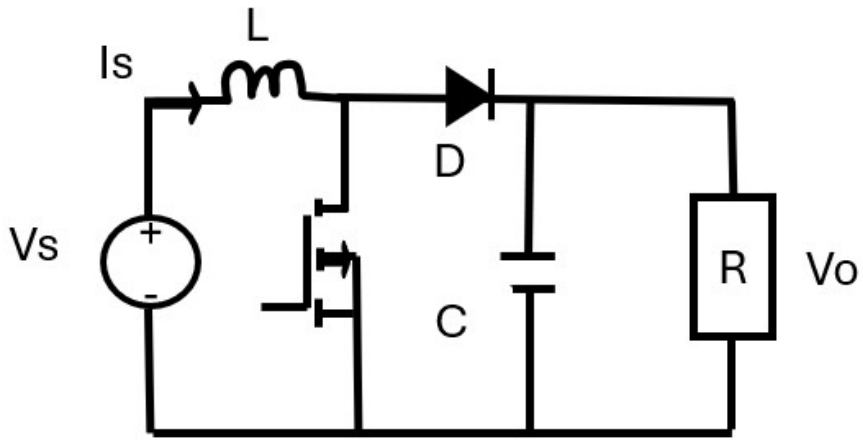


Figure 3.5 Convertisseur élevateur

Lorsque l'interrupteur est activé, le courant circule à travers l'inducteur, créant un champ magnétique et stockant de l'énergie. Quand il est désactivé, le champ magnétique de l'inducteur s'effondre, ce qui augmente la tension à ses bornes. Cette tension s'ajoute à la tension d'entrée, augmentant ainsi la tension de sortie globale. La tension de sortie est régulée en ajustant le rapport cyclique (duty cycle) de l'interrupteur.

Le convertisseur abaisseur ou buck réduit la tension d'entrée à une tension de sortie plus basse. Il est utilisé lorsque l'alimentation électrique est supérieure aux besoins de la charge [46].

Quand l'interrupteur est activé, le courant traverse l'inducteur, stockant de l'énergie dans son champ magnétique. Et s'il est désactivé, l'inducteur libère cette énergie vers la charge. La diode devient polarisée dans le sens direct, permettant au courant de continuer à circuler vers la charge tout en empêchant le courant inverse. La figure illustre le circuit d'un convertisseur abaisseur.

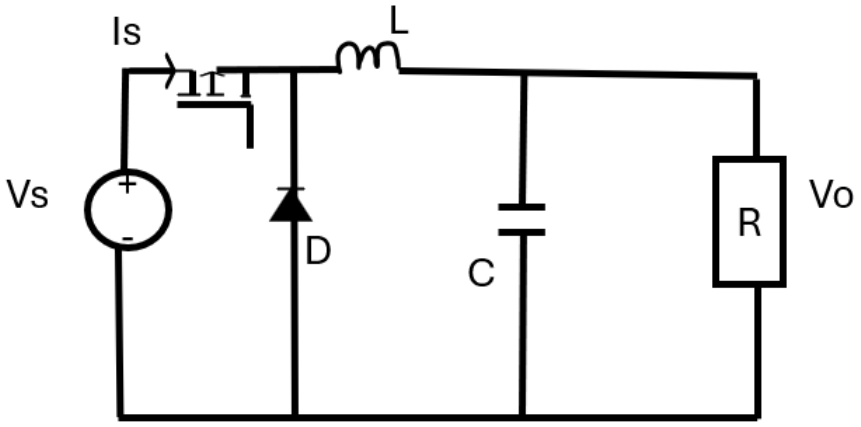


Figure 3.6 Convertisseur abaisseur

Pour la modélisation sur Simulink du système PV, les valeurs des composants du convertisseur élévateur sont obtenues par différentes formules [47]. Conformément au rapport de cycle D, la tension d'entrée V_{in} est augmentée à V_o:

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_{\text{in}} \tag{3.11}$$

Pour un choix optimum de l'inductance L, le facteur d'ondulation de courant est pris inférieur ou égal à 30% :

$$\text{CRF} = \frac{\Delta I_L}{I_o} \leq 30\% \tag{3.12}$$

$$L = \frac{V_{\text{in}} D}{f_s \Delta I_L} \tag{3.13}$$

Pour la capacité d'entrée et de sortie on a:

$$C_{\text{in}} = \frac{D V_{\text{in}}}{\Delta V_{\text{in}} f_s^2 L} \tag{3.14}$$

$$C_o = \frac{I_o D}{f_s \Delta V_o} \tag{3.15}$$

Avec:

$$\Delta V_o = 0.02\, V_o \tag{3.16}$$

$$\Delta V_{\text{in}} = 0.02\, V_{\text{in}} \tag{3.17}$$

La charge résistive R_L s'obtient à partir de la puissance de charge et la tension en sortie:

$$R_L = \frac{V_o^2}{P} \tag{3.18}$$

Où:

f_s est la fréquence de commutation en hertz,

ΔI_L est le courant d'ondulation de l'inductance d'entrée (en ampères),

ΔV_o et ΔV_{in} les tensions d'ondulation de sortie et d'entrée,

P est la puissance de fonctionnement (en Watts).

3.2 Modélisation du système biomasse

3.2.1 Choix de la technologie et caractéristique

Le système biomasse à l'étude est basé sur la combustion de la biomasse sèche forestière. Dans le processus de combustion, le séchage, la pyrolyse et la gazéification sont des étapes intermédiaires qui se perçoivent plus dans des applications à grande échelle ou l'alimentation est en continue. Notre choix du procédé de transformation a été appuyé par le fait que la biomasse forestière surtout sèche ne soit presque pas méthanisable à cause de la lignocellulose difficile à dégrader et nécessitant des prétraitements.

- **Caractéristique de la biomasse**

Principaux facteurs tels que la composition, la densité énergétique volumique également

le pouvoir calorifique permettent de qualifier les combustibles pour une valorisation électrique. La biomasse forestière inclut les copeaux, le bois déchiqueté, les branchages et écorces. Elle se compose de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), aussi d'azote (N) et de soufre (S) en faible proportion donc excellente performance en combustion. Le tableau 3-1 ci-dessous regroupe ces différents composants et leur pourcentage.

Tableau 3-1 Composition élémentaire de la biomasse

Éléments	**Pourcentages (%)**
C	48 à 52
H	6
O	40 à 45
N	0.1 à 0.5
S	< 0.05

Le pouvoir calorifique de cette biomasse indique sa capacité à fournir une quantité de chaleur lors de sa combustion. Il est dit supérieur ou inférieur (PCS et PCI) lorsque l'eau produite par la réaction est à l'état liquide ou vapeur [21]. Plus le PCI est élevé, plus le combustible est performant. Il est la donnée la plus intéressante à considérer et dépend du taux d'humidité de la matière organique [17].

Tableau 3-2 Pouvoir calorifique inférieur et humidité de différentes biomasses

Biomasse	**PCI (MJ/kg)**	**Humidité (%)**
Copeaux	19	30
Bois déchiqueté	18–20	8–15
Branchages et écorces	18	30–50

Il existe cependant plusieurs modèles de chaudières s'adaptant à différentes gammes de puissances et en fonction du type et taux d'humidité de la biomasse [17]. La densité énergétique volumique du bois compacté est d'environ 900 $\mathrm{kWh/m^3}$.

3.2.2 Modélisation de la turbine et de la machine synchrone

- **Principe de fonctionnement de la turbine**

La turbine à gaz se compose de 3 principaux éléments le compresseur, la chambre de combustion et la turbine [48]. Le modèle simplifié peut être divisé en 2 sous-systèmes celui de la vanne de carburant avec l'actionneur et de la turbine représenté par son couple. Le compresseur, composé d'un ensemble de roues, comprime l'air extérieur, simplement filtré, jusqu'à 10 à 15 bars, voire 30 bars pour certains modèles [49].

Le combustible est injecté dans la chambre de combustion où il se mélange à l'air compressé et s'enflamme. Les gaz chauds se détendent en traversant la turbine, où leur énergie thermique est convertie en énergie mécanique. Les gaz brûlés s'échappent par la cheminée à travers un diffuseur. Le mouvement de rotation de la turbine est communiqué à l'arbre qui actionne d'une part le compresseur, d'autre part l'alternateur accouplé à son extrémité droite. Le réglage de la puissance et de la vitesse de rotation est possible en agissant sur le débit de l'air en entrée et sur l'injection du carburant [50].

L'un des modèles de turbine à gaz les plus utilisés est celui de Rowen, qui consiste en des représentations mathématiques simplifiées des turbines à gaz à usage intensif. Les gains, coefficients et constantes de temps du système de turbine à gaz utilisés dans les modèles de Rowen représentent des valeurs de conception et ont été calculées et vérifiés par des tests et des expériences réelles sur le terrain. De nombreux chercheurs ont utilisé le modèle de Rowen et l'ont réduit pour représenter des modèles de microturbines qui sont tous basés sur des turbines à gaz à arbre unique [51].

Pour faire la modélisation, différentes équations des transformations sont relevées et un modèle mathématique de la turbine décrivant le comportement du système est développé.

Avec comme hypothèse une combustion complète, des rendements constants, des pertes thermiques négligées et une dynamique simplifiée.

- **Équations des transformations**

Le système biomasse est basé sur un cycle thermique. La puissance de la turbine est donc le résultat de la chaleur générée à la suite de la combustion de biomasse. Pour obtenir la puissance mécanique et électrique une série de conversion et d'opération se fait:

Combustion production de chaleur : la quantité de chaleur s'obtient en fonction du débit massique, du PCI, du rendement de combustion

$$Q_{\text{ther}} = \dot{m}_{\text{bio}} \times \text{PCI} \tag{3.19}$$

$$Q_{\text{comb}} = Q_{\text{ther}} \times \eta_{\text{comb}} \tag{3.20}$$

Production de vapeur : dépend du rendement de la chaudière et de la chaleur de combustion

$$Q_{\text{vap}} = Q_{\text{comb}} \times \eta_{\text{chau}} \tag{3.21}$$

Puissance mécanique : est fonction du rendement de la turbine et de la quantité de vapeur

$$P_{\text{meca}} = \eta_{\text{tur}} \times Q_{\text{vap}} \tag{3.22}$$

Puissance électrique : à partir de la puissance mécanique et du rendement du générateur

$$P_{\text{elec}} = \eta_{\text{gen}} \times P_{\text{meca}} \tag{3.23}$$

Dans cette étude les fonctions de transfert permettent de modéliser dynamiquement le comportement et simplifier la simulation sans utiliser les blocs. La représentation

et modélisation de la turbine passe par celle de l'actionneur qui permet l'entrée du combustible et du positionneur de vanne. Ils sont représentés par des fonctions de premier ordre [48] :

$$w(s) = \frac{k_f}{\tau_f s + 1} e(s) \tag{3.24}$$

$$e(s) = \frac{a}{bs + c} F(s) \tag{3.25}$$

Le débit massique du carburant est représenté par w. Les paramètres a, b, c sont ceux de la valve, e est sa position et F est le signal de demande en carburant.

La fonction de couple délivrée par la turbine est donnée par l'équation suivante de manière algébrique :

$$T = k\,(w - 0.23) + 0.5\,\Delta\omega \tag{3.26}$$

Avec,

k facteur dépendant du PCI,

$\Delta\omega$ déviation de la vitesse de rotation de la turbine.

Les facteurs k et 0,23 tiennent compte de la caractéristique typique de la turbine en termes de rapport puissance/carburant, qui augmente de manière linéaire depuis une puissance nulle à un taux de carburant de 23% jusqu'à la puissance nominale à un taux de carburant de 100%.

À partir du couple on obtient la puissance mécanique en sortie en fonction de la vitesse de rotation par cette formule :

$$P_m = T \times \omega \tag{3.27}$$

Nous avons modélisé et implémenté notre turbine sur MATLAB/Simulink en se référant aux travaux de [52].

- **Machine synchrone**

Pour notre système, le bloc fonctionnel intégré MATLAB/Simulink de la machine synchrone qui régule automatiquement sa fréquence est utilisé. La régulation de la tension terminale du générateur est réalisée à l'aide d'un bloc de système d'excitation à rétroaction disponible dans MATLAB/Simulink. Ce bloc est couplé à notre gouverneur qui lui délivre la puissance mécanique.

En effet sa modélisation repose sur trois sous modèles à savoir le modèle électrique, le modèle mécanique et l'excitation.

- Équation mécanique

  L'équation (3.28) ci-dessous représente l'équation de swing de la machine synchrone, reliant la dynamique de la vitesse mécanique au déséquilibre entre le couple mécanique et le couple électromagnétique.

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H}\int_0^t (T_m - T_e) - K_d\,\Delta\omega(t)\,dt \tag{3.28}$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t) \tag{3.29}$$

  Avec :

  H : moment d'inertie;

  T_m : couple mécanique;

  T_e : couple électromagnétique;

  K_d : coefficient d'amortissement;

  $\omega(t)$: vitesse mécanique du rotor;

  ω_0 : vitesse de fonctionnement.

  $\Delta\omega(t)$: variation de vitesse par rapport à la vitesse de fonctionnement

- Équation électrique

Le rotor est modélisé par un enroulement d'excitation et un enroulement amortisseur sur l'axe direct, et par deux enroulements amortisseurs sur l'axe en quadrature.

Les schémas suivants présentent les axes direct et quadratique du modèle dynamique d'une machine synchrone.

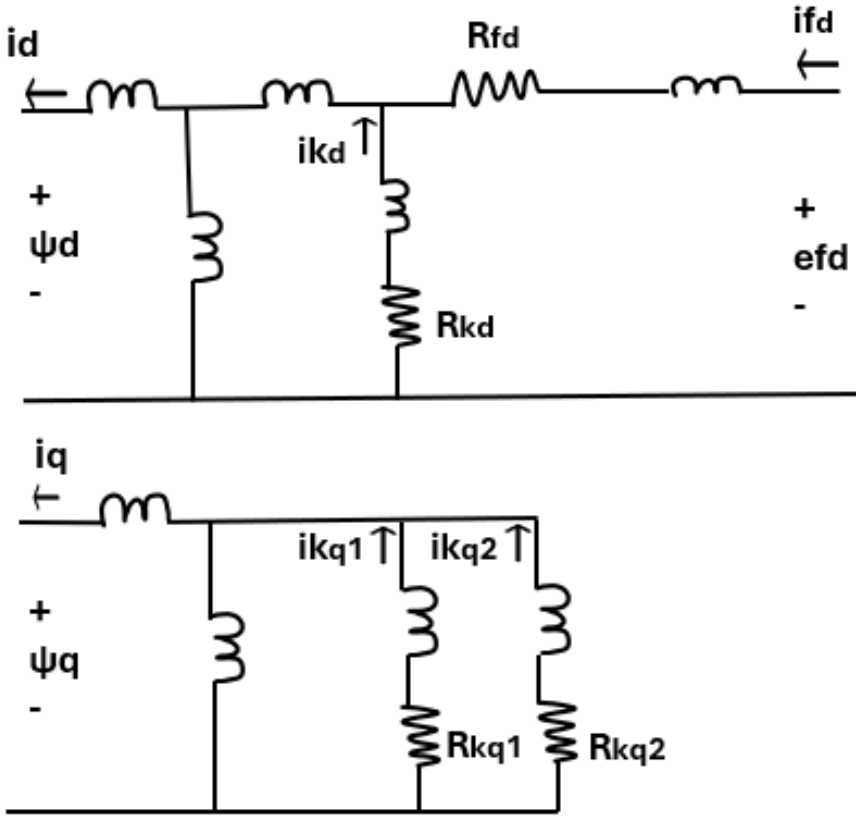


Figure 3.7 Circuit équivalent des axes direct et quadratique de la machine synchrone

Les équations pertinentes sont exprimées dans le repère dq. Ces équations

exprimées sont celles des tensions statoriques:

$$V_d = -R_s i_d - \omega \psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \tag{3.30}$$

$$V_q = -R_s i_q + \omega \psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \tag{3.31}$$

$$V_0 = -R_0 i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} \tag{3.32}$$

$$0 = \frac{d\psi_{kd}}{dt} + R_{kd} i_{kd} \tag{3.33}$$

$$0 = \frac{d\psi_{kq1}}{dt} + R_{kq1} i_{kq1} \tag{3.34}$$

$$0 = \frac{d\psi_{kq2}}{dt} + R_{kq2} i_{kq2} \tag{3.35}$$

La présence de deux circuits amortisseurs sur l'axe q permet de reproduire avec plus de précision les phénomènes transitoires de la machine en introduisant des constantes de temps rapide et plus lente. D'un point de vue physique, il s'agit d'une représentation équivalente destinée à améliorer la précision des simulations.

L'axe d comporte déjà l'enroulement d'excitation i_{fd} qui participe aux dynamiques électromagnétiques. Un seul enroulement amortisseur supplémentaire est généralement suffisant pour représenter correctement les phénomènes transitoires sur cet axe. Le couple électromagnétique est donné ainsi avec p le nombre de paire de pôles:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left(\psi_d i_q - \psi_q i_d \right) \tag{3.36}$$

- Excitation

Pour une excitation simple, on a:

$$V_{fd} = \frac{d\psi_{fd}}{dt} + R_{fd} i_{fd} \tag{3.37}$$

Le flux rotorique est proportionnel au courant d'excitation :

$$\psi_f = k_f i_f \tag{3.38}$$

- **Convertisseur AC-DC**

Le convertisseur AC-DC ou encore redresseur peut être commandé à thyristor ou non commandé à diode. Contrairement aux redresseurs commandés, les redresseurs à diodes ne nécessitent aucune stratégie de commande spécifique ni de circuit de pilotage, ce qui réduit la complexité globale du système.

Bien que les redresseurs commandés offrent une meilleure flexibilité en permettant le contrôle direct de la tension de sortie, leur utilisation implique des coûts supplémentaires ainsi qu'une augmentation des pertes de commutation. Dans le système proposé, la régulation de la tension du bus continu est assurée par un convertisseur DC-DC piloté et un régulateur PI. Par conséquent, l'intégration d'un redresseur commandé n'apporte pas d'avantage significatif au regard des objectifs visés.

Nous utilisons ainsi dans notre étude le redresseur triphasé à diodes comme le montre la figure 3.8. Il est utilisé à la sortie de l'alternateur afin de convertir la source alternative en continue car notre système est hybridé en DC et doit alimenter une charge continue.

Le redresseur triphasé à diodes est généralement constitué de six diodes montées en pont, formant une structure dite pont de Graetz triphasé. Chaque diode conduit lorsque

la tension de phase correspondante devient positive par rapport au point neutre du côté continu.

À tout instant, deux diodes conduisent simultanément : une diode du groupe supérieur (phase la plus positive), une diode du groupe inférieur (phase la plus négative).

La commutation naturelle entre les diodes s'effectue automatiquement en fonction des tensions instantanées des phases, sans nécessité de circuit de commande externe.

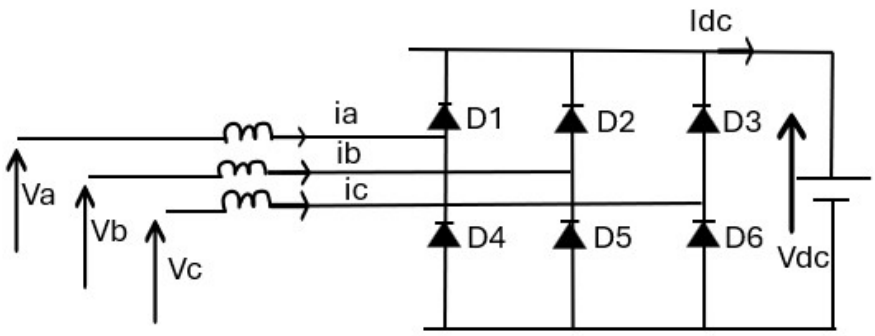


Figure 3.8 Redresseur triphasé

- **Convertisseur buck-boost**

Le convertisseur buck-boost implémenté à partir de MOSFET, diode, inductance et capacité est utilisé pour adapter la tension continue provenant des sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque ou générateur biomasse) vers une tension DC régulée au niveau du bus continu. Il permet à la fois d'augmenter ou de diminuer la tension, et est commandé par un générateur d'impulsion régulé par un correcteur PI. Sa modélisation se fait en fonction des tensions d'entrée et de sortie, du facteur d'ondulation de courant et tension, et de la fréquence suivant les équations ci-dessous. Elle repose sur la moyenne des

tensions/courants aux bornes de l'inductance et capacité sur une période de découpage.

$$D = \frac{V_o}{V_{\text{in}} + V_o} \tag{3.39}$$

$$L = \frac{(V_{\text{in}} - V_o)\, V_o}{f_s\, \Delta I_L\, V_{\text{in}}} \tag{3.40}$$

$$C = \frac{\Delta I_L}{8\, f_s\, \Delta V_o} \tag{3.41}$$

Il est représenté comme suit à la figure 3.9.

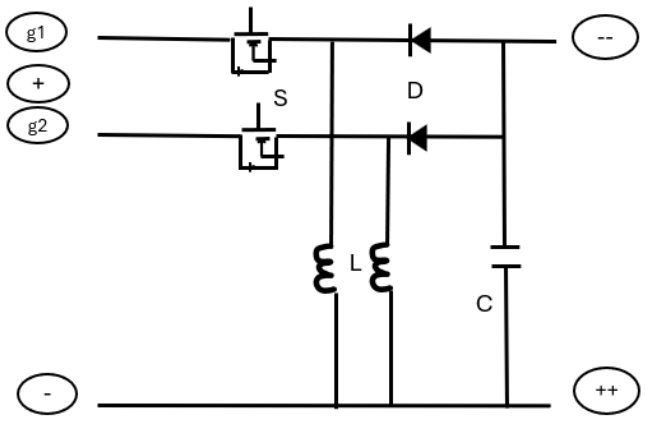


Figure 3.9 Schéma du convertisseur de tension

3.2.3 Dimensionnement et choix des puissances

Pour notre dimensionnement, nous optons pour un système solaire PV fournissant une puissance de 10.5 kW et une puissance de 10.2 kVA délivrée par l'alterneur du générateur synchrone. Ses paramètres sont:

- Puissance apparente S= 10.2 kVA;
- Tension U = 400V ;
- Fréquence f = 60 Hz;
- Vitesse de rotation N = 1800 tr/min.

Le générateur PV est constitué de 35 modules photovoltaïques de puissance 300 W chacun à un rayonnement solaire de $1000\,\mathrm{W/m^2}$ et une température de 25°C.
Les caractéristiques sont regroupées dans le tableau 3-3 suivant:

Tableau 3-3 Caractéristique panneau PV

Symboles	**Valeurs**
P_{max}	300.16 W
V_{oc}	38.8 V
V_{mp}	32 V
I_{sc}	9.92 A
I_{mp}	9.38 A

Chaque sous-système est connecté à la même charge résistive. La tension du bus continu est fixée à 470 V, celle à la sortie du système PV. Le système hybride par un schéma bloc plus détaillé représenté à la figure 3.10 est simulé sur une période de 3 secondes avec des variations des conditions (permutation de sources, variation d'irradiation) afin d'observer le comportement dynamique de ce dernier.

Étant donné que le générateur PV produit naturellement le courant continu (DC) et notre système n'étant pas d'une très grande puissance nous ferons l'interconnexion DC/DC entre le PV et le système biomasse. La machine synchrone représentant la biomasse est connectée à un redresseur puis un convertisseur buck-boost contrôlé par un régulateur proportionnel-intégral de tension afin de permettre l'hybridation avec le système solaire.

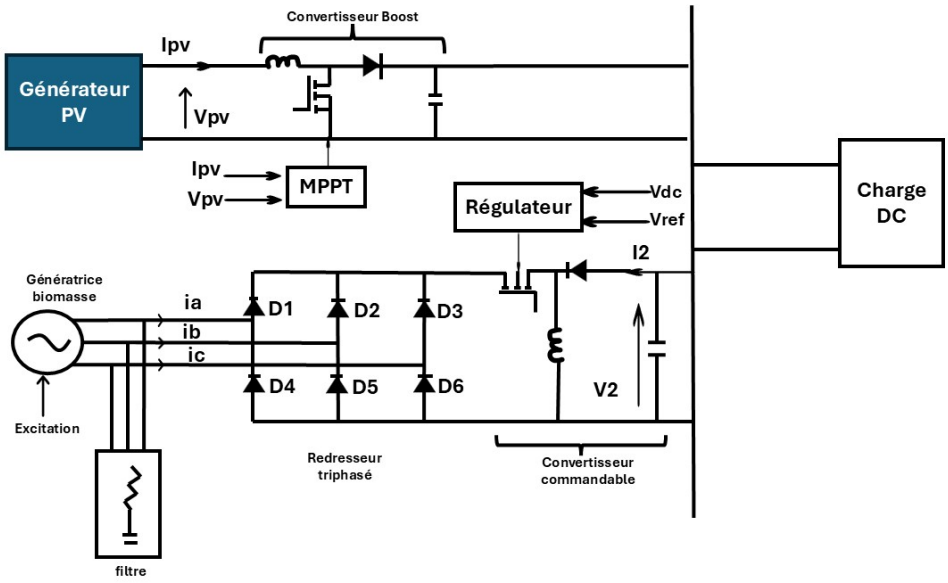


Figure 3.10 Schéma bloc du système

Le choix d'utilisation d'un bus DC permet de réduire le nombre d'étages de conversion, donc d'obtenir une meilleure efficacité globale du système. Également de faciliter la compatibilité avec le PV produisant naturellement du DC. Contrairement aux micro-réseaux AC, aucune synchronisation en fréquence ou en phase n'est nécessaire, ce qui améliore la stabilité dynamique et la robustesse du système face aux variations de charge ou d'irradiance.

Dans la section suivante seront présentés les résultats de simulation et les méthodes de gestion.

Chapitre 4 - Contrôle, gestion et simulation du système hybride

Les systèmes hybrides associent plusieurs sources d'énergie renouvelable afin d'assurer une production d'électricité à la fois fiable et durable. L'optimisation de leur gestion est essentielle pour maintenir la stabilité du système énergétique tout en améliorant la rentabilité économique, notamment en réduisant les coûts de production et en augmentant l'efficacité globale. Cette gestion doit intégrer la nature et la hiérarchisation des charges, ainsi que les contraintes techniques et économiques spécifiques à chaque source d'énergie. Dans ce chapitre, différentes méthodes de contrôle et de gestion sont présentées.

4.1 Méthode de contrôle

Afin d'assurer une coordination efficace des flux énergétiques entre les différentes sources, un contrôle local est indispensable, notamment au niveau de la vitesse, de la tension et de la fréquence. Dans ce contexte, l'utilisation de contrôleurs Maximum Power Point Tracking (MPPT), capables de s'adapter à la fois à la production et à la demande, constitue l'approche retenue dans ce travail.

Plusieurs algorithmes MPPT sont utilisés dans la littérature. Les méthodes conventionnelles incluent la technique Perturb and Observe (P&O), la conductance incrémentale (INC), la tension en circuit ouvert fractionnaire (FOCV) et le courant de court-circuit fractionnaire (FSCC). À celles-ci s'ajoutent des approches plus avancées, telles que les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et les techniques basées sur la logique floue.

Le tableau comparatif suivant fait une synthèse des différentes méthodes MPPT.

Tableau 4-1 Méthodes MPPT

Méthodes MPPT	**Principes**	**Avantages**	**Inconvénients**
Perturb and Observe (P&O)	Perturbe la tension et observe la variation de puissance	Facile à implémenter, faible coût	Oscillations autour du MPP, faible précision lors de variations rapides
Conductance incrémentale	Compare la conductance instantanée et incrémentale	Haute précision, bonne réponse aux variations rapides	Implémentation complexe, calcul plus important
FOCV	Mesure la tension à vide et estime la tension maximale	Facile à implémenter, se rapproche du MPP dans des conditions d'ensoleillement variables	Interrompt la production de puissance
FSCC	Mesure le courant de court-circuit et estime le courant maximal	Moins sensible aux chutes de tension soudaines	Moins précise si la température varie fortement, entraîne des pertes thermiques et de puissance
Réseaux neuronaux	Apprentissage du comportement du système	Très précis, performant en conditions variables	Besoin de données d'apprentissage, complexité élevée
Logique floue	Basée sur des règles linguistiques	Robuste, bonne adaptation aux non-linéarités	Réglage délicat des règles, conception complexe

4.1.1 Algorithme du point de puissance maximale

Lorsque le panneau photovoltaïque est connecté à une charge électrique, celle-ci peut lui imposer des conditions de fonctionnement en termes de courant ou de tension. Ainsi le traqueur de point de puissance maximale va ajuster les caractéristiques de sortie du panneau PV de façon à se rapprocher des performances optimales. Un traqueur de point de puissance maximale MPPT est un dispositif électronique qui mesure la tension délivrée par le panneau sous différentes tensions d'entrée [10].

La génération du champ solaire dépend de la température et de l'irradiance de l'environnement. La puissance PV est exprimée comme suite en fonction du rendement des modules, de la surface et l'irradiance [35] :

$$P_{\mathrm{PV}} = \eta \times I \times S \tag{4.1}$$

La méthode MPPT employée afin de tirer le maximum d'énergie du solaire est celle de perturbation et d'observation (P&O). Elle consiste à provoquer une perturbation sur la tension, ce qui engendre une variation de la puissance (ΔP) pour permettre au point de fonctionnement de converger vers le point de puissance maximum (MPP). Cette méthode est généralement adapté aux systèmes à faible inertie.

Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction ce qui va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Cette technique est basée sur l'algorithme présenté à la figure 4.1 [53]. Elle est largement utilisée du fait de sa simplicité et de la mesure de tension et courant uniquement.

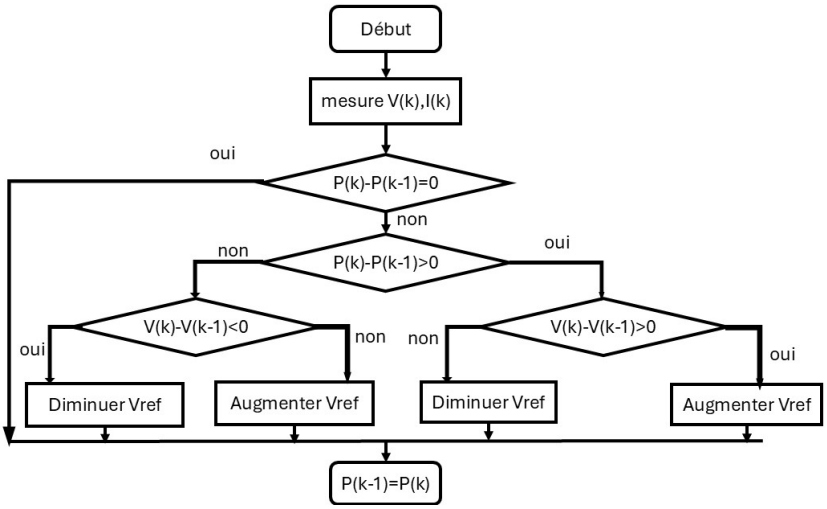


Figure 4.1 Organigramme de l'algorithme MPPT

Selon l'organigramme de la méthode P&O, la tension V et le courant I, sont mesurés afin de calculer la puissance de sortie courante P(k) de la rangée. Cette puissance P(k) est comparée à la puissance P(k-1) de la dernière mesure.

Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle.

Le rapport cyclique est réduit lorsque les différences de puissance et de tension sont positives ou négatives. Il est augmenté dans le cas où la tension est positive et la puissance négative, et vice versa. Le rapport cyclique modifié est transmis au générateur d'impulsions qui produit une impulsion pour le commutateur [47].

Le contrôleur MPPT par l'algorithme P&O présenté dans l'étude agit sur les composants du convertisseur boost afin d'obtenir de meilleurs résultats.

4.1.2 Régulation du système

Le contrôle du système hybride est basé sur une approche déterministe avec régulation classique (PI) et priorisation des sources renouvelables. Plus précisément, la régulation PI est utilisée pour contrôler les variables clés du système, telles que la tension du bus continu, la puissance fournie et, selon le cas, la vitesse des machines. Le principe de fonctionnement repose sur la comparaison entre la tension mesurée du bus continu V_{dc} et sa valeur de référence V_{dc}^{ref}.

L'erreur de régulation est définie par :

$$e(t) = V_{dc}^{ref} - V_{dc}(t) \tag{4.2}$$

Le contrôleur est ainsi conçu pour maintenir une tension de sortie stable malgré les fluctuations de la tension d'entrée. Afin d'obtenir des performances dynamiques satisfaisantes (temps de réponse, dépassement, stabilité), les paramètres du régulateur illustré par son schéma bloc à la figure 4.2 ont été déterminés à l'aide d'une méthode d'auto-ajustement (auto-tuning). Cette technique permet d'identifier automatiquement des valeurs optimales des gains en fonction du comportement du système, évitant ainsi un réglage manuel souvent long et imprécis.

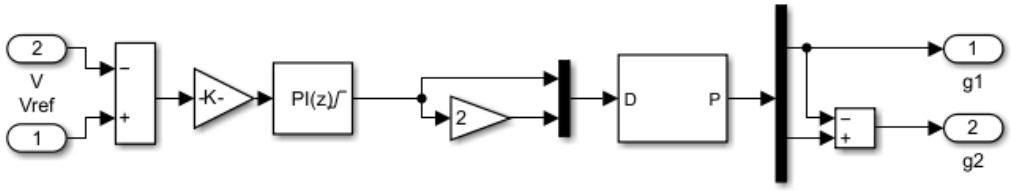


Figure 4.2 Bloc de commande du convertisseur

Le signal de commande généré par le régulateur PI est donné par :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)\,dt \tag{4.3}$$

où :

- $u(t)$ est le signal de commande ;
- K_p est le gain proportionnel ;
- K_i est le gain intégral ;
- $e(t)$ est l'erreur de régulation.

Le terme proportionnel permet d'améliorer la rapidité de la réponse dynamique, tandis que le terme intégral élimine l'erreur statique et garantit le maintien de la tension du bus continu autour de sa valeur de référence. Le signal de commande obtenu est utilisé pour ajuster le rapport cyclique des convertisseurs de puissance afin d'assurer l'équilibre énergétique du système.

Ce choix est motivé par plusieurs raisons techniques à savoir:

- La simplicité de mise en œuvre dans un environnement comme MATLAB/Simulink;
- Le faible coût computationnel, adapté à une simulation temps réel;
- La bonne adaptation à une architecture hybride.

4.2 Stratégies de gestion

La gestion de la demande et des charges consiste à adapter en permanence la production d'énergie au profil de consommation. À cet effet, l'exploitation de séries temporelles de production et de consommation permet d'établir des modèles de prévision des charges, facilitant ainsi l'anticipation des variations et une meilleure planification de la production.

Par ailleurs, la mise en place d'une architecture de gestion dédiée aux systèmes hybrides (PV + biomasse), intégrant des algorithmes de basculement ou de prédiction fondés sur l'intelligence artificielle, constitue une approche pertinente pour améliorer la performance globale du système. Ces méthodes permettent une prise de décision plus rapide et plus adaptée face aux fluctuations des ressources et de la demande.

Enfin, l'adoption d'une stratégie de priorisation des sources d'énergie fait partie des leviers essentiels de gestion. Par exemple, l'énergie photovoltaïque est privilégiée durant les périodes d'ensoleillement, tandis que la biomasse intervient en complément lorsque la production solaire est insuffisante. De même, l'arrêt ou la réduction de la production de certaines sources peut être envisagé lorsque cela s'avère nécessaire, afin d'optimiser l'efficacité globale et d'éviter les surplus énergétiques.

4.2.1 Gestion par priorité d'utilisation de la source

La stratégie repose sur l'exploitation de manière optimale des caractéristiques des deux sources. Le générateur PV couvre d'abord la charge à l'instant donné, le système biomasse fournit la charge de base, comble le déficit ou alimente la charge quand le PV est insuffisant. Cette logique maximise la consommation de l'énergie solaire tout en utilisant l'énergie biomasse comme source de soutien fiable.

Le système photovoltaïque est exploité en première priorité en raison de sa disponibilité diurne prévisible. Ainsi, lorsque la production photovoltaïque est suffisante, elle alimente directement les charges.

La génératrice biomasse joue un rôle stratégique de source pilotable. Contrairement au photovoltaïque, elle peut fonctionner indépendamment des conditions météorologiques et fournir une puissance quasi constante sur de longues durées. Elle est ainsi principalement utilisé pour garantir l'alimentation des charges prioritaires, et stabiliser le fonctionnement global du système.

Lorsque la production du PV devient insuffisante avec un faible ensoleillement, des nuages, ou une période nocturne, le système biomasse intervient automatiquement pour compenser le déficit entre la charge demandée et la puissance PV disponible. Également pour prendre totalement en charge l'alimentation en l'absence de production solaire, et maintenir la continuité de service sans interruption. Cette stratégie est résumée par l'organigramme suivant à la figure 4.3.

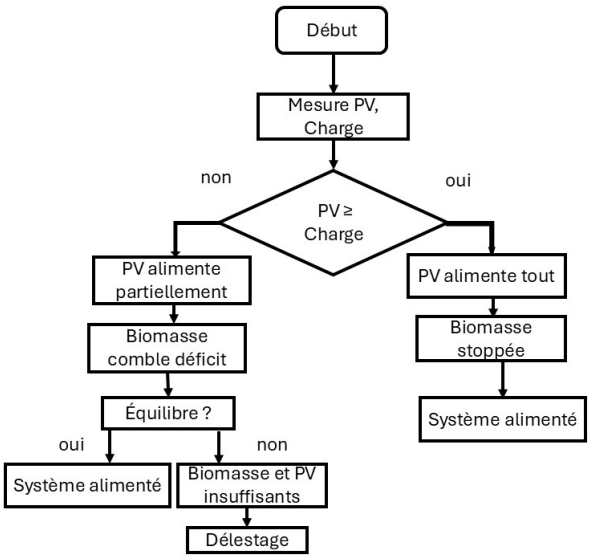


Figure 4.3 Gestion par priorité de source

4.2.2 Gestion par utilisation des charges

À ce niveau, les charges sont connectées et déconnectées par priorité d'utilité. Pour ce faire les charges se répartissent de la façon suivante à savoir optionnelle et prioritaire. Les charges flexibles pouvant être alimentées uniquement en présence d'un surplus, ou coupées automatiquement en cas de déficit énergétique sans impact majeur, sont celles dites optionnelles. Cependant, les charges prioritaires doivent être alimentées en permanence et sont d'une importance capitale tels que les équipements médicaux dans les hôpitaux ou centres de santé.

Toutes ces charges peuvent être également programmées dans le temps afin d'être utilisées à des périodes spécifiques en journée pour profiter du pic de production solaire et la nuit ou en heure creuse lorsque la biomasse est disponible.

4.2.3 Gestion par l'intelligence artificielle

L'objectif de cette partie est de développer un modèle de prévision à court terme basé sur l'intelligence artificielle afin de :

- prédire la consommation électrique;
- estimer la production solaire;
- prévoir la production biomasse;
- et déduire la production totale disponible.

Cela sur un horizon horaire de 24 à 72 heures, dans le but d'implémenter une stratégie de gestion énergétique proactive. Les données utilisées couvrent la période de janvier 2019 à mars 2024, et comprennent la consommation électrique, la production totale des différentes sources de production d'énergie. Cependant, nous nous intéresserons à la consommation, la production solaire et celle de la biomasse comme variable. Les données

sont colletées, analysées et traitées en utilisant les logiciels Python, MATLAB et Excel.

- **Description du modèle**

Avant l'apprentissage, un prétraitement est appliqué afin de garantir la qualité et la cohérence des séries temporelles. Les valeurs manquantes sont interpolées par une méthode linéaire, chaque variable est normalisée dans l'intervalle [0,1] pour homogénéiser les échelles et stabiliser l'apprentissage. Cela permet au modèle d'exploiter les dynamiques journalières et les cycles énergétiques naturels du système.

Le choix d'une fenêtre temporelle glissante de 30 pas de temps repose sur l'hypothèse que les variables énergétiques présentent des dépendances à court terme ainsi que des comportements cycliques. Déterminée à partir d'essais préliminaires, elle permet au modèle de capturer les variations progressives de la consommation et les tendances récentes, tout en limitant la complexité computationnelle.

Le réseau de neurones artificiels (ANN) a été retenu en raison de sa capacité à modéliser des relations non linéaires complexes entre les variables d'entrée (consommation, solaire, biomasse) et les variables énergétiques futures. Contrairement aux méthodes statistiques classiques, les ANN peuvent apprendre directement à partir des données sans nécessiter d'hypothèses explicites sur la dynamique du système.

L'architecture du modèle comprend trois couches cachées composées respectivement de 240, 120 et 60 neurones interconnectés, avec des fonctions d'activation non linéaires de type ReLU [54]. Cette fonction a été choisie pour sa simplicité de calcul, sa capacité à limiter le problème de disparition du gradient et sa bonne performance dans les tâches de régression. La dernière couche fournit une estimation continue de la consommation énergétique future.

L'apprentissage est réalisé à l'aide de l'optimiseur ADAM (Adaptive Moment Estimation), avec un taux d'apprentissage fixé à 0.001, une taille de lot de 200 échantillons et un nombre maximal de 250 époques. ADAM a été privilégié en raison de sa convergence rapide et de sa capacité à adapter automatiquement le taux d'apprentissage de chaque paramètre, ce qui le rend particulièrement efficace pour l'entraînement de réseaux de neurones sur des données potentiellement bruitées.

Les données sont réparties entre les ensembles d'entraînement, de validation et de test selon des proportions de 0.7, 0.1 et 0.2 respectivement. Cette séparation permet d'évaluer la capacité de généralisation du modèle sur des données non utilisées pendant l'apprentissage.

Une fois le modèle entraîné, il est utilisé pour générer des prévisions sur l'ensemble des données. Les prédictions sont réalisées à partir de fenêtres temporelles glissantes construites sur les données passées, puis ramenées à l'échelle physique initiale par une dénormalisation. Cette approche permet d'obtenir une estimation cohérente de l'évolution future de la consommation énergétique à court terme et de la confronter à la demande prévue.

Enfin, les performances du modèle sont évaluées à l'aide des métriques classiques. L'erreur absolue moyenne (MAE) fournit une mesure robuste de l'erreur moyenne globale, tandis que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pénalise davantage les erreurs importantes, offrant ainsi une évaluation complémentaire de la qualité des prédictions.

Les prévisions obtenues sont intégrées dans une stratégie de gestion anticipative, reposant sur la comparaison entre l'offre et la demande prévue.
Cette stratégie permet :

- une réduction des coûts d'exploitation;
- une meilleure planification de la biomasse;
- une augmentation de la pénétration du solaire;
- et une amélioration de la stabilité du système énergétique.

Les résultats obtenus montrent que le réseau ANN est capable de reproduire efficacement les oscillations horaires, les tendances journalières ainsi que les variations progressives de la consommation énergétique. Les courbes de prévision à la figure 4.4 suivent de manière satisfaisante la trajectoire des données réelles, permettant notamment l'identification des pics de consommation et des périodes de forte variabilité.

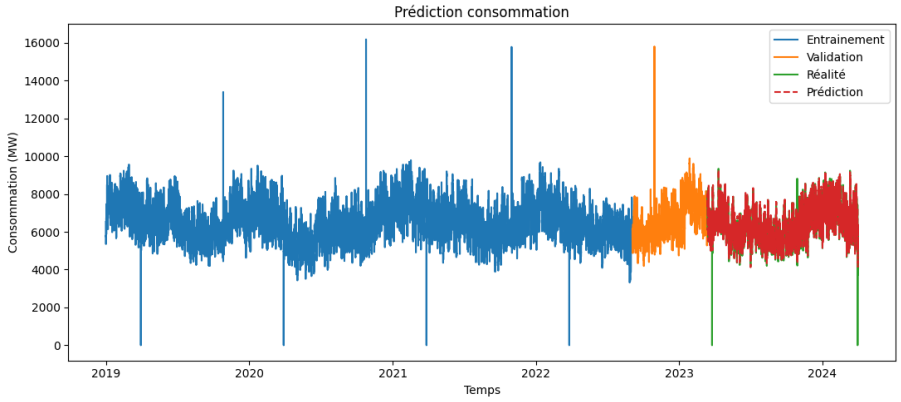


Figure 4.4 Représentation des données et prédiction

L'utilisation d'un réseau ANN constitue ainsi une solution pertinente pour la prévision énergétique à court terme. Cette méthode présente un bon compromis entre précision et simplicité de mise en œuvre, ce qui la rend adaptée aux applications de gestion énergétique et aux systèmes hybrides de production.

Suite à l'application des différentes méthodes de contrôle et gestion, et à partir des modèles mathématiques vus à la section modélisation, nous simulerons le comportement du système.

4.3 Simulation du système hybride

Nous faisons dans cette partie une simulation sur MATLAB/Simulink du système étudié pouvant correspondre à un petit système domestique. Les paramètres du système sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-2 Paramètres du système hybride

Paramètres	**Symboles**	**Valeurs**
Irradiance nominale	G	$1000\,\mathrm{W/m^2}$
Puissance nominale PV	Ppv	10 kW
Puissance biomasse	Pbio	10 kW
Tension de référence	Vdc	470 V
Fréquence de commutation	fs	10 kHz
Inductance du bus	L	0.47 mH
Capacité du bus	C	$411\,\mu F$
Durée de simulation	t	3 s

Le gouverneur, avec dynamique d'actionneur et de turbine implémenté pour notre étude est représenté comme telle à la figure 4.5. Il sert à adapter la puissance mécanique fournie par la turbine afin de maintenir la vitesse du générateur, malgré les variations de charge électrique.

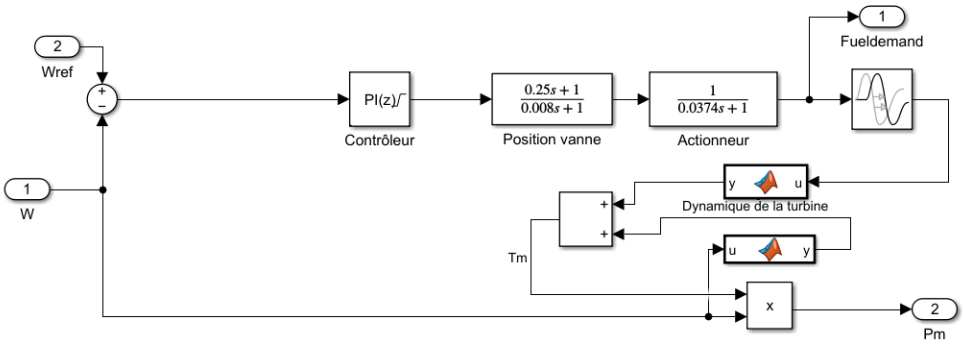


Figure 4.5 Schéma du gouverneur et turbine

4.3.1 Système photovoltaïque

Du système solaire, nous constatons que l'action du convertisseur boost et de l'algorithme MPPT a été pris en compte. La puissance fournie est maximale et la tension est élevée pour une irradiance de $1000\,\mathrm{W/m^2}$. La figure 4.6 montre la tension de sortie du convertisseur survolteur étant autour de 470 V contre 224 V à l'entrée. Sur la figure 4.7, on remarque que la puissance de charge et la puissance maximale du champ PV convergent. Ce qui confirme la nécessité et l'efficacité de la commande pour l'extraction de la puissance maximale disponible dans un système PV.

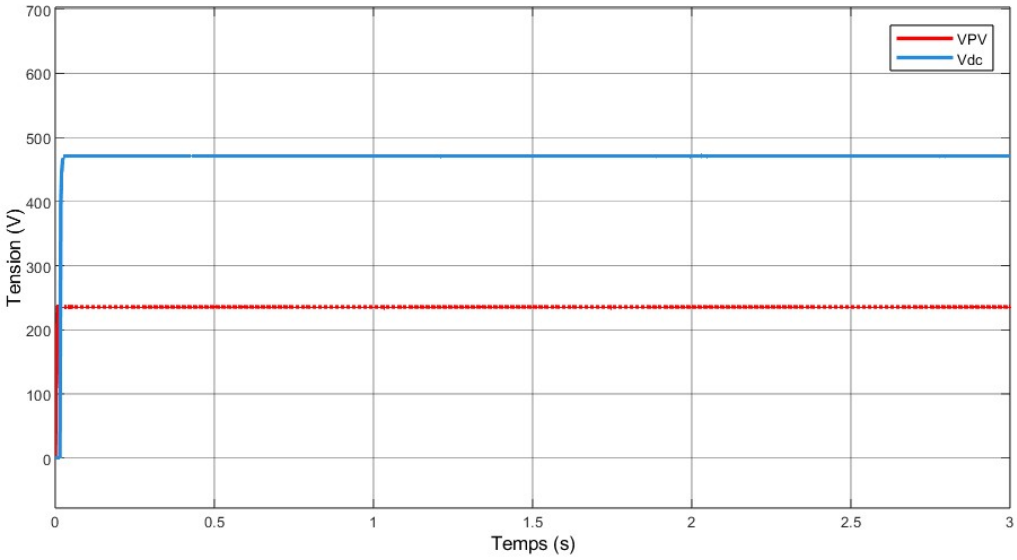


Figure 4.6 Tension du PV avant et après le convertisseur boost

De même, nous pouvons voir la différence entre l'énergie produite en journée et celle produite lorsqu'il y'a moins d'irradiation (moins de photons captés par les cellules PV). La puissance chute de 10 kW à 135 W, de même pour la tension qui passe de 224 V à 27 V. Cela est perçu dans les figures 4.7 et 4.8. Cependant, vu l'absence d'un régulateur de tension au niveau de la charge et d'une source secours, la tension et la puissance de charge suivent les variations du champ PV.

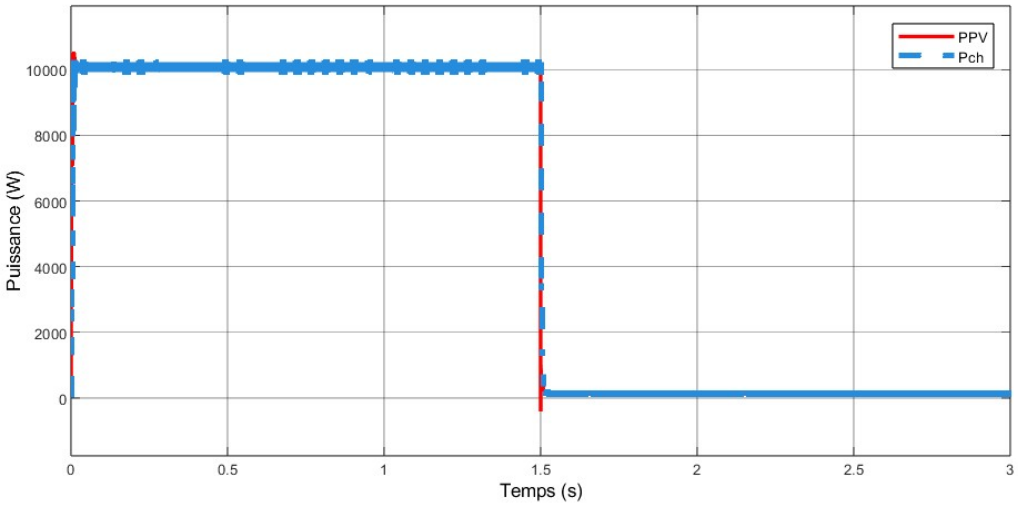


Figure 4.7 Puissance du PV

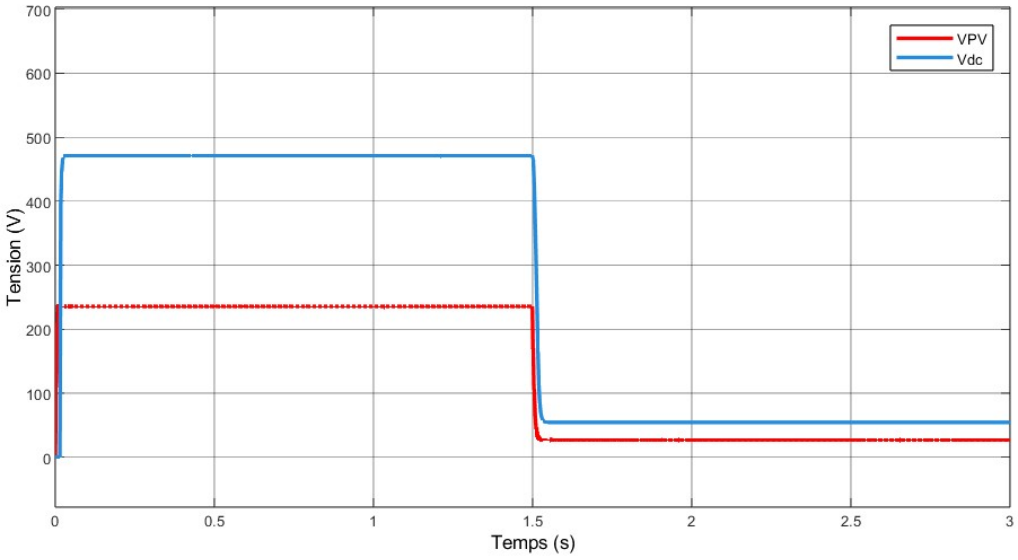


Figure 4.8 Tension du système PV

4.3.2 Système biomasse

Par la suite, les figures 4.9 et 4.10 présenteront la vitesse de rotation et la puissance mécanique de notre système biomasse.

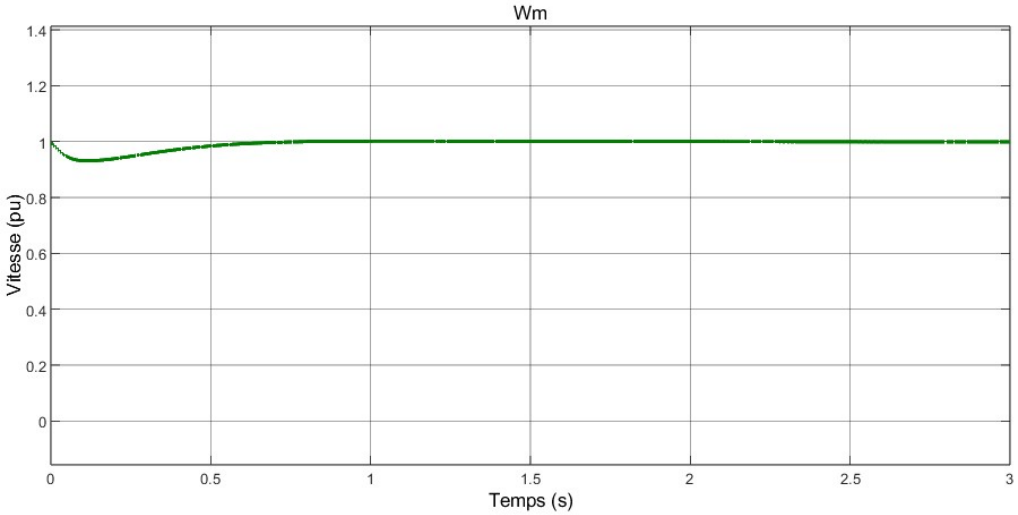


Figure 4.9 Vitesse de rotation

On observe une chute initiale jusqu'à eniron 0.95 pu puis une remontée progressive et enfin une stabilisation autour de 1 pu sans oscillations persistantes. La chute initiale correspond à l'application de la charge électrique alors que le couple mécanique n'est pas encore totalement établi. Le gouverneur détecte l'erreur de vitesse et augmente progressivement la puissance mécanique Pm comme on peut le voir à la figure 4.10.

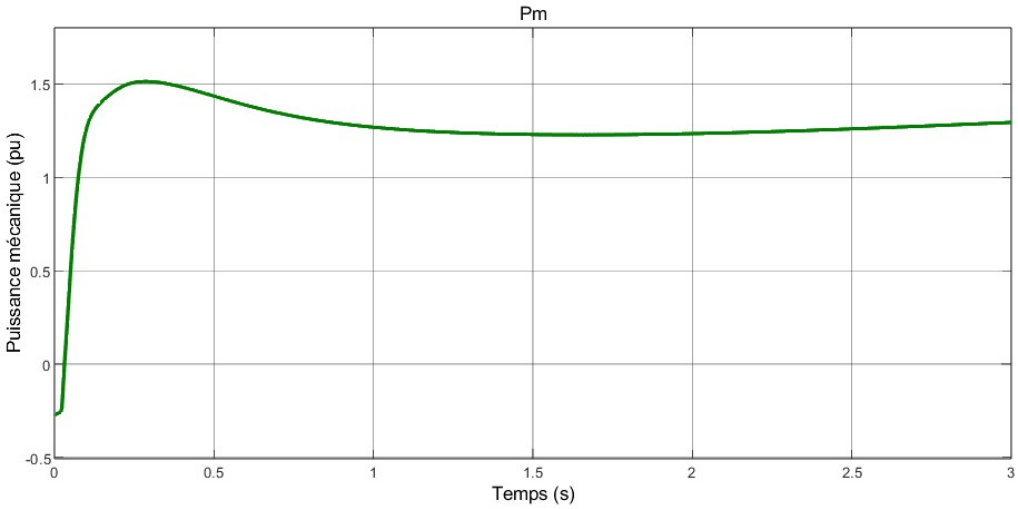


Figure 4.10 Puissance mécanique

Au démarrage, la puissance mécanique présente une valeur négative, ce qui s'explique par le régime transitoire de la machine et de la convention adoptée. Durant cette phase, la machine absorbe de l'énergie afin d'établir les champs électromagnétiques et d'accélérer le rotor. Ainsi, la machine fonctionne temporairement en régime d'absorption d'énergie avant de converger vers un régime permanent stable.

La figure montre une montée progressive de Pm, un dépassement transitoire et une stabilisation autour de 1.1 pu correspondant à la puissance de la charge. Dès que la vitesse est rétablie, le gouverneur retire l'excès de puissance et redescend vers la valeur demandée par la charge.

Les résultats de simulation présentent une régulation efficace de la vitesse mécanique vers sa valeur nominale malgré une chute transitoire liée à l'application de la charge. Le gouverneur de vitesse assure une compensation progressive de la puissance mécanique, tandis que le régulateur d'excitation maintient la tension terminale.

La biomasse est conçue à l'aide d'un générateur synchrone couplé à un système de régulation et à un excitateur. Pour vérifier la stabilité du bus DC, différents scénarios sont envisagés, tels que un changement de la charge résistive, et une variation brusque de l'irradiance de l'énergie solaire. Par exemple, la biomasse est connectée à une charge résistive de 1 kW puis de 8 kW, puis connectée au micro-réseau, et enfin, à 1.5 secondes, un changement brusque de l'irradiance du panneau photovoltaïque est pris en compte.

4.3.3 Résultats de la gestion du système hybride

Variation des charges

Les figures suivantes présentent les résultats de simulation obtenus dans le cadre d'une gestion par priorité de charge du système biomasse. Dans ce cas d'étude, une charge

résistive de 100 Ω est d'abord connectée, suivie d'une charge de 50 Ω.

Dans le cas de la charge de 100 Ω, la puissance demandée est relativement faible (1.3 kW). La machine synchrone fonctionne alors en régime faiblement chargé. Les transitoires de la vitesse mécanique et de la puissance mécanique sont amortis. La puissance fournie converge vers une valeur cohérente avec la puissance théorique de la charge, validant la cohérence du modèle et la stabilité du système.

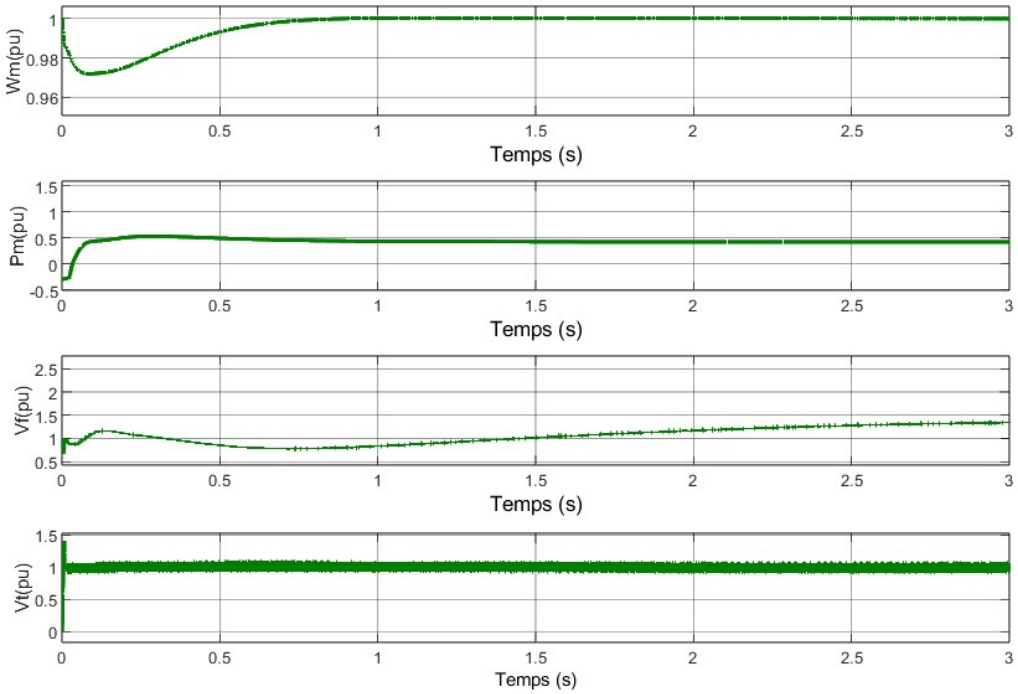


Figure 4.11 Puissance et vitesse pour une faible charge

La réduction de la résistance de charge entraîne une augmentation significative de la puissance électrique demandée par la machine synchrone. En effet, à tension constante, la puissance consommée par une charge résistive est inversement proportionnelle à sa résistance selon la relation $P = \frac{V^2}{R}$.

Lorsque la charge diminue à 50 Ω la puissance demandée passe de 1.3 kW à 2.6 kW.

Cette augmentation de la demande électrique se traduit par une hausse de la puissance mécanique fournie par la machine afin de maintenir l'équilibre énergétique. Elle engendre également des transitoires plus importants au niveau de la vitesse mécanique et de la puissance mécanique, témoignant d'une sollicitation accrue du système.

En réponse, le régulateur de tension (AVR) ajuste la tension d'excitation afin de maintenir la tension aux bornes de la machine. Cette adaptation s'accompagne toutefois d'ondulations plus marquées, typiques d'un fonctionnement sous forte charge.

Malgré ces perturbations, le système conserve sa stabilité et évolue vers un régime permanent satisfaisant et cohérent.

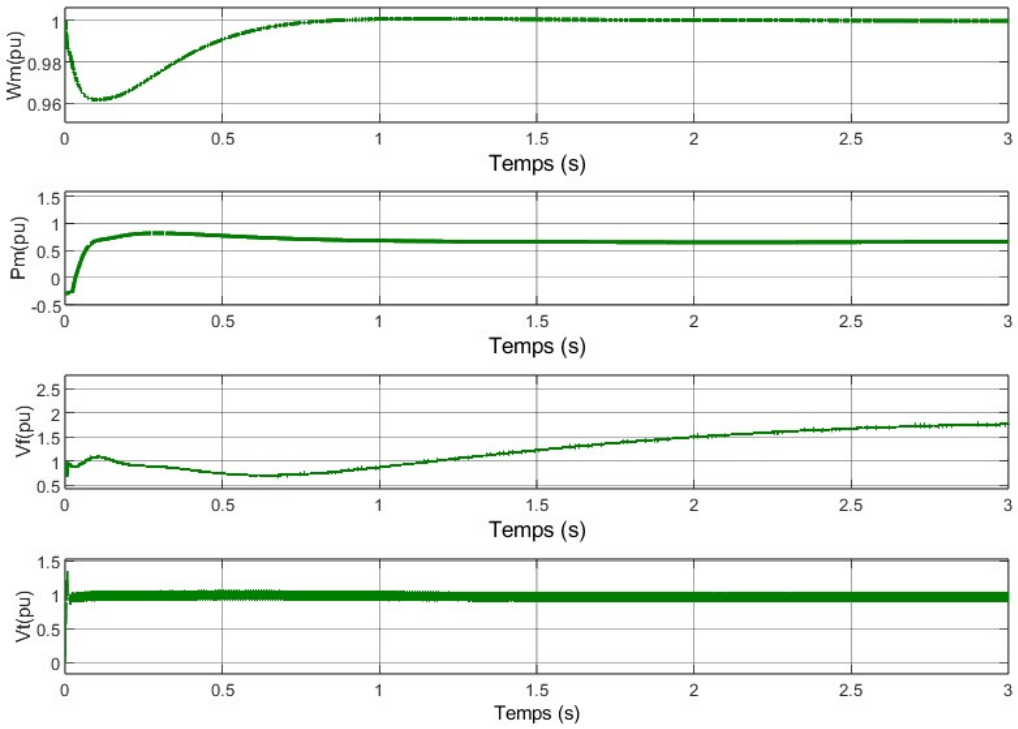


Figure 4.12 Puissance et vitesse pour une lourde charge

Variation du système avant le contrôle

En l'absence de régulation de la tension du bus continu, la tension Vdc évolue librement en fonction du déséquilibre entre la puissance produite et la puissance consommée. Au démarrage, un pic de puissance est observé sur la figure 4.14 en raison de la charge rapide du condensateur du bus DC. Lors de la variation, la diminution de la puissance photovoltaïque entraîne une compensation naturelle par la source biomasse sans aucun contrôle. La tension du bus DC reflète directement ces échanges d'énergie car il agit comme un point d'équilibre entre production et consommation. Toute variation de tension et de puissance crée ainsi une perturbation. La chute de tension n'est pas résolue et la tension de charge n'est pas maintenue suite à l'absence de régulateur.

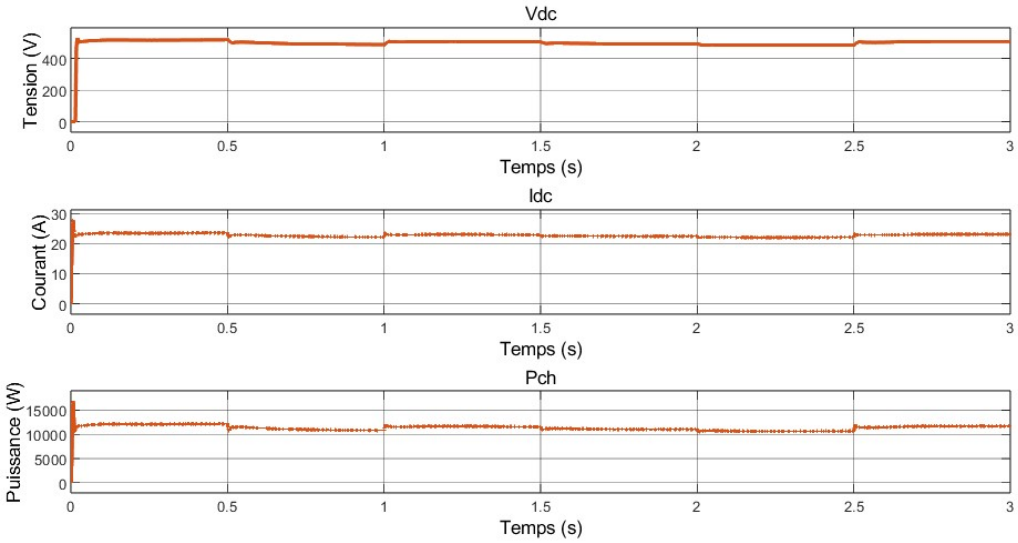


Figure 4.13 Variation au niveau de la charge

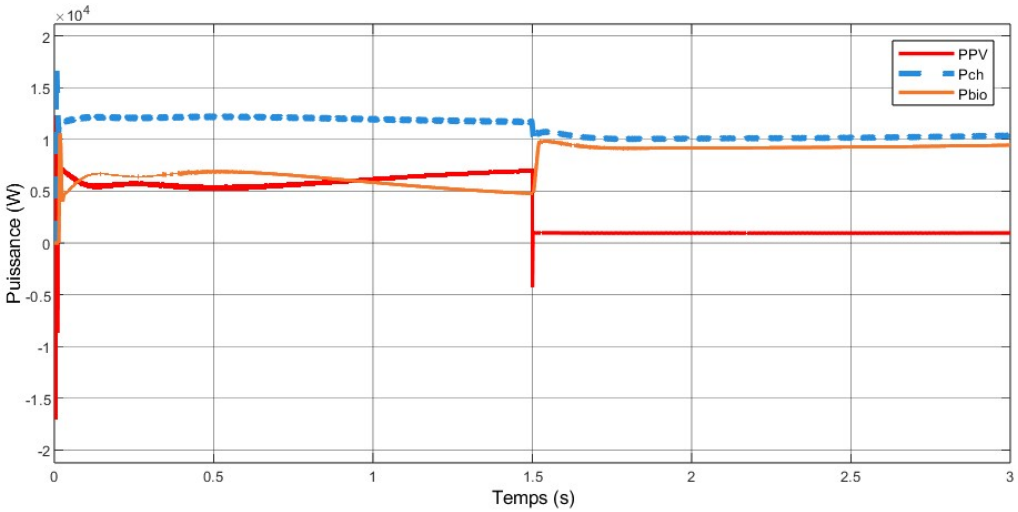


Figure 4.14 Variation des puissances du système

Variation des sources

La partie suivante présente les résultats de simulation lorsque l'on fait une gestion par variation de source dans le système. Lorsque le photovoltaïque n'est plus disponible, après la baisse d'irradiance, la machine synchrone entraînée par la biomasse est apte à continuer progressivement l'alimentation de la charge. La figure 4.15 présente les puissances disponibles dans le système lors d'un changement d'irradiation. La puissance totale de production et la puissance résultante peuvent être calculées comme suit:

$$P_{\text{prod}} = P_{\text{pv}} + P_{\text{bio}} \tag{4.4}$$

$$P_{\text{res}} = P_{\text{prod}} - P_{\text{ch}} \tag{4.5}$$

Dans la phase initiale, la charge d'une puissance de 10 kW est entièrement alimentée par la source photovoltaïque. À l'instant 1.5 s, l'irradiance baisse ne permettant plus au PV de satisfaire la demande avec environ 130 W ainsi le générateur biomasse commence à injecter sa puissance disponible légèrement supérieure à la charge. La biomasse assure

non seulement la compensation mais génère un surplus, garantissant la stabilité du bus DC et la continuité d'alimentation.

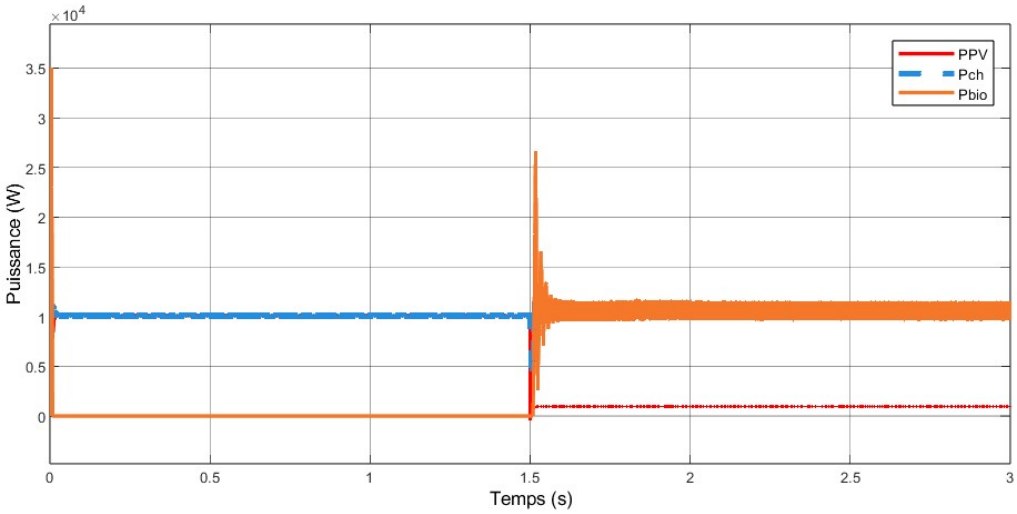


Figure 4.15 Variation des puissances selon la disponibilité des sources

Au niveau de la charge, à la figure 4.16 nous constatons que la tension, le courant ainsi que la puissance restent tous constants malgré la variation d'irradiance à 1.5 s perçue par le petit pic. L'action du régulateur a été pris en compte.

Le convertisseur chargé de réguler et d'assurer la stabilisation de la tension au niveau du bus continu est commandé par un régulateur. Grâce au contrôle du rapport cyclique du MOSFET via le générateur PWM, la tension de sortie reste constante à 470 V. L'introduction du régulateur de tension permet d'imposer une valeur constante du bus DC, améliorant significativement la stabilité, la qualité de l'énergie et d'optimiser le partage de puissance entre les sources.

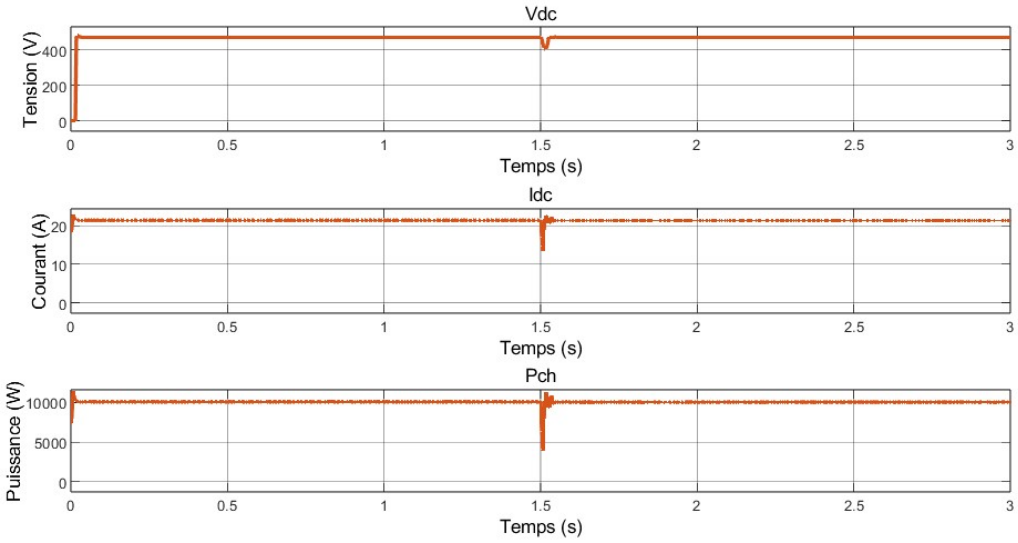


Figure 4.16 Variation de la tension, du courant et puissance de charge

Au niveau de la génératrice, à la diminution de l'irradiance solaire, la puissance photovoltaïque est réduite, ce qui entraîne une augmentation de la puissance demandée à la centrale biomasse. Le couple électromagnétique augmente brusquement, provoquant une baisse temporaire de la vitesse mécanique. Le gouverneur augmente alors la puissance mécanique fournie par la turbine, tandis que l'AVR augmente la tension d'excitation pour maintenir la tension terminale. Après un régime transitoire, le système atteint un nouvel état stable.

Le système d'excitation maintient la sortie du générateur à la tension nominale.

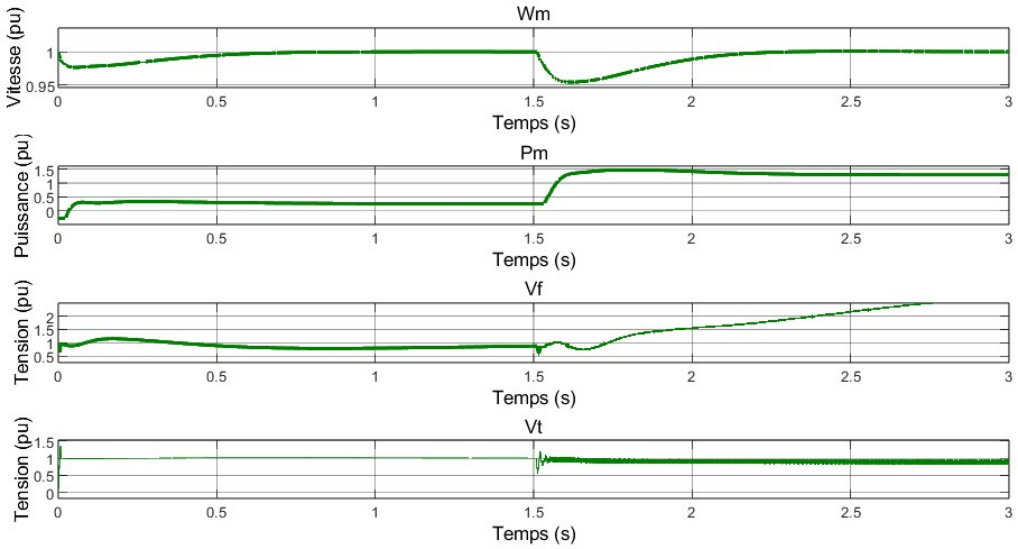


Figure 4.17 Variation de vitesse et puissance mécanique lors d'un changement de charge

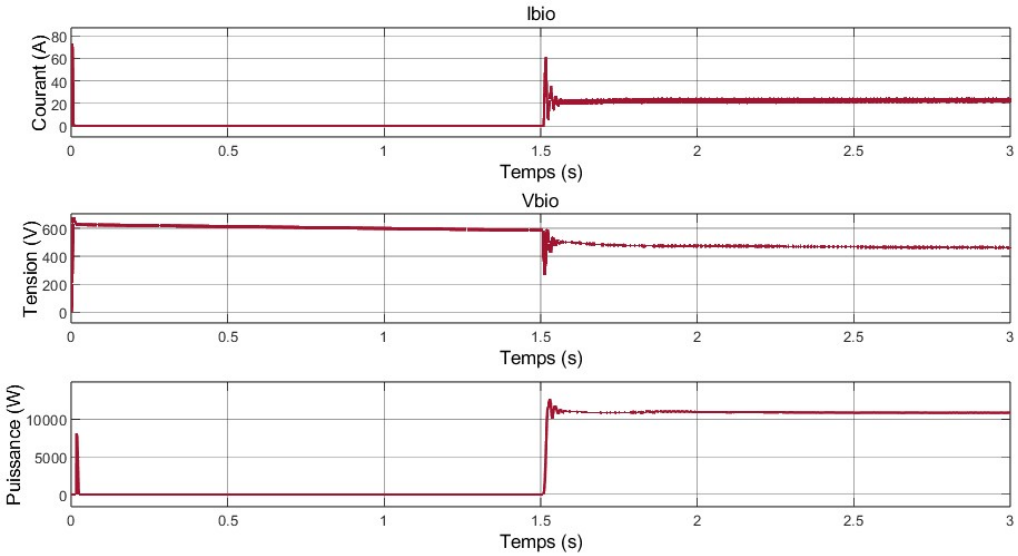


Figure 4.18 Variation du courant de la tension au niveau biomasse

Lors de la phase transitoire, les oscillations observées sur la vitesse et la puissance mécanique sont dues à l'ajustement du gouverneur et du régulateur AVR. En régime permanent, la puissance mécanique fournie par la turbine biomasse s'équilibre avec la puissance électrique demandée par la charge DC, confirmant la stabilité du système hybride. À l'instant où le PV est connecté, le courant du générateur chute à zéro tandis que la tension augmente. Ce phénomène correspond au fonctionnement à vide de la machine, où la puissance mécanique excède la puissance électrique demandée, provoquant une accélération du rotor et une élévation de la tension.

La performance et la robustesse du contrôleur sont également évaluées face à plusieurs perturbations climatiques, comme illustré à la figure 4.19, qui présente l'évolution de l'irradiance. En plein jour avec une forte irradiance $1000\,\mathrm{W/m^2}$ et lors des périodes à faible ensoleillement $200\,\mathrm{W/m^2}$ à $300\,\mathrm{W/m^2}$, le système satisfait toujours la charge. La figure 4.20 montre les variations du contrôleur régulant la tension de charge.

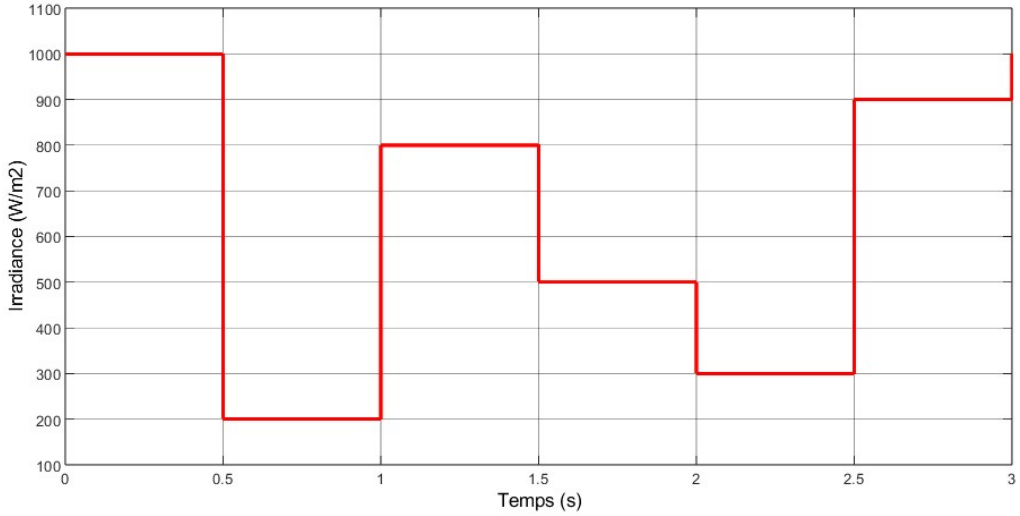


Figure 4.19 Variation de l'irradiance

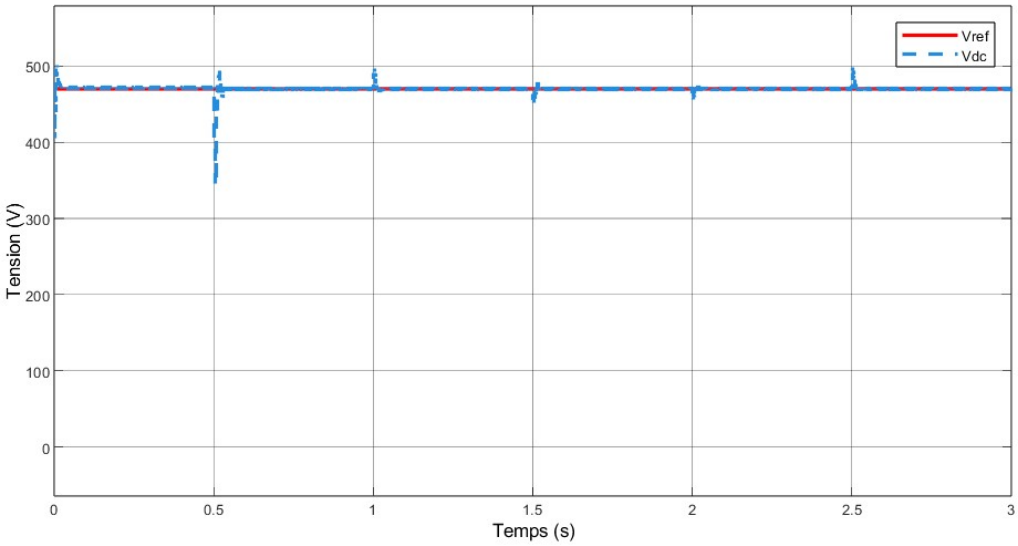


Figure 4.20 Régulation de la tension au bus continu

L'analyse de la réponse dynamique du bus continu montre un temps de montée de 3.28 ms, un temps de descente de 1.49 ms et une vitesse de variation de 16.13 ms indiquant une réponse rapide du convertisseur. Cependant, le dépassement est supérieur à 35%, mais le système reste robuste, rapide et stable.

Ainsi, s'il est prévu moins d'ensoleillement donc moins de puissance solaire, le système secours disponible assure le relais et gère le déficit comme dans la figure 4.21. Elle donne le résumé des puissances produites par les différents composants du système hybride sur le même graphe.

On remarque qu'entre 0 et 0.5 s la puissance du générateur solaire est de 10 kW et la puissance de la biomasse est nulle, la charge est alimentée uniquement par le PV. Entre 0.5 et 1 s la puissance PV chute de 10 à 2 kW, la biomasse fournit la puissance de la charge comblant ainsi l'insuffisance d'énergie occasionnée par les variations brusques du rayonnement solaire. Donc la puissance totale produite (12 kW) est supérieure à la demande de 10 kW.

De 1 à 1.5 s l'irradiance augmente entraînant une hausse de la production solaire de 8 kW mais pas suffisante à la charge. La biomasse réduit sa production à environ 3 kW selon le besoin de la charge. Jusqu'à 2.5 s, le premier scénario se répète, une chute de production solaire accompagnée par une plus grande production du générateur biomasse.

Cependant entre 2.5 et 3 s la production du PV redevient assez importante mais toujours insuffisante. La puissance résultante lors des variations est toujours supérieure à zéro, il y a donc suffisamment d'énergie pour alimenter la charge. Le surplus constaté correspond aux pertes dues aux différents composants (redresseur à diode, inductance, filtre), à la présence des condensateurs, y compris celui du bus qui se chargent en stockant l'énergie.

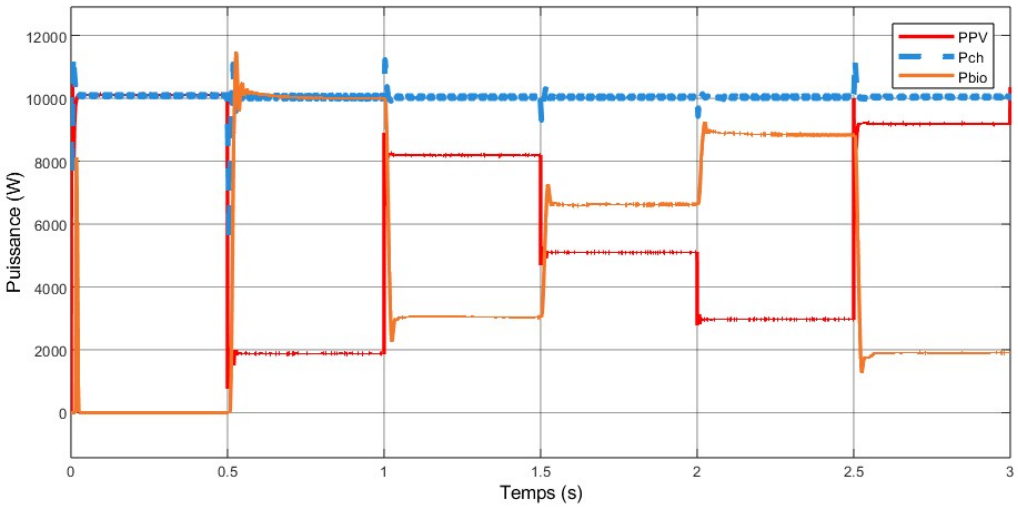


Figure 4.21 Répartition des puissances

La stratégie de gestion employée est résumée par un code qui génère automatiquement les scénarios ou options présentés à la figure 4.22. Elle repose sur une logique multi-modes permettant d'adapter dynamiquement le fonctionnement du système en fonction des conditions d'exploitation.

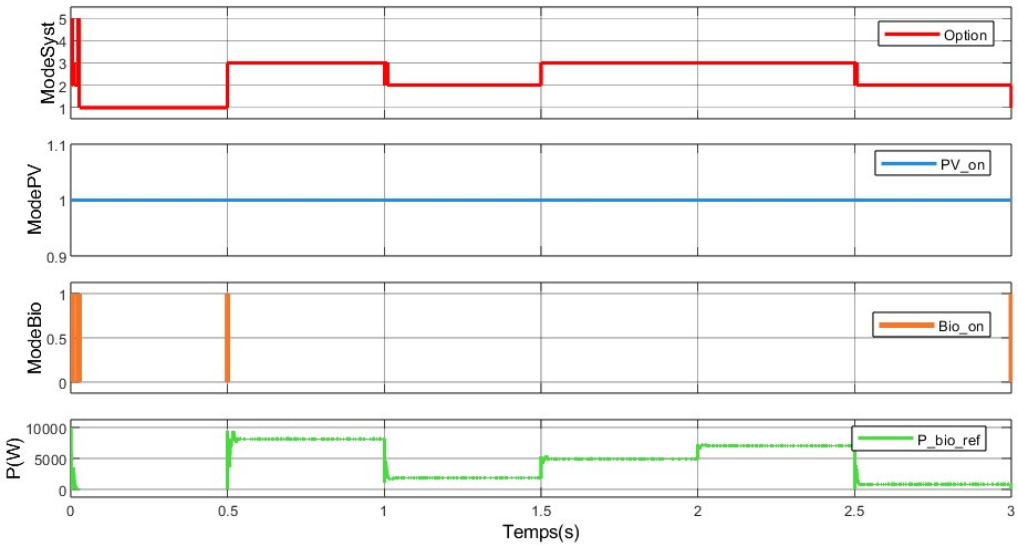


Figure 4.22 Stratégie de gestion

Avec:

- Option 1 : PV seul;
- Option 2 : léger déficit;
- Option 3 : fort déficit;
- Option 4 : chute rapide PV;
- Option 5 : surproduction PV;
- Mode 1 : active;
- Mode 0 : inactive.

Les résultats obtenus dans cette étude présentent des caractéristiques similaires à celles rapportées dans la littérature, notamment dans l'article portant sur la stabilisation de la tension du bus DC dans un micro-réseau isolé utilisant un contrôleur hybride en cascade basé sur la stabilité Lypanov intégrale proportionnelle [55]. Dans les deux cas, le système de contrôle assure le maintien de la tension du bus malgré les variations de production des sources renouvelables. Les courbes de simulation mettent en évidence la complémentarité entre les deux sources d'énergie. Lors des variations d'irradiance, la

puissance photovoltaïque présente des fluctuations importantes, ce qui se traduit par des perturbations au niveau du bus continu.

Toutefois, l'introduction du système biomasse permet de compenser ces variations en ajustant la puissance mécanique fournie par la turbine. Le gouverneur joue ici un rôle essentiel en régulant la vitesse de la machine synchrone, ce qui permet de maintenir l'équilibre entre production et consommation.

Par ailleurs, la régulation du bus continu montre une bonne performance dynamique, caractérisée par un temps de stabilisation relativement court et une absence d'oscillations persistantes. Cela confirme l'efficacité du contrôleur mis en place.

Les résultats de simulation présentés dans ce chapitre sont obtenus à partir du modèle global développé sous MATLAB/Simulink. La structure générale du système hybride solaire–biomasse est illustrée à l'Annexe A1.

La stratégie de gestion énergétique implantée dans le modèle sous forme de blocs de commande Simulink est détaillée à l'Annexe B1. Elle permet de superviser les échanges de puissance entre les différentes sources. Les signaux de commande générés par cet algorithme agissent sur les convertisseurs de puissance afin d'assurer la continuité de l'alimentation et le maintien de la tension du bus continu.

Chapitre 5 - Conclusion et perspectives

5.1 Retombées et impact industriel

La gestion et l'optimisation des systèmes hybrides constituent une composante clé pour la bonne marche des énergies renouvelables décentralisées. Les stratégies de contrôle intelligentes et d'algorithme d'optimisation permettent d'atteindre une bonne stabilité et efficacité. Ces techniques ouvrent la voie à une transition énergétique locale adaptée aux régions rurales, et aux pays en développement.

- **Retombées technico-économiques**

Notre étude contribue au développement de solutions intelligentes de gestion énergétique reposant sur l'intelligence artificielle. L'approche proposée permet d'intégrer des capacités de prévision avancée directement dans les systèmes de supervision énergétique existants. D'un autre point de vue, elle favorise l'optimisation de la ressource (réduction des consommations inutiles), la réduction des pertes énergétiques et la limitation des démarrages fréquents des unités thermiques.

Sur le plan industriel, la méthodologie est technologiquement mature et peut être intégrée aux:

- Plateformes de gestion de micro-réseaux;
- Systèmes de pilotage de centrales hybrides;
- Outils d'aide à la décision pour les exploitants énergétiques.

L'utilisation de modèles de prévision basés sur les données réelles favorise une transition vers des réseaux électriques plus intelligents et adaptatifs.

- **Impact environnemental et sociétal sur l'exploitation industrielle**

Le projet s'inscrit pleinement dans les objectifs de la transition énergétique industrielle en favorisant l'intégration massive des énergies renouvelables intermittentes, en réduisant la dépendance aux sources fossiles, et en améliorant la flexibilité des systèmes énergétiques hybrides. L'optimisation de la biomasse, considérée comme une énergie pilotable, permet de compenser efficacement l'intermittence du solaire, tout en limitant l'impact environnemental par rapport aux systèmes hybrides classiques PV–diesel.

Grâce à la capacité de prévision à court terme, les exploitants disposent d'une vision anticipée du comportement du système énergétique. Ce qui facilite la rentabilité des centrales hybrides, la réduction des coûts liés à la maintenance, le développement de compétences locales en intelligence artificielle appliquée à l'énergie, et la création d'emplois liés à l'exploitation.

La solution développée est adaptable à différentes tailles de centrales, et applicable à d'autres sources d'énergie (éolien, hydraulique). Malgré ses performances, le modèle dépend fortement de la qualité et de la disponibilité des données.

5.2 Conclusion

Ce projet de mémoire a été effectué avec pour objectif la représentation, la simulation et la gestion d'un système hybride solaire-biomasse. Cela pour la production d'électricité. Le choix de la biomasse comme source primaire réduit les émissions des GES. La combustion de la biomasse émet du CO_2 moindre par rapport à celle du charbon ou des combustibles fossiles liquides. De plus ce CO_2 est réabsorbé et stocké par les plantes. Ainsi ce choix limite les effets d'intermittence du PV, réduit les coûts liés au stockage et permet d'éviter la pollution due aux combustibles fossiles.

Suite à l'introduction, le chapitre 2 a permis de faire une étude complète du sujet et sur

les systèmes déjà étudiés.

Dans la troisième partie, la conception du modèle a été réalisée en intégrant des dynamiques réalistes. Nous avons d'abord configuré le générateur PV en intégrant un converstisseur boost et un contrôleur MPPT pour maximiser la puissance solaire. Ensuite, nous avons modélisé le système biomasse en passant par le gouverneur et la génératrice synchone. Ce gouverneur ou turbine à gaz a été mis en place en étudiant le comportement dynamique du système par des fonctions de transfert. La conception d'un convertisseur buck-boost et d'un contrôleur proportionnel intégral a été implémenté.

Le chapitre 4 a été consacré à la simulation sur MATLAB/Simulink, à la présentaion de certaines méthodes de contrôle et de gestion du système. Nous avons soumis le système à diverses variations de conditions, pour ne citer pleine charge, faible charge, fort et faible ensoleillement,... afin d'analyser les résultats. Ce mémoire démontre aussi qu'une stratégie de gestion énergétique basée sur la prévision multi-sources par intelligence artificielle présente un fort potentiel. Elle constitue une solution efficace, durable et économiquement viable pour la transformation numérique et énergétique des systèmes hybrides de production électrique.

Notre travail s'inscrit ainsi dans une démarche visant à améliorer la fiabilité, l'efficacité et la durabilité des systèmes hybrides autonomes, en particulier pour les zones isolées, tout en offrant une base solide pour l'intégration future de techniques d'optimisation avancées et d'intelligence artificielle pour la gestion énergétique.

- **Recommandations ou amélioration possible**

Malgré les résultats obtenus, certaines perspectives peuvent être soulignées. À ce niveau, l'ajout d'un système de stockage d'énergie pour gérer les différentes charges et

fluctuations, en particulier dans les micro-réseaux hors réseau. Le surplus observé au niveau de la production pourrait être ainsi stocké et servir à de futures utilisations.

De plus, l'importance de l'optimisation est cruciale pour ces types de systèmes, et l'idéal serait donc de développer une méthodologie de dimensionnement optimal des différents composants du système. Et également d'améliorer la stratégie de contrôle par l'intégration ou la combinaison avec des techniques avancées.

D'autre part, afin de garantir que le micro-réseau hybride à énergie renouvelable soit économiquement viable une étude de faisabilité détaillée du système peut également être envisagée. Il serait aussi possible de faire une validation expérimentale sur une plateforme réelle ou semi-réelle du système.

Références

[1] S. Badruhisham, M. A. Hanifah, H. Yusoff, N. Hasbullah, and M. Yaacob, "Integration of Hybrid Biomass-Solar Photovoltaic-Wind turbine in Microgrid Application," *8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE),Kuala Lumpur, Malaysia*, 2021.

[2] A. Waqas, M. A. Y. Saifullah, and T. Malik, "Système de conversion d'énergie au biogaz pour le partage de la charge de pointe en présence d'une alimentation électrique," *Conférence IEEE sur la conversion d'énergie (CENCON), Yogyakarta, Indonésie*, 2019.

[3] J. Whitmore et P.-O. Pineau, Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal, *État de l'énergie au Québec*, 2024.

[4] Le monde de l'électricité en ligne, *Canada : conversion à la biomasse réussie pour la centrale d'Atikokan*, 2012. [Online]. Available: https://www.lemondedelelectricite.ca/articles/672-canada-conversion-a-la-biomasse-reussie-pour-la-centrale-d-atikokan/

[5] Filière d'énergie renouvelable, *L'énergie de la biomasse*, 2021.

[6] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 47–54, 2002.

[7] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Global landscape of renewable energy finance*, 2023. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Feb/IRENA_CPI_Global_RE_finance_2023.pdf

[8] Programme d'Action Construction et Énergie (PACER), *Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets, A l'usage des bureaux d'ingénieurs*, 1996.

[9] Ely Waré, *Étude et gestion d'un système hybride éolien-photovoltaique*. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Trois-Rivières, février 2023.

[10] BCLT Énergie, 2017. [Online]. Available: https://bcltenergie.com/_home/2017/05/26/fonctionnement-dun-panneau-photovoltaique/

[11] P.-E. Janolin, *De l'effet photovoltaïque aux cellules photoélectriques*. Sciences fondamentales, Physique Chimie, 2013. [Online]. Available: https://perso.crans.org/romeo-bigue/public/LP/notes-discord/cellule-photovoltatique_2.pdf

[12] International Renewable Energy Agency (IRENA), *The energy progress report*, 2022. [Online]. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jun/SDG7_Tracking_Progress_2022.pdf

[13] Richard Heinberg and David Fridley, *un futur renouvelable*, 2024.

[14] Comparateur panneau solaire, 2024. [Online]. Available: https://www.solairepro.comparateur-panneau-solaire.fr/wp-content/uploads/2024/09/choix-panneaux-photovoltaiques-49.jpg

[15] International Energy Agence (IEA), 2023. [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed1e4c42-5726-4269-b801-97b3d32e117c/WorldEnergyOutlook2023.pdf

[16] Simon Scolan, *Développement d'un outil de simulation et d'optimisation dynamique d'une centrale solaire thermique*. Thèse de fin d'étude, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2020.

[17] Theleli Abbas, *Étude de faisabilité d'une centrale de production d'électricité et de chaleur à partir de la biomasse avec un réseau de chauffage urbain à l'ile Anticosti*. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Rimouski, Nov 2019.

[18] D. Paré, P. Bernier, E. Thiffault, and B. D. Titus, "Le potentiel de la biomasse forestière comme source d'énergie pour le Canada," *The Forestry Chronicle*, 2011.

[19] S. Harivardhagni, G. Divya, V. Lavanya, and G. S. Lakshmi, "Solar and biomass based hybrid power system for rural areas," *IEEE-HYDCON*, 2020.

[20] Filières de valorisation. [Online]. Available: https://uved.univ-perp.fr/module2/res/filieres_valorisation.png

[21] Réseau coopératif de recherche sur les déchets et l'environnement (RECORD), *Techniques de production d'électricité à partir de biogaz et de gaz de synthèse*, 2009.

[22] S. Rahman, R. Ahmmed, and A. Sarker, "Transforming tannery waste into biogas: An exploration of biogas production via anaerobic digestion," *IEEE 13th International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, 2023.

[23] A. Adeleke, P. Nzerem, and A. Salihu, "A review on biomass conversion process for bioenergy production," *The 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Sciences (ICMEAS)*, 2023.

[24] TransCanada, *Centrale de Cogénération de Bécancour*, février 2018.

[25] X. Zhang, H. Zhang, L. Zhang, Q. Wang, and D. Zhou, "Optimization of a wind-PV-hydrogen production coupling system considering economy, environment, and reliability," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 105, pp. 441–457, 2025.

[26] A. Karim Traoré, *Gestion d'un système autonome hybride photovoltaique éolien pour applications agricoles*. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Trois-Rivières, Juillet 2016.

[27] K. M. A. Islam, T. M. Khan, M. M. Rahman, and M. S. Munna, "Design and performance analysis of a hybrid Solar PV and biogas power plant using PLC," *3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET), Dhaka, Bangladesh*, pp. 1–6, 2015.

[28] D. Gnanasangeetha and al., "Evaluation of the Potential of Biomass Energy as a Sustainable Alternative Energy Source," *7th International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud(I-SMAC), Kirtipur, Nepal*, pp. 952–958, 2023.

[29] S. Jain and A. Kumar, "Évaluation du potentiel des ressources en biomasse en Alberta et en Saskatchewan," *Technical Conferences CSBE/SCGAB,AGM Edmonton*, 2015.

[30] A. A. Muhammad, J. S. Ibrahim, and N. A. Alpha, "Optimisation des systèmes hybrides solaire-biomasse pour une électrification rurale durable," *Journal of Engineering Research and Reports 27*, p. 267–284, 2025.

[31] B. Modu, M. P. B. Abdullah, A. Alkassem, H. Z. A. Garni, and M. Alkabi, "Optimal Design of a Grid-Independent Solar-Fuel Cell-Biomass Energy System Using an Enhanced Salp Swarm Algorithm Considering Rule-Based Energy Management Strategy," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 23 914–23 929, 2024.

[32] S. Harivardhagni, G. Divya, V. Lavanya, and G. S. Lakshmi, "Solar and biomass based hybrid power system for rural areas," *IEEE HYDCON*, 2020.

[33] A. Royhan and I. M. Brunner, "Rice Husk Renewable Energy Potential in Indonesia, A Case Study Biomass Steam Power Plant in Ogan Ilir, South Sumatera," *International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power, Jakarta, Indonesia*, pp. 372–377, 2021.

[34] M. I. Muhamad, M. A. Radzi, N. I. Wahab, H. Hizam, and M. F. Mahmood, "Optimal design of hybrid renewable energy system based on solar and biomass for halal products research institute," *IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA), Kuala Lumpur, Malaysia*, pp. 692–696, 2014.

[35] S. H. Badruhisham, M. S. A. Hanifah, S. H. Yusoff, N. F. Hasbullah, and M. Yaacob, "PI controller for Hybrid Biomass-Solar Photovoltaic-Wind in microgrid: a case study of mersing," *IEEE Access*, 2022.

[36] M. Spacek, Z. Hradilek, and P. Moldrik, "Cooperation between photovoltaic and biogas power plants within 22kV network," *16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic*, pp. 341–345, 2015.

[37] B. Kasim, H. Geidam, and G. Habu, "Development of Hybridized Solar and Biogas Power Plant for Agricultural Applications," *International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG), Omu-Aran, Nigeria*, pp. 1–6, 2024.

[38] N. Mohamad, G. Nassreddine, and A. Ari, "Hybrid photovoltaic and biogas system for stable power system," *Next Energy*, 2015.

[39] A. Anand, R. Maurya, P. Kumar, A. Chakraborty, and S. Ray, "Equilibrium Optimizer Algorithm for Optimal Sizing of Utility-Connected Hybrid PV-Biomass Systems," *3rd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT), Hubli, India*, 2023.

[40] S. Ashok and P. Balamurugan, "Biomass Gasifier Based Hybrid Energy System for Rural Areas," *IEEE Canada Electrical Power Conference, Montreal, QC, Canada*, pp. 371–375, 2007.

[41] S. Fawzy, M. Saeed, A. Eladl, and M. El-Saadawi, "Adaptive Control System for Biogas Power Plant Using Model Predictive Control," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, pp. 1193–1204, Septembre 2021.

[42] K. Hoang, S. Amamra, and N. Schofield, "Modelling and control development for a hybrid microgrid system," *13th International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2024), Nottingham, UK*, pp. 518–523, Septembre 2024.

[43] Circuit équivalent de la cellule photovoltaïque. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/301487491/figure/fig18/AS:667936234696718@1536259816582/Schema-equivalent-dune-cellule-PV-modele-a-une-diode.ppm

[44] D. Berrian and S. Bouzaghou, *Développement des modèles mathématiques d'un générateur photovoltaique defectueux*, 2015.

[45] Z. Z. Muhtadi, M. Ashari, and Soedibyo, "Penetration of photovoltaic – synchronous diesel generator systems without storage for isolated area," in *Proceedings of the International Conference on Computer Science, Information Technology, and Electrical Engineering (ICOMITEE)*. Jember, Indonesia: IEEE, 2019, pp. 227–232.

[46] M. Bennoui, *Nouvelle technique d'adaptation et de planification par logique floue d'un algorithme PO sur un système PV*. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Montréal, 2025.

[47] S. Poojavarshini, R. Kavitha, K. Premalatha, and P. Maithili, "Design and Simulation of DC to DC Boost and SEPIC Converters using MPPT for Photovoltaic system using MATLAB/SIMULINK," *International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA), Coimbatore, India*, pp. 1–5, 2021.

[48] F. Jurado, M. Ortega, A. Cano, and J. Carpio, "Neuro-fuzzy controller for gas turbine in biomass-based electric power plant," *Electric Power Systems Research*, vol. 60, pp. 123–135, 2001.

[49] H. Salah and H. Souhila, *Production d'électricité à partir de la combustion du biogaz issu de biomasse*. Mémoire de fin d'étude, École supérieure en sciences appliquées, 2020.

[50] Methuku, S. R., Srivastava, K. Anurag, Schulz, and N. Noel, "Comprehensive modeling and stability analysis of biomass generation," *41st North American Power Symposium*, pp. 1–6, 2009.

[51] D. M. Soto, A. Hasanzadeh, and C. S. Edrington, "Gas turbine-synchronous generator system emulation using power electronics converters," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012.

[52] D. Gaonkar, R. N. Patel, and G. N. Pillai, "Dynamic model of microturbine generation system for grid connected/islanding operation," *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 305–310, 2006.

[53] Mathworks, *MPPT algorithm*. [Online]. Available: https://www.mathworks.com/discovery/mppt-algorithm/_jcr_content/mainParsys/columns_copy/7f01d162-8347-4343-85ba-678c05e18a42/image_copy_copy.adapt.full.medium.jpg/1759966187030.jpg

[54] YACINE AKROUR, *Prévision de la demande d'électricité par regression linéaire et réseaux de neurones artificiels: Application au réseau de la ville de Baie-Comeau*. Mémoire de fin d'étude, Université du Québec à Trois-Rivières, 2022.

[55] N. S. Pragya, R. Ranjan, and D. S. B. Karanki, "Stabilization of DC Bus Voltage of an Isolated DC Microgrid," *8e conférence IEEE sur l'électronique de puissance du Sud (SPEC)*, 2023.

Annexe A - Représentation du système sous MATLAB/Simulink

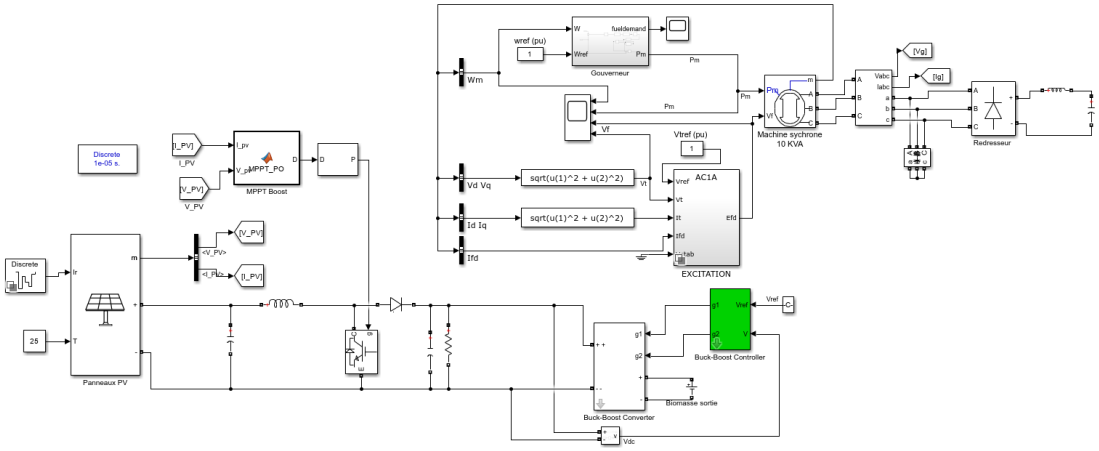


FIGURE A.1 – Représentation du système global sous MATLAB/Simulink

Annexe B - Représentation de la stratégie de gestion

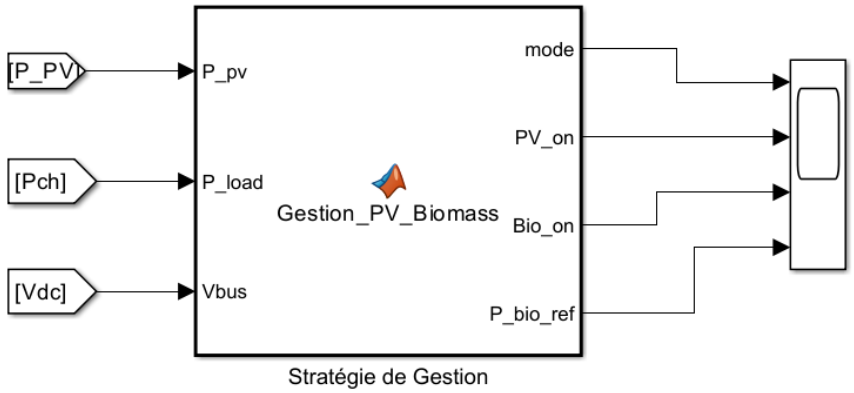


FIGURE B.1 – Stratégie de gestion représentée sous MATLAB/Simulink

```
function[mode,PV_on,Bio_on,P_bio_ref]=Gestion_PV_Biomass(P_pv,Pch,Vdc)
%PARAMETRES
Vref = 470;
eps_val = 1e-3;
Pbio_max = 10000;
Pbio_min = 0;
%INITIALISATION
mode = 0;
PV_on = 1;
Bio_on = 0;
P_bio_ref = 0;
%CALCULS
P_excess = P_pv - P_load;
error_V = Vref - Vbus;
MODE 1 : PV seul suffit
if (P_excess >= 0) && (abs(error_V) < 5)
```

```
        mode = 1;
        PV_on = 1;
        Bio_on = 0;
        P_bio_ref = 0;
    MODE 2 : Leger deficit
    elseif (P_excess < 0) && (P_excess > -2000)
        mode = 2;
        PV_on = 1;
        Bio_on = 1;
        P_bio_ref = abs(P_excess);
    MODE 3 : Fort deficit
    elseif (P_excess <= -2000)
        mode = 3;
        PV_on = 1;
        Bio_on = 1;
        P_bio_ref = min(Pbio_max, abs(P_excess));
    MODE 4 : Chute rapide PV
    elseif (P_pv < 0.5 * P_load)
        mode = 4;
        PV_on = 1;
        Bio_on = 1;
        P_bio_ref = min(Pbio_max, P_load - P_pv);
    MODE 5 : Surproduction PV
    elseif (P_excess > 0)
        mode = 5;
        PV_on = 1;
        Bio_on = 0;
```

```
    P_bio_ref = 0;
end
%SATURATION
P_bio_ref = max(Pbio_min, min(Pbio_max, P_bio_ref));
end
```