

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : **Energies Renouvelables**

Présenté par

Dahmane BOUKHEDIMI

Yahia DAOUI

Thème

Étude d'un système de gestion de l'énergie pour une source électrique hybride

Mémoire soutenu publiquement le 24/ 06/ 2024 devant le jury composé de :

M Djaffar BOUGUEDAD

MCA, UMMTO, Président

M Aghiles ARDJAL

MCA, UMMTO, Encadreur

M Hamid HAMICHE

Professeur, UMMTO, Co-Encadreur

M Rabah ROUAS

MCB, UMMTO, Examineur

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre directeur de mémoire, M. Aghiles ARJAL, pour son encadrement exceptionnel, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce projet, ainsi qu'à M. Hamid HAMICHE, pour son aide et l'apport de son expertise. Leurs connaissances approfondies dans le domaine, leur bienveillance et leur patience ont été déterminantes pour mener à bien ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude aux membres du jury, M. Djaffar BOUGUEDAD et M. Rabah ROUAS , pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Leurs expertises, leurs commentaires constructifs et leurs suggestions judicieuses ont grandement contribué à l'amélioration de la qualité de ce mémoire. Nous les remercions chaleureusement pour le temps qu'ils ont consacré à l'examen de ce projet et pour leur participation à sa soutenance.

Nous ne saurions oublier de remercier nos familles et nos amis pour leur soutien inconditionnel et leur compréhension tout au long de cette aventure. Leur présence et leurs encouragements ont été un véritable moteur pour mener à bien ce mémoire.

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie d'un système hybride d'énergie (SHE) combinant un générateur photovoltaïque, un système de stockage par batteries et une connexion au réseau traditionnel, le tout géré via un système de gestion de l'énergie (SGE). L'objectif est d'optimiser le fonctionnement du système afin de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables tout en réduisant les coûts. Le SGE développé intègre deux algorithmes d'optimisation distincts, l'un basé sur des règles heuristiques et l'autre sur l'optimisation linéaire. L'analyse des résultats montre l'impact des paramètres clés tels que les méthodes d'optimisation, les conditions météorologiques, le nombre et le type de panneaux photovoltaïques utilisés, ainsi que la capacité du système de stockage sur les performances et les coûts du système. Ce travail apporte une meilleure compréhension des défis liés à l'intégration des énergies renouvelables et des solutions pour y répondre de manière efficace.

Summary

This thesis presents a comprehensive study of a hybrid energy system (HES) combining a photovoltaic generator, a battery storage system, and a connection to the traditional grid, all managed by an energy management system (EMS). The objective is to optimize the system's operation in order to maximize the use of renewable energy while reducing costs. The developed EMS incorporates two distinct optimization algorithms, one based on heuristic rules and the other on linear optimization. The analysis of the results shows the impact of key parameters such as optimization methods, weather conditions, the number and type of photovoltaic panels used, and the energy storage system capacity on the system's performance and costs. This work provides a better understanding of the challenges associated with the integration of renewable energy and the solutions to address them effectively.

ملخص

يقدم هذا البحث دراسة معمقة لنظام الطاقة الهجين الذي يجمع بين مولد كهروضوئي، نظام تخزين ببطاريات، وربط بالشبكة التقليدية، وجميعها يتم إدارتها من خلال نظام إدارة الطاقة. الهدف هو تحسين تشغيل النظام من أجل تعظيم استخدام الطاقة المتجددة مع تقليل التكاليف. يتضمن نظام إدارة الطاقة المطور خوارزميتي تحسين منفصلتين، واحدة مبنية على قواعد حدسية والأخرى على التحسين الخطي. تظهر تحليل النتائج تأثير الإعدادات الرئيسية مثل خوارزميتي التحسين؛ الظروف الجوية؛ نوع وعدد ألواح الطاقة الشمسية المستخدمة وسعة نظام التخزين على أداء وتكاليف النظام. يوفر هذا العمل فهماً أفضل للتحديات المتعلقة بدمج الطاقات المتجددة والحلول للتعامل معها بفعالية.

Mots-clés : Énergies renouvelables; Système hybride d'énergie; Générateur photovoltaïque; Système de stockage par batteries; Système de gestion d'énergie; méthode d'optimisation linéaire; méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Sources d'Énergie et Systèmes Hybrides : Un Aperçu	3
1.1 Introduction	3
1.2 Générateurs d'énergies renouvelables	5
1.2.1 Générateur éolien	5
1.2.2 Générateurs solaires	6
Générateur solaire photovoltaïque	7
Générateur solaire thermique	10
1.2.3 Générateur hydroélectrique	11
1.2.4 La biomasse	13
1.2.5 La géothermie	13
1.3 Générateurs d'énergie conventionnelle	14
1.4 Systèmes de stockage de l'énergie	16
1.4.1 Stockage par batteries	16
1.4.2 Stockage par condensateur	17
1.4.3 Stockage par supercondensateur	18
1.4.4 Stockage par station de transfert d'énergie par pompage STEP	19
1.4.5 Stockage par air comprimé CAES	20
1.4.6 Stockage par volant d'inertie	21
1.5 Introduction à l'hybridation	22
1.5.1 Définition	22
1.5.2 Objectif	22
1.5.3 Avantages et limites des SHE	23
Avantages	24
Limites	24
1.6 Conclusion	25

2	Introduction aux Systèmes de Gestion de l'énergie	26
2.1	Introduction	26
2.2	Historique	27
2.3	Définition	28
2.4	Architecture d'un SGE	29
2.4.1	Unité de contrôle/supervision	30
2.4.2	Capteurs et systèmes de mesure	30
2.4.3	Algorithmes de gestion et de prise de décision	31
2.5	Niveaux de contrôle et d'optimisation	31
2.5.1	Contrôle en temps réel	31
2.5.2	Gestion à court terme (jour, semaine)	32
2.5.3	Planification à moyen/long terme	33
2.6	Structure des SGE	33
2.6.1	Structure de gestion centralisée	33
2.6.2	Structure de gestion décentralisée	35
2.6.3	Structure de gestion hybride	36
2.7	Intégration des énergies renouvelables et du stockage	37
2.7.1	Défis liés à la variabilité de la production	37
	Fluctuations de la production	37
	Risque de déséquilibre production-consommation	38
2.7.2	Rôle du SGE pour l'intégration optimale	38
	Collecte et analyse des données énergétiques	38
	Gestion et contrôle des flux d'énergie	39
	Prise de décision et planification	39
	Amélioration de l'efficacité énergétique	39
	Intégration des énergies renouvelables	39
2.8	Normes relatives aux SGE	40
2.8.1	Normes ISO 50001	40
2.8.2	IEC 61850	40
2.8.3	IEEE 2030	40
2.9	conclusion	41
3	Cas d'étude : Vue globale du système	42
3.1	Modèle d'étude	42
3.2	Détails du modèle	43
3.2.1	Générateur photovoltaïque	43

3.2.2	Système de stockage d'énergie	44
	Capacité de stockage d'énergie	44
	Contraintes de puissance	44
	Contraintes d'énergie	44
3.2.3	Charges à alimenter	45
	Charge constante	45
	Charge variable	45
3.2.4	Récapitulatif	46
3.3	Modèle réel	46
3.4	Système de gestion de l'énergie	47
3.4.1	Bloc SGE	47
3.4.2	Paramètres d'optimisation	48
	Intervalle d'optimisation	48
	Horizon de prédiction	48
	Le poids final sur le stockage d'énergie	48
3.4.3	Méthodes d'optimisation	49
	Méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques	49
	Méthode d'optimisation linéaire	52
3.5	Conclusion	55
4	Effet des facteurs d'influence sur le système multi-sources	56
4.1	Introduction	56
4.2	Analyse des constantes	57
4.2.1	Profil de charge	57
4.2.2	Évolution du prix du kWh	58
4.3	Facteurs d'influence	59
4.3.1	Méthodes d'optimisation	59
	Méthode d'optimisation linéaire	59
	Méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques	60
	Analyse des coûts	62
4.3.2	Conditions météorologiques	63
	Profil d'irradiation	63
	Bilan de puissance	63
	Analyse des coûts	64
4.3.3	Nombre de panneaux	65
	Profil d'irradiation	65

TABLE DES MATIÈRES

	Bilan de puissance	66
	Analyse des coûts	67
4.3.4	Rendement du générateur PV	67
	Profile d'irradiation	68
	Bilan de puissance	68
	Analyse des coûts	69
4.3.5	Capacité de stockage	70
	Bilan de puissance	70
	Analyse des coûts	71
4.4	Conclusion	72
	Conclusion générale	73

Table des figures

1.1	Évolution de la consommation mondiale d'énergie de 1974 à 2018 [9].	4
1.2	Prévision de l'évolution de la consommation énergétique mondiale par source d'énergie [11].	5
1.3	Composition d'une éolienne [13].	6
1.4	Schéma du fonctionnement d'une cellule PV [17].	8
1.5	caractéristique I-V et P-V d'une cellule PV [17].	8
1.6	Caractéristique I-V lors d'une mise en série [17].	9
1.7	Caractéristique I-V lors d'une mise en parallèle [17].	10
1.8	Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.	11
1.9	Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire [21].	12
1.10	Types et usages de la géothermie [23].	13
1.11	Principe de fonctionnement d'une centrale à charbon [25].	15
1.12	Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [26].	16
1.13	Schéma explicatif de la charge et de décharge d'un accumulateur [28].	17
1.14	Vue d'un condensateur plan idéal [29].	18
1.15	Structure d'un supercondensateur [29].	19
1.16	Principe de fonctionnement d'une centrale STEP [21].	20
1.17	Schéma simplifié d'un système de CAES [30].	21
1.18	Structure d'un volant d'inertie [27].	22
1.19	Principales sources conventionnelles et non conventionnelles d'énergie.	23
2.1	Architecture d'un SGE	29
2.2	Architecture du contrôle centralisé [45].	34
2.3	Architecture du contrôle décentralisé [45].	36
2.4	Architecture du contrôle hybride.	37
3.1	Vue d'ensemble du modèle Simulink du système.	43
3.2	Modèle réel du système.	47

3.3	Organigramme de décisions de la méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques.	50
4.1	Profil de puissance de la charge variable.	57
4.2	Profil de puissance de la charge totale.	58
4.3	Évolution du prix du kWh sur le réseau traditionnel au cours d'une journée.	59
4.4	Bilan de puissance de la méthode d'optimisation linéaire.	60
4.5	Bilan de puissance de la méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques.	61
4.6	Évolution du prix total des deux méthodes.	62
4.7	Profils de puissance du GPV.	63
4.8	Évolution du prix total pour les deux météo.	64
4.9	Profils de puissances du GPV.	65
4.10	Évolution du prix total pour les trois surfaces.	67
4.11	Profils de puissances du GPV.	68
4.12	Évolution du prix total pour les trois rendements	69
4.13	Évolution du prix total pour les trois capacités	71

Liste des tableaux

- 2.1 Avantages et inconvénients d'un système centralisé 34
- 2.2 Avantages et inconvénients d'un système décentralisé 35
- 2.3 Avantages et inconvénients de l'architecture de contrôle hybride 36

- 3.1 Tableau récapitulatif des grandeurs du système. 46
- 3.2 Avantages et limites de l'optimisation basé sur des règles heuristiques. 51
- 3.3 Avantages et limites de l'optimisation linéaire. 53

Liste des abréviations

AIE Agence Internationale d'Énergie

SHE Systèmes hybride d'énergie

SGE Système de gestion d'énergie

PV Photovoltaïque

V_{co} Tension à vide

I_{cc} Courant de court-circuit

PPM Point de puissance maximale

V_{opt} Tension optimale

I_{opt} Courant optimal

GPV Générateur photovoltaïque

STEP Stations de transfert d'énergie par pompage

CAES Compressed Air Energy Storage

EnR Énergie non Renouvelable

ER Énergie Renouvelable

API Automate Programmable Industriel

SCADA Supervisory Control And Data Acquisition

IA Intelligence Artificielle

ISO Organisation Internationale de Normalisation

SOC Stat Of Charge

SSE Système de Stockage d'Énergie

Introduction générale

Avec l'avènement de l'électricité et sa large propagation au sein des sociétés, celle-ci est devenue un pilier essentiel et indispensable au bon fonctionnement et à l'épanouissement de toute civilisation contemporaine, présente au cœur des secteurs économiques et sociaux, son importance est donc indéniable. Toutefois, le défi d'approvisionnement grandit significativement en raison de la croissance démographique globale que connaît notre planète depuis des années.

La transition énergétique est devenue un enjeu majeur à l'échelle mondiale face à l'augmentation constante de la demande en énergie et aux défis environnementaux liés à l'utilisation des ressources fossiles. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la consommation mondiale d'énergie a connu une hausse continue ces dernières décennies, passant de **6 071** millions de tonnes équivalent pétrole en 1974 à **13 972** millions de tonnes équivalent pétrole en 2018. Cette évolution exponentielle de la demande énergétique s'explique par la croissance économique, l'urbanisation et l'amélioration des conditions de vie dans de nombreuses régions du globe [1].

Actuellement, les combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz naturel et le charbon dominent le mix énergétique mondial, représentant près de **80%** de la consommation totale. Cependant, l'exploitation et l'utilisation intensive de ces ressources non renouvelables ont des impacts environnementaux majeurs, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre, de pollution atmosphérique et de dégradation des écosystèmes. Face à ces enjeux, la transition vers un système énergétique plus durable, reposant sur une part accrue des énergies renouvelables, est devenue une priorité à l'échelle internationale [2, 3, 4].

L'intégration croissante des sources d'énergie renouvelables, telles que le solaire photovoltaïque, l'éolien, l'hydroélectricité ou la géothermie, constitue une solution primordiale pour répondre aux besoins énergétiques tout en réduisant l'impact négatif sur l'environnement. Cependant, la nature intermittente et variable de ces sources d'énergie renouvelables pose des défis en termes de gestion et de stabilité des réseaux électriques [5, 6].

Dans ce contexte, les systèmes hybrides d'énergie (SHE), qui combinent différentes sources d'énergie renouvelables et conventionnelles, ont émergé comme une approche prometteuse

pour optimiser l'utilisation des ressources et assurer la fiabilité de l'approvisionnement énergétique. La gestion efficace de ces systèmes hybrides repose sur l'utilisation de systèmes de gestion de l'énergie (SGE), qui permettent d'intégrer et de coordonner les différentes composantes du système en vue d'une optimisation globale [6, 7].

L'objectif de ce travail est d'analyser l'effet du choix de l'approche de gestion dans les SGE ainsi que l'impact de certains facteurs clés, tels que les conditions météorologiques, le nombre et le type de panneaux solaires photovoltaïques ainsi que la capacité du système de stockage d'énergie sur l'optimisation de la gestion d'un système hybride d'énergie. Plus précisément, il s'agira d'étudier et de comparer les performances de différentes méthodes d'optimisation, allant des approches basées sur des règles heuristiques aux méthodes d'optimisation linéaire, dans le cadre de la gestion d'un système hybride composé d'un générateur solaire photovoltaïque et d'un système de stockage d'énergie.

Cette analyse permettra de mieux comprendre les avantages et les limites des différentes approches de gestion de l'énergie, ainsi que l'influence des paramètres clés du système, dans l'objectif d'optimiser l'intégration des énergies renouvelables et d'assurer une exploitation efficace des systèmes hybrides d'énergie.

Mais d'abord, il convient de s'intéresser aux différentes sources d'énergie déjà existantes ainsi qu'aux systèmes hybrides d'énergie. Ce premier volet permettra de dresser un état des lieux des technologies actuellement disponibles et de leurs caractéristiques respectives. Par la suite, nous passerons en revue les bases des systèmes de gestion d'énergie utilisés dans l'optimisation de ces systèmes multi-sources. Cette étape sera essentielle pour saisir les principaux enjeux liés à la coordination et à l'équilibrage des différentes sources d'énergie au sein d'un système hybride.

Ce mémoire s'articule autour de l'étude des systèmes hybrides d'énergie (SHE) et des systèmes de gestion de l'énergie (SGE) qui permettent une intégration optimale des sources d'énergie renouvelables et conventionnelles. Le mémoire commence par une présentation générale des différentes sources d'énergie et des systèmes de stockage, ainsi que des principes d'hybridation. Ensuite, il introduit les concepts clés des SGE, leur architecture, leurs niveaux de contrôle et d'optimisation, ainsi que les normes associées. Un cas d'étude est alors détaillé, avec la modélisation du système hybride et la description des méthodes d'optimisation implémentées dans le SGE. Enfin, l'impact de divers facteurs d'influence tels que les conditions météorologiques, les paramètres du générateur PV et du système de stockage est analysé, permettant d'évaluer les performances du système hybride et l'efficacité du SGE développé.

Chapitre 1

Sources d'Énergie et Systèmes Hybrides : Un Aperçu

1.1 Introduction

Dans un contexte d'évolution constante des besoins énergétiques individuels et collectifs, la question de l'énergie est devenue centrale. Avec une demande croissante et une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux, les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables sont au cœur des débats.

Depuis plusieurs décennies, cette évolution engendre une demande d'énergie croissante de manière exponentielle (figure 1.1), une demande majoritairement assouvie via l'utilisation des combustibles fossiles qui contribuent grandement à la pollution mondiale et aux changements climatiques. De plus, il est important de noter que le gisement de ces ressources fossiles est limité. Afin de faire face à ces défis et de garantir un développement durable et prospère, il est essentiel d'optimiser et d'améliorer l'efficacité énergétique. Ces mesures visent à trouver des solutions viables pour répondre à la demande croissante d'énergie tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement [8].

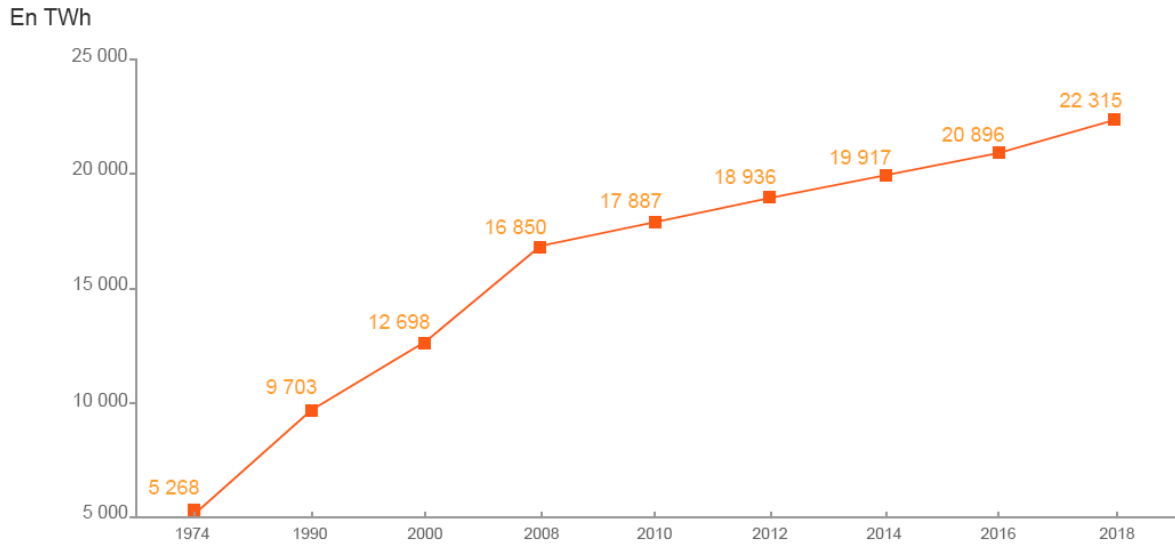


FIGURE 1.1 – Évolution de la consommation mondiale d'énergie de 1974 à 2018 [9].

À long terme, l'accroissement progressif de la part des sources d'énergie renouvelables intégrées dans l'ensemble des secteurs de consommation constitue une solution primordiale. Dans un premier temps, cette stratégie permettrait de restreindre les effets néfastes de la pollution associée à la production directe d'énergie. Par la suite, à mesure que ces sources renouvelables gagnent en importance, elles pourraient contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre, tendant ainsi vers une diminution progressive de l'émission de ces gaz [10].

Conformément aux projections établies par les autorités nationales et internationales en réponse à l'impératif d'atténuation du changement climatique. Il est prévu que la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique mondial connaisse une croissance inédite au cours des prochaines décennies. Cette évolution reflète l'engagement croissant en faveur de sources d'énergie plus durables et moins émettrices de gaz à effet de serre. L'évolution illustrée dans la figure 1.2 met en lumière cette tendance prometteuse, soulignant ainsi la trajectoire ascendante prévue pour l'intégration des énergies renouvelables dans le paysage énergétique mondial [11].

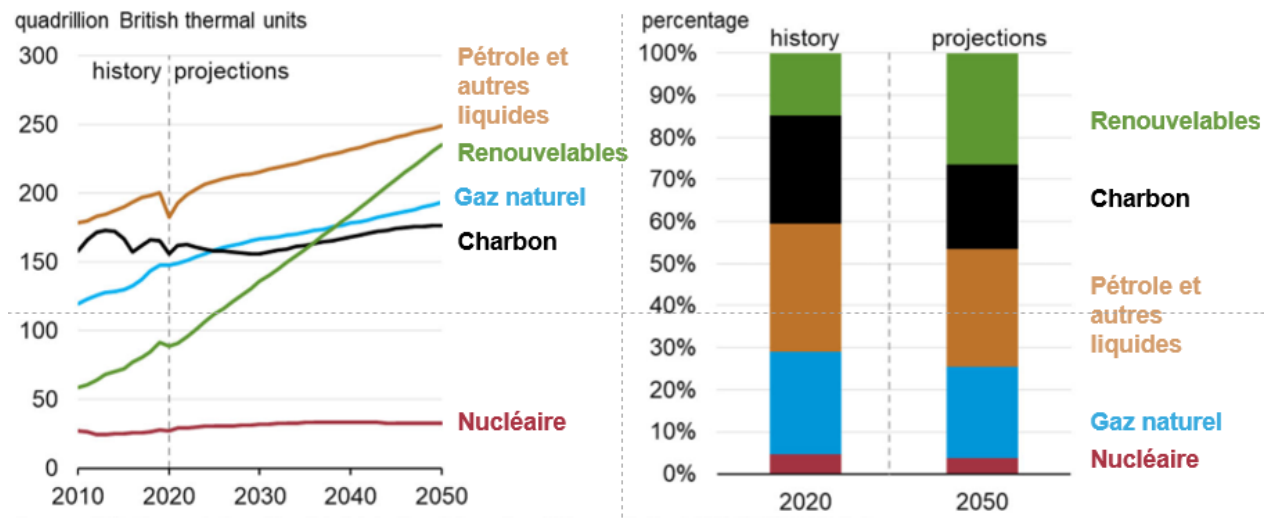


FIGURE 1.2 – Prévision de l'évolution de la consommation énergétique mondiale par source d'énergie [11].

De l'exploitation des ressources fossiles à l'émergence des technologies vertes, chaque type d'énergie présente ses avantages, ses inconvénients et ses implications économiques et écologiques. Ainsi, ce chapitre vise à fournir un aperçu complet du paysage énergétique actuel, en mettant en lumière les alternatives viables pour une transition vers un avenir énergétique plus durable et résilient.

1.2 Générateurs d'énergies renouvelables

1.2.1 Générateur éolien

L'énergie éolienne est l'une des sources renouvelables les plus prometteuse en raison de son abondance dans certaines régions du monde. Elle vient de l'énergie contenue dans les masses d'air en mouvement, qui ensuite est capté par des aérogénérateur appelés éoliennes.

Les éoliennes fonctionnent sur un principe relativement simple : elles utilisent des pales tournant autour d'un axe central pour capter l'énergie cinétique du vent. Ce mouvement des pales à travers un multiplicateur, entraîne la rotation d'un générateur qui produit de l'électricité. Ce processus de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique est réalisé par des technologies de pointe intégrées dans les éoliennes.

La puissance électrique que fournit l'éolienne dépend de plusieurs facteurs tel que la vitesse du vent, l'envergure et l'inclinaison des pales, les rendements de la partie mécanique et électrique [12].

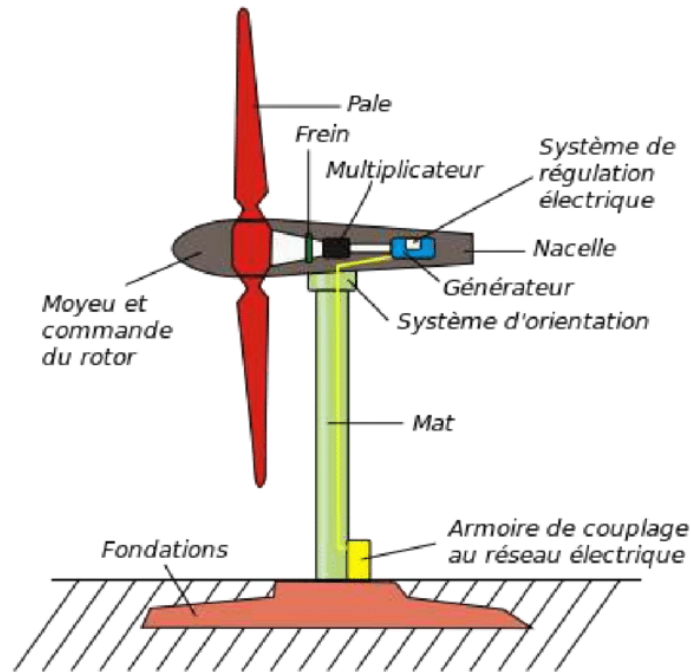


FIGURE 1.3 – Composition d'une éolienne [13].

L'énergie éolienne, en tant que source d'énergie propre et renouvelable, offre des avantages majeurs en contribuant à la réduction des émissions polluantes et à la lutte contre le changement climatique. Cependant, sa nature intermittente pose un défi en raison des fluctuations du vent.

1.2.2 Générateurs solaires

Le soleil de par son rayonnement, est la source la mieux répartie et la plus abondante sur terre. Il décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre en intercepte une infime partie lors de sa rotation au tour de cet astre. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre pour une distance moyenne terre-soleil de 150 millions de km, c'est ce que l'on appelle la constante solaire qui est égale à 1367 W/m^2 . La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser [14].

L'énergie solaire a essentiellement deux usages :

- Transformer cette énergie en électricité, ce qu'on appelle l'énergie solaire photovoltaïque.
- Récupérer et utiliser sa chaleur, ce qu'on nomme l'énergie solaire thermique.

Générateur solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être relativement non polluante et fiable, elle vient de la transformation de l'énergie lumineuse émise par le soleil dans un matériau semi-conducteur, et plus précisément dans une cellule PV, en énergie électrique et ce grâce à un phénomène physique appelé « effet photovoltaïque ». Cet effet désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau [15].

La cellule photovoltaïque est l'élément de base qui assure la transformation de la lumière du soleil en énergie électrique. Généralement faite à base de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, le germanium ou d'autre assortiment de matériaux qui assurent le même effet. Une force électromotrice apparaît lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, sa disposition, sa température ainsi que le vieillissement de la cellule.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est relativement simple. Un semi-conducteur présentant une face négative et une face positive, du silicium par exemple, est exposé à la lumière. En percutant les atomes de silicium, les photons mettent en mouvement des électrons qui se déplacent dans des directions différentes selon leur charge. C'est ce déplacement d'électrons qui génère un courant électrique.

Pour que les électrons soient attirés d'un côté ou de l'autre du dispositif, la cellule photovoltaïque doit posséder une face négative et une face positive. Le silicium utilisé en surface est donc préalablement chargé, ou « dopé », négativement en lui adjoignant du phosphore. De même, le silicium utilisé au dos de la cellule photovoltaïque est chargé positivement avec du bore [16].

La figure ci-après schématise le fonctionnement de base d'une cellule photovoltaïque :

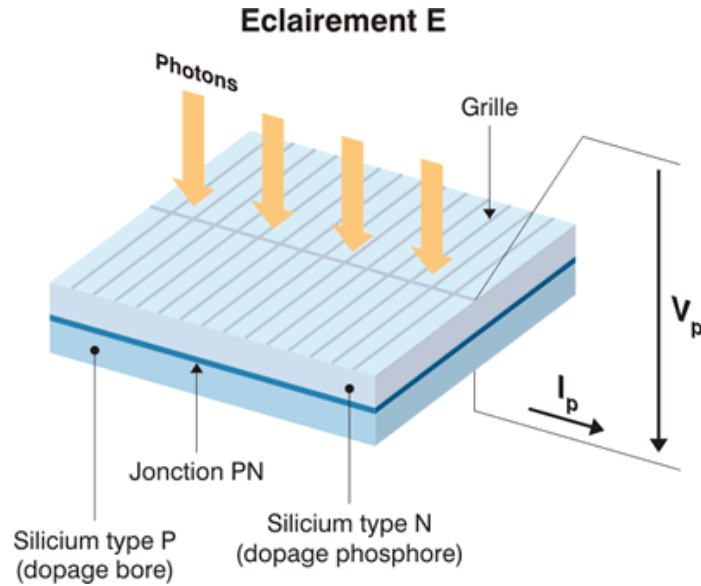


FIGURE 1.4 – Schéma du fonctionnement d'une cellule PV [17].

Un dispositif photovoltaïque peut être caractérisé principalement via deux caractéristiques : une courbe courant tension (I-V) et une courbe puissance tension (P-V). Ces courbes permettent d'évaluer l'efficacité et le rendement d'une technologie ou d'un dispositif face à un autre pour les mêmes conditions. [18]

La courbe courant-tension (I-V) et la courbe puissance-tension (P-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule sont représentées dans la figure suivante :

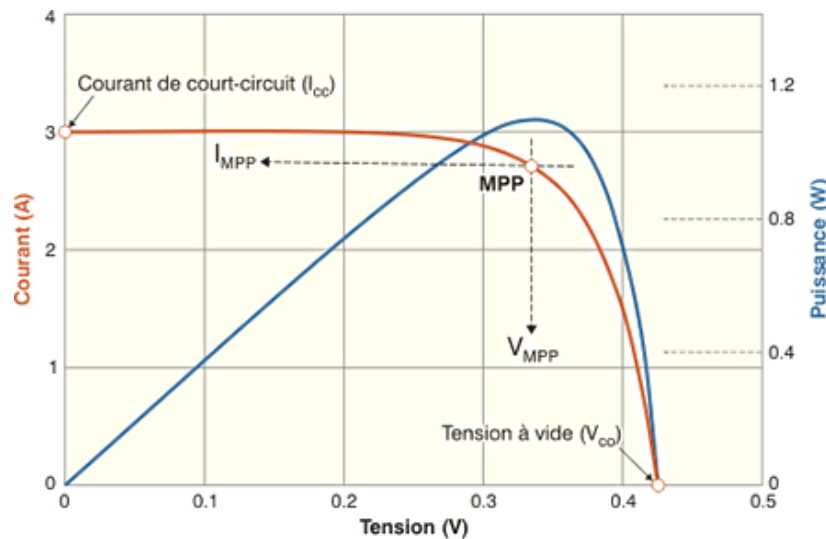


FIGURE 1.5 – caractéristique I-V et P-V d'une cellule PV [17].

Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représente la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.

Son courant court-circuit : I_{cc} . Cette valeur représente le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.

Son point de puissance maximal : PPM (en anglais MPP : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

L'association de plusieurs cellules (PV) en série et ou en parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV).

Lors d'une association en série, les cellules sont traversées par le même courant et la tension qui en résulte est égale à la somme des tensions de chaque cellule. Donc pour un nombre n_s de cellules, la tension du GPV sera $V_{GPV} = n_s \times V_{cellule}$ comme illustré sur la figure 1.6.

Lors d'une association en parallèle, les cellules sont traversées par la même tension et le courant qui en résulte est égale à la somme des courants de chaque cellule. Donc pour un nombre n_p de cellules, le courant du GPV sera $I_{GPV} = n_p \times I_{cellule}$ comme illustré dans la figure 1.7.

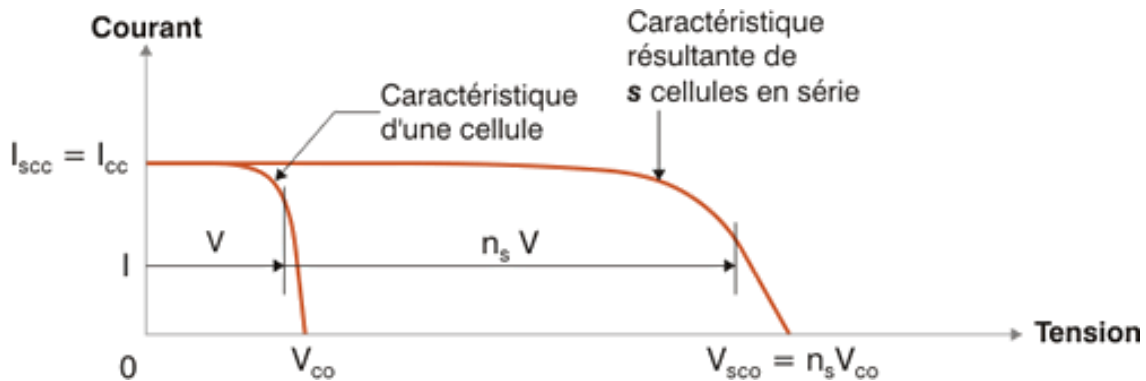


FIGURE 1.6 – Caractéristique I-V lors d'une mise en série [17].

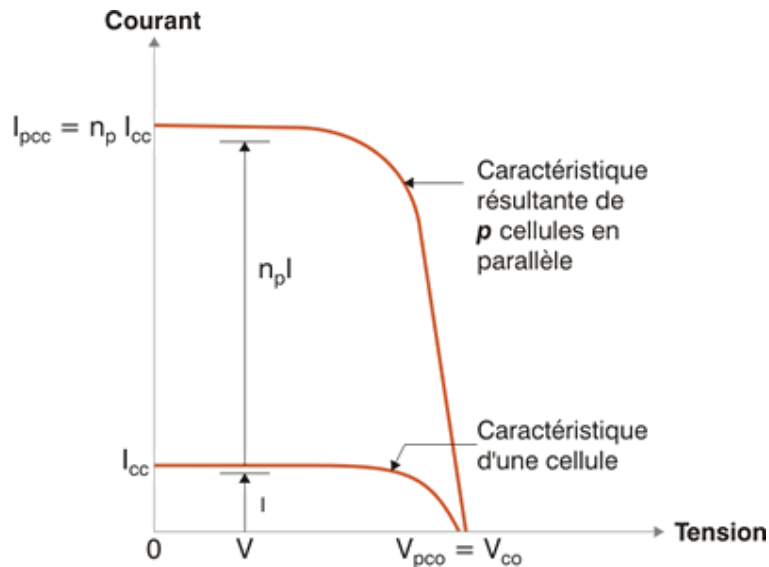


FIGURE 1.7 – Caractéristique I-V lors d'une mise en parallèle [17].

Il existe principalement deux types d'installations basées sur les générateurs photovoltaïques [18] :

- Installation photovoltaïque raccordée au réseau.
- Installation photovoltaïque isolée (autonome).

Les systèmes connectés au réseau sont généralement installés pour soit revendre directement la totalité de la puissance générée au réseau quand les infrastructures le permettent, ou bien d'alimenter des charges et quand il y a un surplus de production, le revendre au réseau afin d'amortir les coûts d'exploitation de l'installation.

Pour les systèmes dit autonome, on peut y distinguer deux catégories ; des systèmes au fil du soleil pour des installations qui ne requièrent pas de continuité d'alimentation, et des systèmes qui intègrent des moyens de stockage de l'énergie tel que des batteries, des supercondensateurs, stockage par air comprimé... ect, et ce pour palier à la nature intermittente de cette énergie.

Générateur solaire thermique

Le rayonnement solaire quand il est absorbé par un corps, induit dans celui-ci une chaleur (énergie calorifique) qui peut être exploitée de trois principales manières [20] :

- Solaire Thermique à Basse Température : Ce type de technologie solaire thermique est couramment utilisé pour des applications telles que le chauffage de l'eau à usage domestique ou le chauffage de l'espace. Il fonctionne à des températures assez basses souvent inférieures à 60°C .

- Solaire Thermique à Température Moyenne : Cette catégorie implique généralement des systèmes qui fonctionnent à des températures modérées allant de **60°C** à environ **150°C**, et peuvent être utilisés pour diverses applications telles que le chauffage de l'eau et le chauffage de l'espace à plus grande échelle, peuvent même convenir à des usages industriels modérés.

-Solaire Thermique à Haute Température : Ce type de technologie solaire thermique concentre la lumière du soleil pour générer de la chaleur à haute température, atteignant des températures entre **250°C** et **1 000°C**. Il est couramment utilisé dans la production d'électricité en entraînant des turbines pour produire de l'électricité.

La figure 1.8 illustre le principe simplifié du fonctionnement de cette énergie, la chaleur est récupérée grâce à des concentrateurs solaires puis soit stockée soit acheminée directement pour être transformée/utilisée.

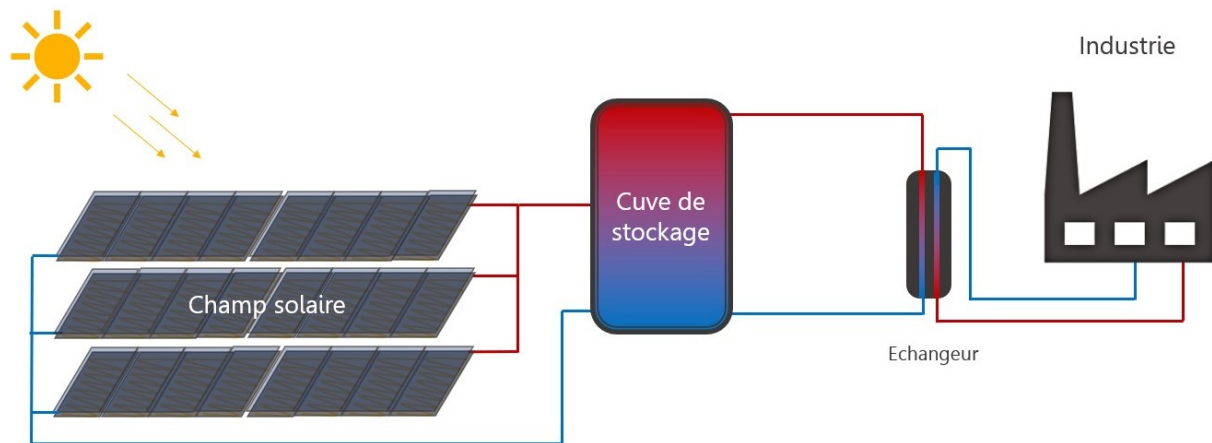


FIGURE 1.8 – Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

1.2.3 Générateur hydroélectrique

Ces générateurs tirent parti de l'énergie potentielle accumulée dans les cours d'eau tels que les fleuves, rivières et cascades. Ce processus de conversion permet à la puissance cinétique de l'eau en mouvement d'être transformée en énergie mécanique grâce à une turbine avant d'être convertie en électricité par l'intermédiaire d'un alternateur.

Appelées également centrales gravitaires, elles exploitent le courant de l'eau en fonction de leur emplacement et du dénivelé. On distingue trois catégories principales [21] :

1. Les centrales au fil de l'eau, qui tirent parti du flux constant des rivières pour générer une énergie continue, avec un coût et des infrastructures moindres, comprenant de petits barrages et réservoirs pour réguler le débit.

2. Les centrales d'écluse, situées sur des fleuves à pente importante, utilisent une série de barrages créant des chutes d'eau pour produire une énergie régulière et de pointe, grâce à une gestion optimisée de l'eau entre les barrages.

3. Les centrales-lacs, associées à d'importants réservoirs permis par des barrages, stockent l'eau saisonnièrement et ajustent la production électrique aux périodes de forte demande, avec l'usine souvent positionnée en aval du barrage.

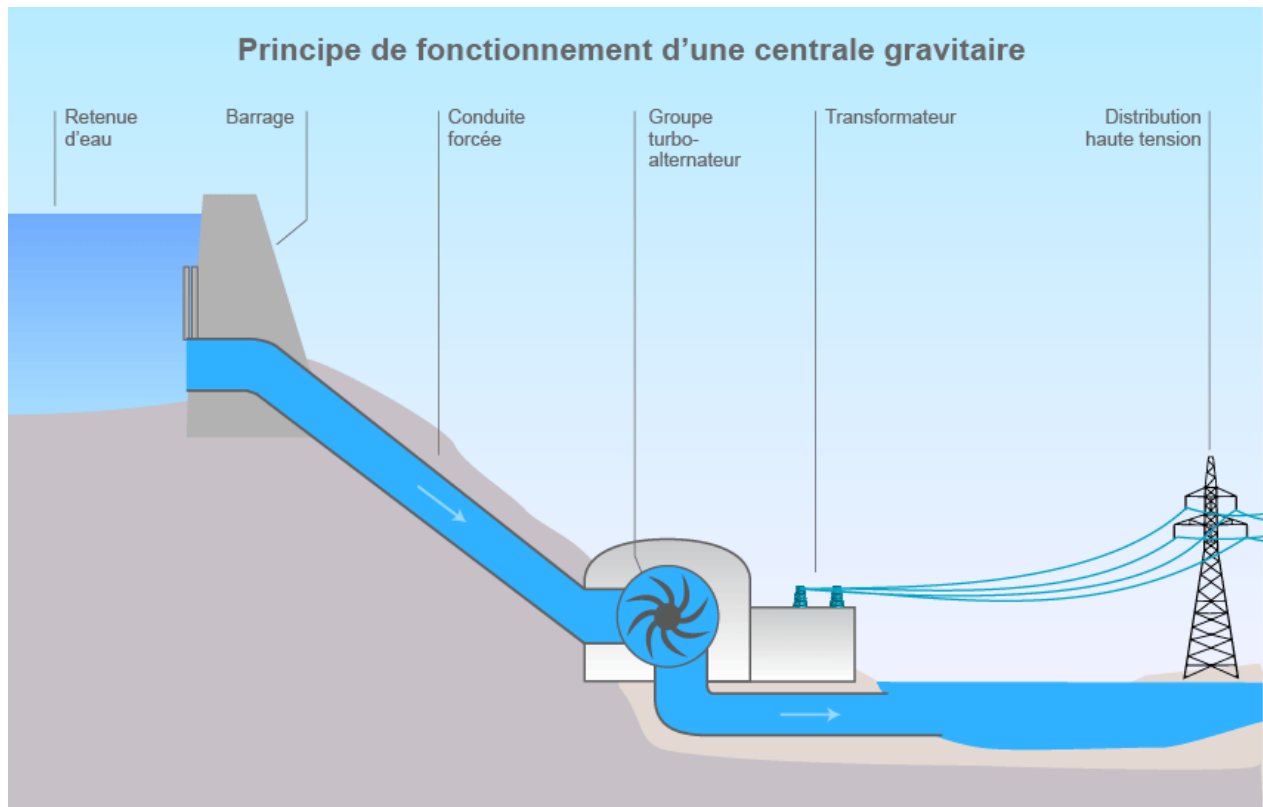


FIGURE 1.9 – Principe de fonctionnement d'une centrale gravitaire [21].

Les installations hydroélectriques sont composées de deux éléments clés [21] :

Premièrement, une retenue ou un captage d'eau (comme c'est le cas pour les aménagements au fil de l'eau) qui crée une chute artificielle. Il y a souvent un bassin de stockage pour assurer le fonctionnement de l'installation même lors des périodes d'étiage. On peut également creuser un canal de déviation pour acheminer le surplus d'eau vers un lac artificiel en amont du barrage. Un système d'évacuation des crues est mis en place pour gérer les inondations et protéger la structure sans risque ;

Deuxièmement, la station de production d'énergie, souvent nommée usine, exploite cette chute d'eau pour mettre en mouvement les turbines qui, à leur tour, activent un alternateur.

1.2.4 La biomasse

La biomasse correspond à la part biodégradable des produits, déchets et résidus issus de substances biologiques, que ce soit de l'agriculture, de la zoothérapie, ainsi que des secteurs halieutiques et aquacoles. Elle comprend également les composants biodégradables des rejets industriels et urbains. On peut valoriser la biomasse par deux procédés principaux [19] :

- La fermentation des matières résiduelles permet de récupérer le biogaz méthane pour l'exploiter comme énergie (combustible).
- L'incinération directe de ces déchets et leur utilisation comme combustible.

Dans les deux situations, l'énergie thermique générée est utilisable pour créer de l'électricité au sein des centrales thermiques. L'avantage réside dans le fait que le dioxyde de carbone dégagé lors de la combustion de la biomasse ou du méthane est équilibré par celui capté lors de la croissance ultérieure des végétaux, qui constituent par ailleurs la principale origine de la biomasse. Ainsi, l'équilibre carbone peut être considéré pratiquement neutre.

1.2.5 La géothermie

La géothermie désigne l'énergie renouvelable issue de la chaleur emmagasinée dans le sous-sol terrestre. Cette source de chaleur provient en grande partie de la désintégration naturelle d'éléments radioactifs, de même que de la chaleur initiale conservée depuis la formation terrestre il y a plusieurs milliards d'années. On peut tirer parti de cette énergie pour générer de l'électricité ou produire de la chaleur, et ce, pour divers usages [22].

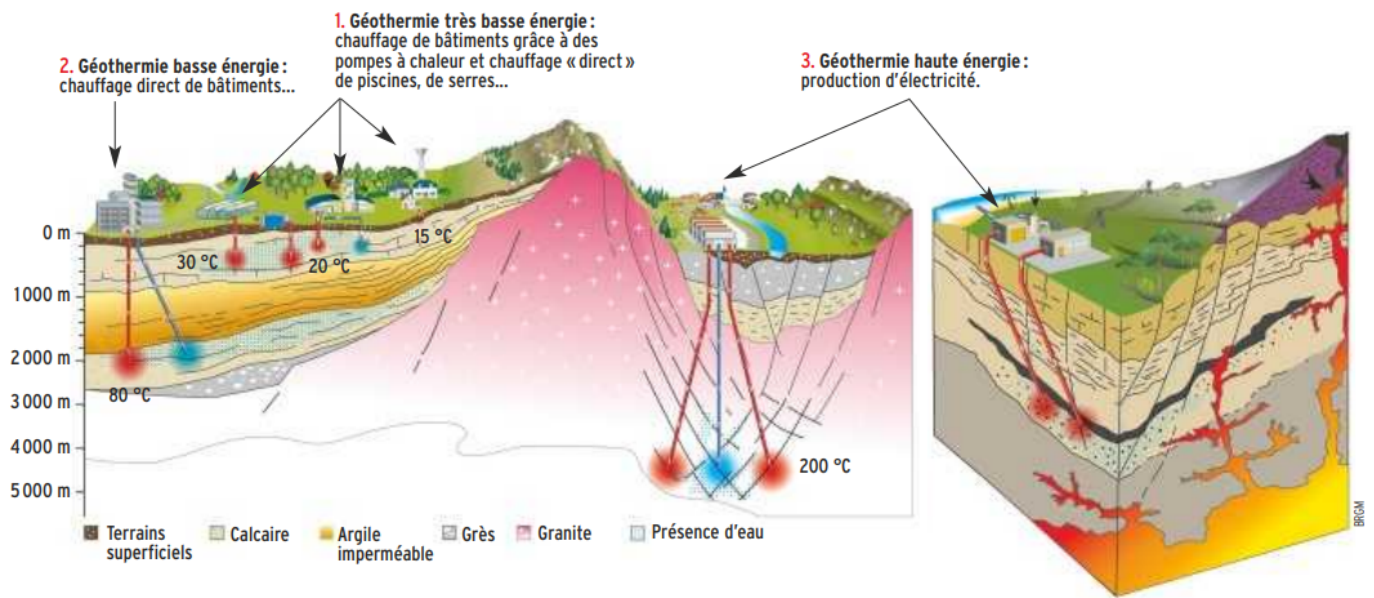


FIGURE 1.10 – Types et usages de la géothermie [23].

On identifie quatre catégories d'exploitations géothermiques selon la température de la source [23] :

-La géothermie très basse énergie utilise des niveaux superficiels de **15°C** à **30°C**, en extrayant le fluide par forage ou via des tuyaux proches de la surface pour le chauffage domestique au moyen d'une pompe à chaleur. À ces températures, l'eau peut servir d'emblée pour l'agriculture ou l'industrie.

-La géothermie basse énergie puise dans des sources profondes, chaudes de **40°C** à **90°C**, permettant de chauffer des bâtiments directement avec une eau de source terrestre, éliminant le besoin d'une chaudière.

-La géothermie moyenne énergie s'intéresse aux fluides entre **90°C** et **150°C**, souvent trouvés dans des zones volcaniques ou plus profondément dans les sédiments. L'eau chaude extraite est utilisée pour le chauffage urbain et industriel, et parfois convertie en électricité dans les centrales binaires où elle évapore un fluide secondaire pour actionner les turbines.

-La géothermie haute énergie exploite des environnements géologiques spécifiques, caractérisés par des fractures et la présence de magmas ou de roches chaudes à plusieurs kilomètres de profondeur. Ces systèmes permettent de récupérer des fluides dont la température dépasse souvent **150°C**, parfois même **350°C**. Cette chaleur est convertie efficacement en électricité, notamment lorsque le fluide caloporteur est partiellement sous forme de vapeur. Dans les zones où les roches ne sont pas naturellement alimentées en fluide, celui-ci est injecté artificiellement par des forages. Un premier forage injecte un fluide froid sous pression, créant des fractures dans les roches, tandis qu'un deuxième forage, situé à quelques centaines de mètres, récupère le fluide chauffé lors de son passage en profondeur.

1.3 Générateurs d'énergie conventionnelle

Un générateur d'énergie conventionnelle est un dispositif utilisé pour produire de l'électricité à partir de sources d'énergie traditionnelles telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Ce processus de conversion repose sur la transformation de l'énergie thermique libérée lors de la combustion des combustibles en énergie électrique.

Le fonctionnement de ces générateurs est élaboré mais essentiellement basé sur quelques étapes clés. Tout d'abord, les combustibles fossiles sont brûlés dans une chambre spéciale, produisant ainsi une chaleur intense. Cette chaleur est alors utilisée pour chauffer de l'eau et créer de la vapeur sous haute pression.

La vapeur résultante est dirigée vers une turbine à vapeur, où sa pression entraîne la rotation des pales à grande vitesse. Cette rotation est ensuite convertie en électricité par un générateur électrique connecté à la turbine. Plus précisément, le mouvement de rotation de la

turbine induit un courant électrique dans les bobines du générateur par le biais de l'induction électromagnétique.

Enfin, le courant électrique ainsi produit est intégré au réseau électrique pour être distribué aux consommateurs finaux. Ce processus de conversion d'énergie thermique en énergie électrique dans les générateurs d'énergie conventionnelle constitue un pilier majeur de notre infrastructure énergétique, assurant un approvisionnement électrique fiable et continu à grande échelle [24].

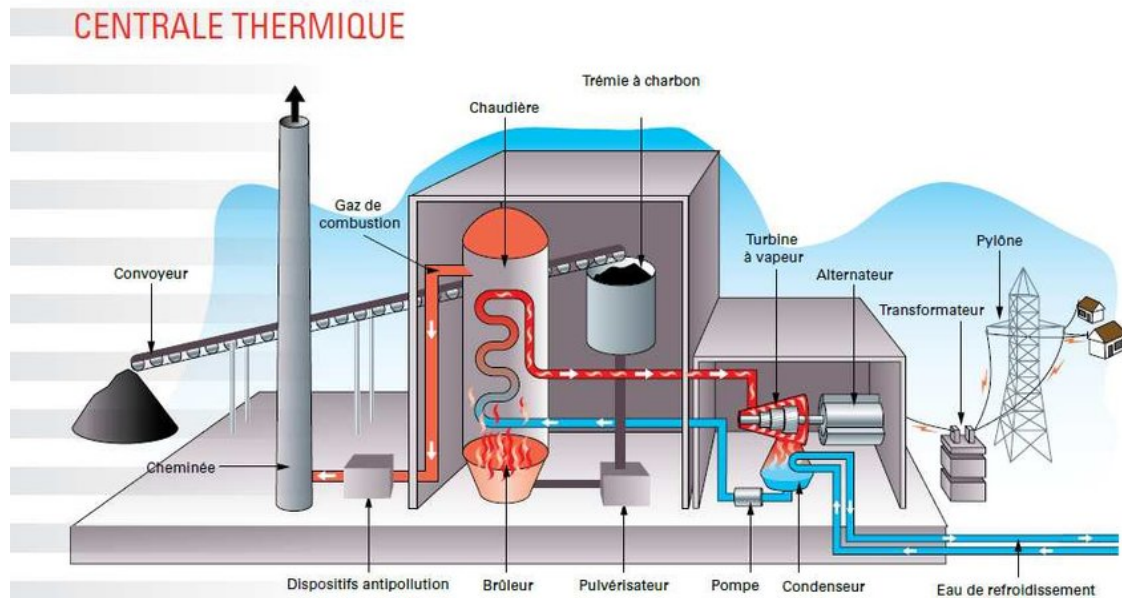


FIGURE 1.11 – Principe de fonctionnement d'une centrale à charbon [25].

Considérée comme des centrales thermiques également, les centrales nucléaires présentent des similitudes dans le principe de fonctionnement avec celles citées précédemment [26].

L'énergie nucléaire représente une forme énergétique émanant du noyau des atomes, on peut l'obtenir via deux manières différentes : la fission, qui implique la division du noyau atomique en plusieurs fragments, ou la fusion, résultant de l'union de multiples noyaux.

Actuellement, l'électricité d'origine nucléaire est essentiellement issue de la fission nucléaire, car la technologie requise pour la fusion nucléaire, bien que prometteuse, demeure encore trop instable pour être déployée à grande échelle.

Dans les centrales nucléaires, les réacteurs, généralement alimentés par de l'**uranium 235**, provoquent une réaction en chaîne contrôlée pour produire de la chaleur par fission. Cette chaleur est utilisée pour chauffer un agent de refroidissement, généralement de l'eau, produisant ainsi de la vapeur. Cette vapeur est ensuite dirigée vers des turbines qui, en tournant, actionnent un générateur électrique pour produire de l'électricité.

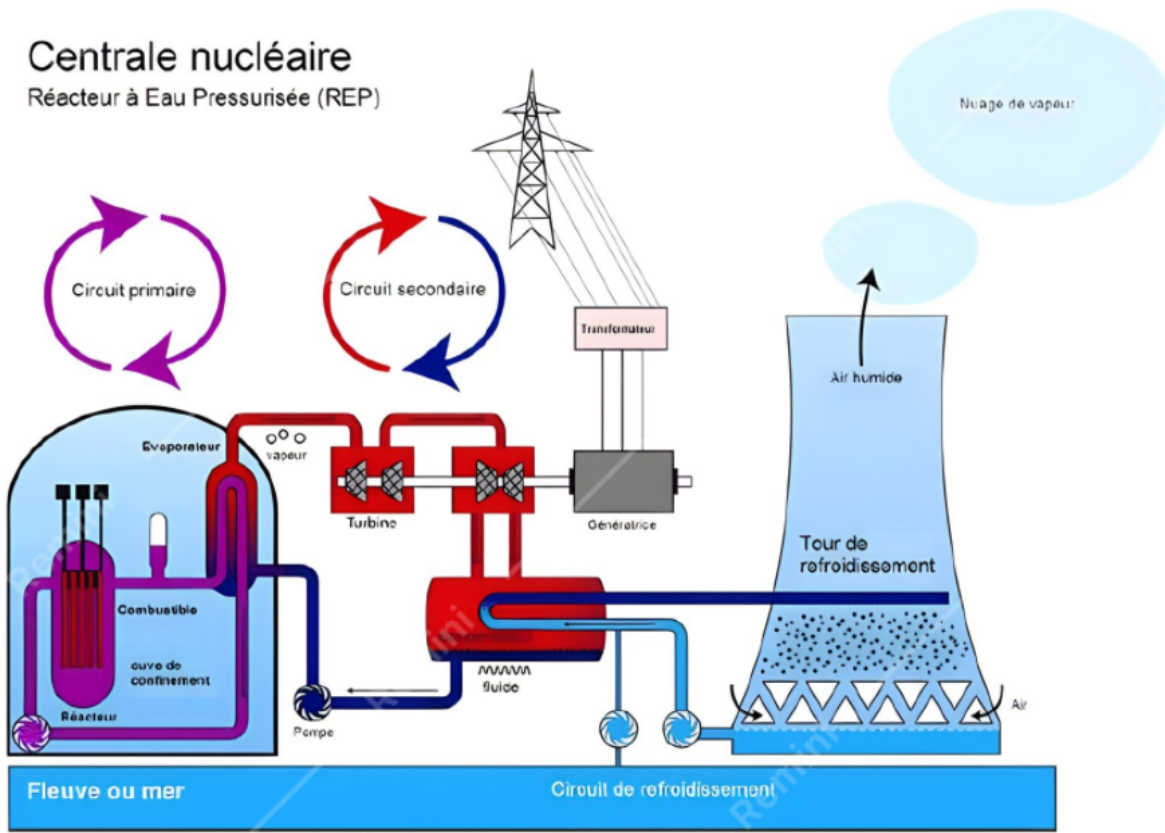


FIGURE 1.12 – Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire [26].

1.4 Systèmes de stockage de l'énergie

1.4.1 Stockage par batteries

Dans les batteries, l'énergie est emmagasinée sous forme électrochimique, puis est restituée sous forme d'énergie électrique. Ces systèmes sont considérés comme des sources d'énergie, caractérisées par une densité énergétique souvent plus élevée que celle des sources de puissance. Cette densité énergétique peut considérablement varier selon la technologie utilisée (Acide-Pb ; Li-ion ; Ni-Cd...).

Une batterie est un ensemble de cellules d'accumulateurs, qui elles sont composées de deux électrodes (en matériaux conducteurs) appelées cathode et anode et d'un électrolyte (conducteur ionique et isolant électronique).

Pendant la décharge de l'accumulateur, la cathode, ou électrode positive, subit une réaction de réduction impliquant le couple de réactifs ayant le potentiel le plus élevé, tandis que l'anode, ou électrode négative, est le lieu d'une réaction d'oxydation impliquant le couple de

réactifs ayant le potentiel le plus bas. Ces réactions engendrent une différence de potentiel entre les deux électrodes, permettant ainsi à la batterie de générer un courant électrique lorsqu'elle est connectée à un circuit externe.

En revanche, lors de la charge, ce processus est inversé : l'anode, maintenant considérée comme positive, subit une réaction d'oxydation, tandis que la cathode, devenue négative, subit une réaction de réduction, créant une différence de potentiel similaire qui peut être utilisée pour charger la batterie [27].

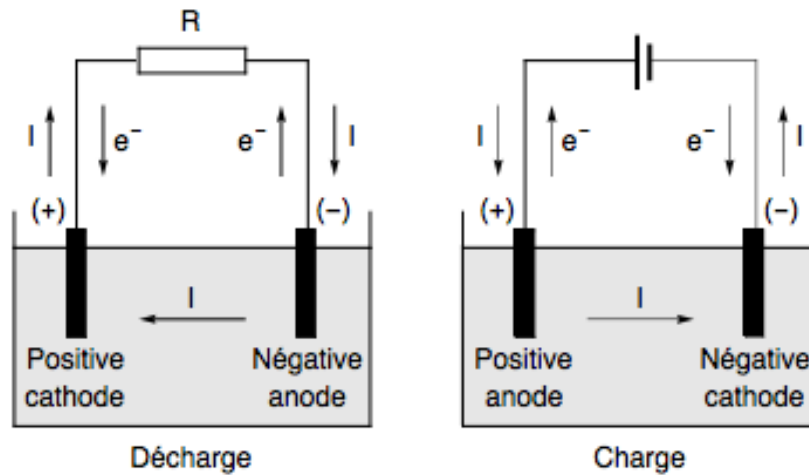


FIGURE 1.13 – Schéma explicatif de la charge et de décharge d'un accumulateur [28].

1.4.2 Stockage par condensateur

Un condensateur est un composant électrique utilisé pour stocker de l'énergie électrique sous forme d'énergie électrostatique. Il se compose de deux plaques conductrices séparées par un matériau isolant appelé diélectrique.

Lorsque l'on applique une tension aux bornes du condensateur, des charges électriques de signes opposés s'accumulent sur les plaques, créant un champ électrique entre elles. Ce champ électrique stocke de l'énergie potentielle électrostatique dans le condensateur.

Les condensateurs sont capables de stocker et de libérer de l'énergie électrique très rapidement, ce qui les rend utiles pour des applications nécessitant une réponse rapide, telles que le filtrage de signaux électriques ou la réduction des variations de tension dans les circuits électriques. Cependant, leur capacité de stockage est généralement limitée par rapport à d'autres technologies de stockage d'énergie [29].

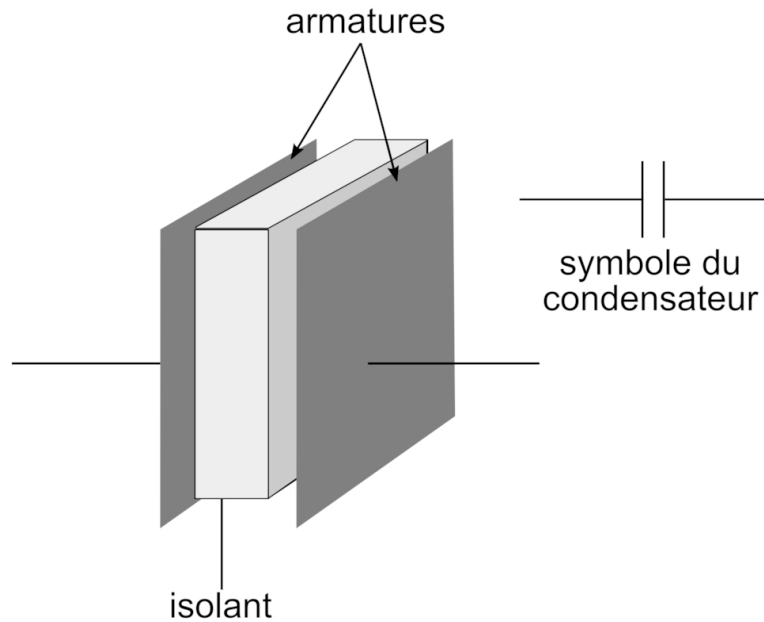


FIGURE 1.14 – Vue d'un condensateur plan idéal [29].

1.4.3 Stockage par supercondensateur

Les supercondensateurs sont une forme avancée de condensateurs utilisés pour le stockage d'énergie électrique. Contrairement aux condensateurs traditionnels, ils ont une capacité de stockage beaucoup plus élevée grâce à leur structure interne spéciale.

Ils se composent de deux électrodes poreuses généralement en carbone, avec un électrolyte conducteur entre elles. Cette structure permet une grande surface de contact entre les électrodes et l'électrolyte, ce qui augmente sa capacité de stockage d'énergie.

Ils peuvent stocker et libérer de l'énergie beaucoup plus rapidement que les batteries traditionnelles, ce qui en fait des candidats idéaux pour les applications nécessitant une puissance élevée pendant de courts instants, tel que le démarrage de moteurs électriques, les systèmes de récupération d'énergie, et les dispositifs électroniques portables.

Bien que les supercondensateurs offrent une capacité de stockage d'énergie plus élevée que les condensateurs conventionnels, ils ont une densité énergétique plus faible que les batteries, ce qui signifie qu'ils sont généralement utilisés en complément des batteries pour fournir une puissance supplémentaire lorsqu'une forte demande de courant est nécessaire [29].

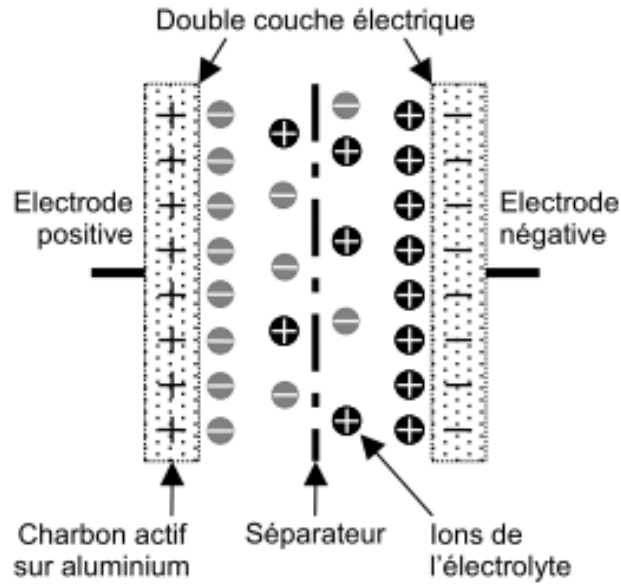


FIGURE 1.15 – Structure d'un supercondensateur [29].

1.4.4 Stockage par station de transfert d'énergie par pompage STEP

Les stations de transfert d'énergie par pompage, ou STEP, utilisent deux réservoirs d'eau à différents niveaux, avec un système capable de fonctionner comme pompe et turbine pour l'hydraulique et comme moteur et alternateur pour l'électrique. Ces installations génèrent de l'électricité en libérant l'eau du réservoir supérieur lors des pics de demande et re-pompent l'eau en périodes creuses où l'énergie est moins chère. Bien qu'elles ne produisent pas directement d'énergie renouvelable, car elles consomment de l'électricité pour fonctionner, les STEP servent principalement au stockage d'énergie. Elles sont sollicitées pour répondre rapidement aux besoins du réseau électrique et peuvent être utilisées en complément des autres centrales hydrauliques [21].

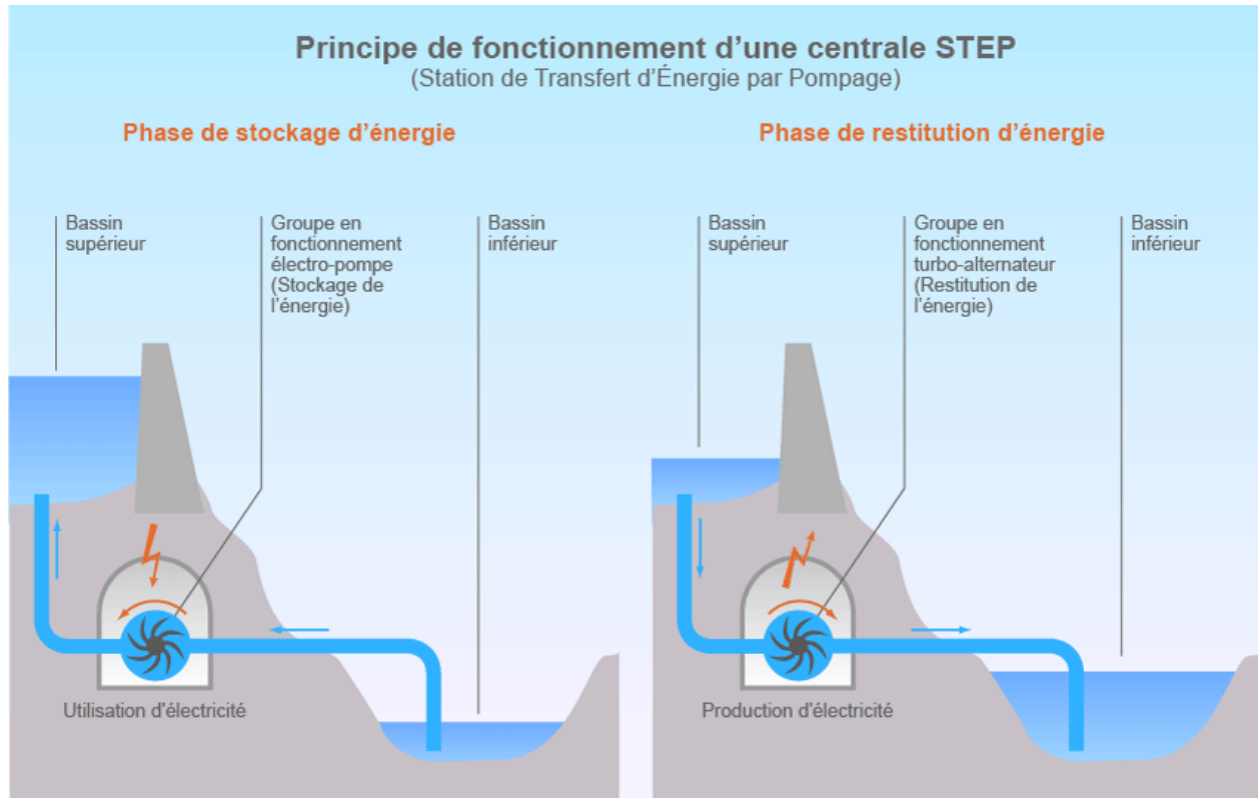


FIGURE 1.16 – Principe de fonctionnement d'une centrale STEP [21].

1.4.5 Stockage par air comprimé CAES

Le stockage d'énergie par air comprimé, (dit en anglais CAES : Compressed Air Energy Storage), est une méthode de stockage d'énergie qui repose sur la compression de l'air à haute pression et le libérer ultérieurement à travers une turbine pour convertir cette énergie accumulée en électricité.

Ce type de stockage repose principalement sur les points suivants [30] :

1. Compression de l'air : L'air ambiant est comprimé à l'aide d'un compresseur, et ce à des pressions élevées allant de **100 à 1000 bars** en général, provoquant ainsi une élévation significative de la température de l'air.

2. Stockage de l'air comprimé : L'air comprimé est conservé dans des réservoirs souterrains ou des cavités naturelles, souvent localisés à des profondeurs significatives afin de profiter de la pression hydrostatique. Ces réservoirs agissent comme des réservoirs d'énergie potentielle.

3. Exploitation de l'énergie stockée : Lorsque l'électricité est nécessaire, l'air comprimé est libéré des réservoirs et passe à travers une turbine. En se détendant, l'air comprimé entraîne la rotation de la turbine, qui est connectée à un générateur électrique pour produire de l'électricité.

4. Gestion de la chaleur : Pendant la détente de l'air, une partie de l'énergie est convertie en travail mécanique pour produire de l'électricité, tandis que le reste est dissipé sous forme de chaleur. Cette chaleur peut être récupérée et utilisée à d'autres fins, comme le chauffage urbain ou le processus industriel, améliorant ainsi l'efficacité globale du système.

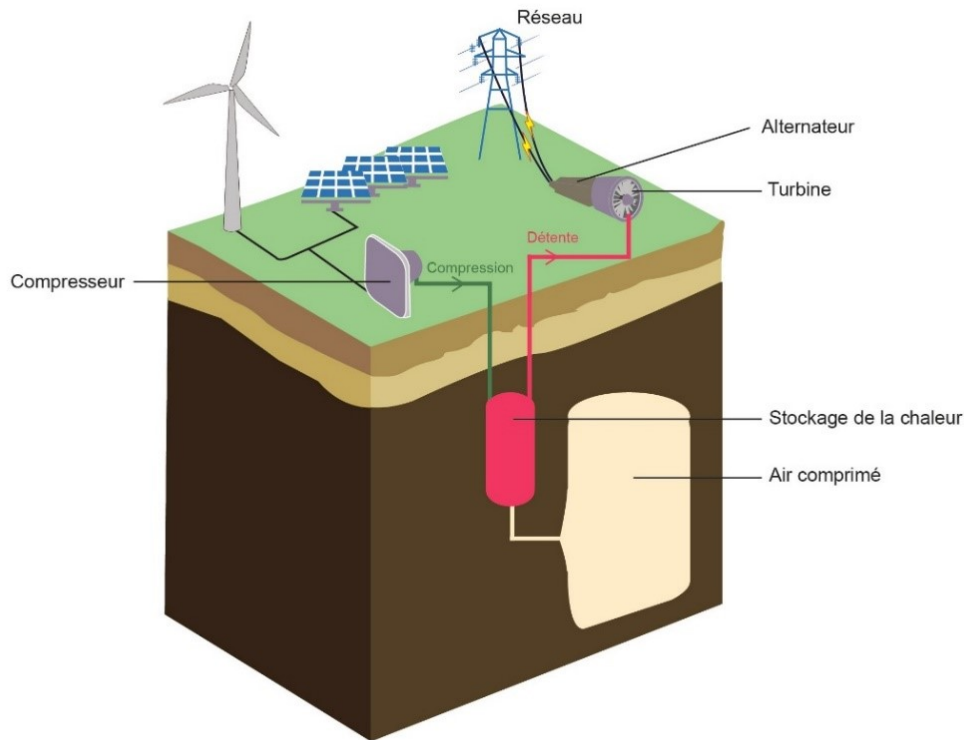


FIGURE 1.17 – Schéma simplifié d'un système de CAES [30].

1.4.6 Stockage par volant d'inertie

Les volants d'inertie sont des dispositifs mécaniques conçus pour stocker de l'énergie cinétique en tournant à des vitesses élevées. Ils sont souvent utilisés comme système de stockage d'énergie dans les applications où une alimentation électrique constante est requise, comme les réseaux électriques ou les véhicules hybrides.

Lorsque de l'électricité est fournie au volant d'inertie, il accélère, stockant ainsi de l'énergie cinétique. Cette énergie peut ensuite être récupérée lorsque nécessaire en inversant le processus : le volant ralentit, libérant ainsi l'énergie stockée sous forme d'électricité.

Les volants d'inertie offrent plusieurs avantages, notamment une réponse rapide aux va-

riations de charge, une longue durée de vie et une grande efficacité énergétique. Ils sont également utilisés dans des applications telles que le stockage d'énergie renouvelable et la régulation de la fréquence dans les réseaux électriques [27].

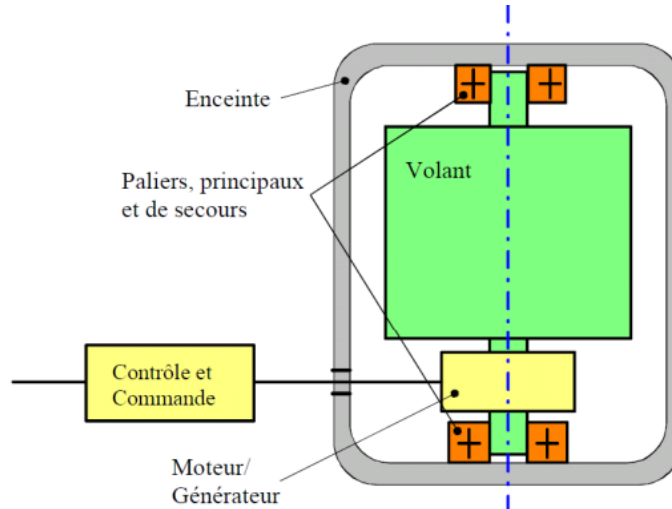


FIGURE 1.18 – Structure d'un volant d'inertie [27].

1.5 Introduction à l'hybridation

1.5.1 Définition

Un système hybride d'énergie SHE, est un système qui combine différentes sources d'énergie, renouvelables ou non renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique, géothermique, biomasse, énergies provenant de combustibles fossiles ainsi que des technologies de stockage d'énergie (batteries, stockage thermique, stockage d'hydrogène, etc.). Ils peuvent être exclusivement une combinaison d'énergies renouvelables avec ou sans stockage appelé SHER (système hybride à énergies renouvelables), ou un mix de sources traditionnelles et renouvelables avec ou sans stockage qui est noté SHE [31].

1.5.2 Objectif

Les systèmes d'énergie hybride représentent une réponse innovante et stratégique aux défis posés par la fluctuation et l'intermittence des sources d'énergie renouvelables. Leur objectif premier est de garantir une alimentation énergétique stable et fiable, en tirant parti d'une combinaison EnR-ER qui tire partie des avantages de chaque source.

En optimisant l'utilisation de ces ressources, les systèmes hybrides améliorent l'efficacité énergétique tout en renforçant la fiabilité et la durabilité de l'approvisionnement énergétique. En effet, cette approche permet de minimiser les interruptions dans la fourniture d'énergie, tout en contribuant à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les systèmes d'énergie hybride se positionnent comme une solution polyvalente et durable pour répondre aux besoins énergétiques actuels, tout en favorisant une transition vers une énergie plus propre et résiliente [32].

La figure suivante illustre les différentes sources d'énergies existante et les combinaisons possibles de systèmes hybrides :

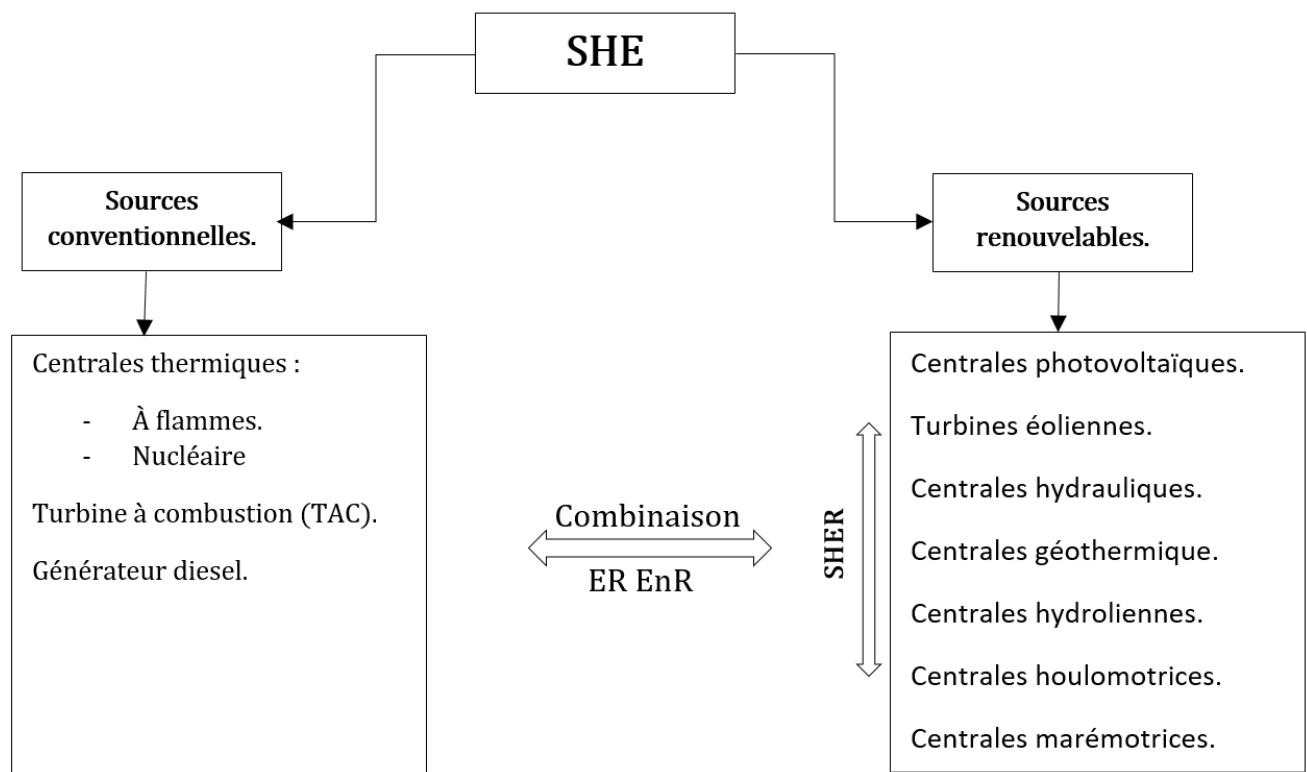


FIGURE 1.19 – Principales sources conventionnelles et non conventionnelles d'énergie.

1.5.3 Avantages et limites des SHE

Étant une alternative prometteuse du paysage énergétique futur, les SHE présentent plusieurs avantages pour répondre à la demande croissante d'énergie, en s'adaptant à de multiples scénarios possible avec une grande flexibilité. Cependant comme tout système électrique, ils présentent également des défauts et des limites qu'on détaille dans ce point.

Avantages

Les systèmes d'énergie hybride se distinguent par plusieurs avantages qui les placent en tête comme la solution de production d'énergie la plus fiable et efficace à court, moyen et long terme. Tout d'abord, en combinant des énergies traditionnelles et renouvelables, ces systèmes parviennent à atténuer l'intermittence et l'instabilité inhérentes aux sources d'énergie verte. En effet, les ressources renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, sont souvent dépendantes de facteurs météorologiques aléatoires et imprévisibles. Cette combinaison permet donc d'assurer une production d'énergie plus stable et régulière, répondant ainsi aux besoins de manière plus fiable.

Deuxièmement, en palliant ce problème d'intermittence associé aux énergies renouvelables, les SHE génèrent un rendement énergétique accru. Par conséquent, ces systèmes offrent des rendements inatteignables par les systèmes hybrides simples. Cette optimisation du rendement énergétique se traduit par une économie significative en termes de coûts énergétiques, contribuant ainsi à une meilleure rentabilité de l'énergie produite. Cette économie peut être particulièrement remarquable dans les applications à grande échelle, où chaque point de pourcentage d'amélioration du rendement se traduit par des économies substantielles sur le long terme.

Enfin, la combinaison de sources d'énergie conventionnelles avec des sources renouvelables permet de contourner la nécessité d'utiliser des systèmes de stockage d'énergie coûteux. Ces systèmes de stockage, bien que cruciaux pour compenser la variabilité des sources d'énergie renouvelables, peuvent représenter jusqu'à **30%** du coût total de l'installation. En éliminant ou en réduisant considérablement cette dépendance aux systèmes de stockage d'énergie, les SHE contribuent à réduire les coûts d'investissement initiaux et à améliorer la viabilité économique des projets d'énergie renouvelable.

En somme, les SHE se distinguent comme une solution énergétique polyvalente, offrant fiabilité, efficacité et économies à toutes les échelles [31].

Limites

Bien que les systèmes d'énergie hybride présentent de nombreux avantages, ils ne sont pas sans leurs défis et limitations. Deux aspects cruciaux méritent une attention particulière : la complexité de conception et de gestion, ainsi que la dépendance aux conditions environnementales. Ces deux éléments soulignent les défis techniques et opérationnels auxquels sont confrontés les SHE dans leur quête pour assurer une production d'énergie fiable et efficace.

- Défis de conception et de gestion : La complexité inhérente à la conception et à la gestion des SHE représente une limite majeure. Intégrer efficacement diverses sources d'énergie

et technologies demande une expertise technique avancée. La coordination des flux énergétiques provenant de sources différentes ainsi que la maintenance régulière des composants requièrent des compétences spécialisées. De plus, la nécessité de surveiller et d'optimiser en permanence les performances du système impose une charge supplémentaire en termes de ressources humaines et matérielles.

- Dépendance aux conditions environnementales : Bien que les SHE visent à réduire l'impact de l'intermittence des sources d'énergie renouvelable, leur efficacité reste tributaire des conditions environnementales. Les fluctuations météorologiques telles que le manque de soleil ou de vent peuvent compromettre la disponibilité des sources d'énergie verte, contraignant ainsi les SHE à recourir davantage aux sources d'énergie conventionnelles. Cette dépendance accroît la vulnérabilité du système face aux variations climatiques, pouvant affecter sa fiabilité et sa capacité à répondre à la demande énergétique [31].

1.6 Conclusion

En conclusion, les systèmes hybrides d'énergie offrent une solution prometteuse pour répondre aux défis croissants liés à la disponibilité, à la fiabilité et à la durabilité de nos sources d'énergie. Leur capacité à combiner différentes sources d'énergie renouvelables et non renouvelables représente un pas important vers une transition énergétique plus robuste et respectueuse de l'environnement.

Cependant, leur succès dépend étroitement de la mise en place de systèmes de gestion d'énergie efficaces. Ces systèmes sont essentiels pour surveiller, contrôler et optimiser la production et la distribution d'énergie, garantissant ainsi le bon fonctionnement et la performance optimale des systèmes hybrides. En investissant dans ces technologies de gestion d'énergie et en continuant à promouvoir l'innovation dans le domaine des systèmes hybrides d'énergie, nous pouvons créer un avenir énergétique plus durable et résilient pour les générations futures.

Chapitre 2

Introduction aux Systèmes de Gestion de l'énergie

2.1 Introduction

Bien que les systèmes hybrides d'approvisionnement en énergie offrent des solutions prometteuses pour relever les défis énergétiques de l'avenir, ils s'avèrent cependant insuffisants lorsqu'ils sont considérés de manière isolée. En effet, ces systèmes complexes, qui combinent différentes sources d'énergie renouvelables et non renouvelables, nécessitent une gestion avancée et intégrée pour atteindre leur pleine efficacité.

C'est dans ce contexte que les systèmes de gestion de l'énergie jouent un rôle central. Ils constituent des outils essentiels pour optimiser le fonctionnement et l'exploitation des structures d'électrification hybrides. Ces systèmes de contrôle et de supervision permettent de coordonner les différents éléments du réseau électrique (production, stockage, distribution, consommation), afin d'assurer une utilisation optimale des ressources énergétiques disponibles.

Dans ce chapitre, on examinera en détail les fondements conceptuels de la gestion de l'énergie électrique, tout en s'intéressant aux différentes stratégies et méthodes employées pour optimiser l'utilisation des ressources énergétiques et minimiser les coûts tout en maximisant les bénéfices. On explorera les outils, les techniques et les technologies utilisées dans ce domaine, afin de proposer des solutions durables pour relever les défis énergétiques de notre époque.

2.2 Historique

L'histoire des systèmes de gestion d'énergie remonte à plusieurs décennies, marquée par l'évolution des technologies de l'énergie et les préoccupations croissantes liées à l'efficacité et à la durabilité énergétique.

Au début des années 1970, la crise pétrolière a ébranlé l'économie mondiale, menant à une prise de conscience générale à propos de la dépendance aux combustibles fossiles. Cette période a vu la naissance des premiers systèmes de gestion d'énergie dans les bâtiments industriels et commerciaux, visant à surveiller et optimiser la consommation d'électricité et de chauffage. Ces systèmes étaient primitifs mais représentaient une première étape essentielle vers une gestion énergétique plus efficace [33].

L'arrivée des technologies de l'information a constitué une étape cruciale dans le développement des systèmes de gestion de l'énergie plus évolués. Au cours des années 1980 et 1990, l'arrivée de nouvelles technologies informatiques a permis d'offrir de nouvelles possibilités de contrôle et d'optimisation des installations énergétiques. L'introduction des automates programmables (API), capables de piloter et de réguler les équipements de manière automatisée, a marqué une avancée significative. De même, l'essor des réseaux de communication a facilité l'échange d'informations entre les différents éléments du système. Parallèlement, le développement de logiciels de supervision et d'acquisition de données (en anglais dit SCADA : Supervisory Control And Data Acquisition) a permis une meilleure visualisation et un contrôle plus fin des flux énergétiques. Grâce à ces innovations technologiques, les systèmes de gestion de l'énergie ont pu gagner en précision, en offrant de nouvelles fonctionnalités d'analyse, de prise de décision et d'optimisation des flux énergétiques [34].

Au début des années 2000, une nouvelle technologie est apparue, celle des réseaux électriques intelligents dit "smart grid". Celui-ci visait à réformer le fonctionnement simpliste des réseaux électriques traditionnels, en les rendant plus flexibles, fiables et durables grâce à l'apport des technologies de gestion de l'énergie. L'objectif était de permettre une meilleure intégration des énergies renouvelables variables, un stockage plus efficace de l'électricité et une participation active des consommateurs à la gestion de la demande [35].

Les SGE ont joué un rôle central dans cette évolution, en devenant des outils essentiels pour piloter et optimiser le fonctionnement des réseaux électriques intelligents. Grâce à des technologies de pointe en matière de capteurs, de communication, de contrôle et d'analyse de données, les SGE ont permis d'améliorer la visibilité, la flexibilité et la résilience des systèmes électriques. Ils ont notamment facilité l'intégration à grande échelle des énergies renouvelables, en coordonnant leur production avec les moyens de stockage et la gestion de la demande. Ainsi, le concept de "smart grid" a profondément transformé le rôle et les

fonctionnalités des SGE, les plaçant au cœur de la transition énergétique. Cette évolution a fait des SGE des outils indispensables pour relever les défis de fiabilité, d'efficacité et de durabilité des réseaux électriques du 21e siècle.

Depuis les années 2010, les systèmes de gestion de l'énergie ont pris une importance croissante pour accompagner la transition énergétique et la décarbonisation des réseaux électriques à l'échelle mondiale. L'accent est mis sur l'optimisation globale du fonctionnement de ces systèmes, en intégrant de manière intelligente la production, le stockage, la distribution et la consommation d'électricité. Les SGE jouent un rôle central dans cette coordination, afin de maximiser l'efficacité énergétique, de réduire les émissions de carbone et de garantir la fiabilité de l'approvisionnement.

Au cours de la dernière décennie, l'utilisation des technologies d'IA a fortement renforcé les capacités des SGE. Les algorithmes d'apprentissage automatique permettent désormais une prédiction plus précise de la demande et de la production d'énergies renouvelables variables. Des techniques d'optimisation avancées basées sur l'IA optimisent en temps réel l'équilibre offre-demande, en coordonnant les différentes ressources énergétiques du système. De plus, les systèmes de prise de décision intelligents, s'appuyant sur l'analyse de grandes quantités de données, améliorent la gestion dynamique des réseaux électriques et la réponse aux aléas. Ainsi, l'apport de l'IA a permis aux SGE de devenir des outils essentiels pour relever les défis de flexibilité, de résilience et de durabilité des systèmes électriques du 21e siècle [36].

2.3 Définition

Un système de gestion de l'énergie est un ensemble intégré de matériel et de logiciel conçu pour surveiller, contrôler et optimiser la consommation d'énergie d'un bâtiment, d'une installation ou d'une entreprise. Il est composé généralement de capteurs, de contrôleurs et d'algorithmes qui collectent, analysent et exploitent les données de consommation d'énergie. Il permet de visualiser les données, d'identifier les gisements d'économies d'énergie et de mettre en œuvre des mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique. Ainsi, le SGE est un outil essentiel pour la gestion proactive et efficace de l'énergie.

La gestion de l'énergie implique la surveillance, le contrôle et l'optimisation de la consommation d'énergie au sein d'une installation. Ce processus englobe la collecte et l'analyse des données énergétiques, l'identification des opportunités d'économies d'énergie et la mise en œuvre de mesures pratiques pour les réaliser. En réduisant les coûts énergétiques et l'impact environnemental, la gestion de l'énergie établit une cartographie des flux d'énergie, suit et analyse les données de consommation, et prend des décisions éclairées pour atteindre des résultats de gestion souhaitée.

Les SGE sont essentiels pour rationaliser la consommation d'énergie et réduire les coûts associés. Ils permettent un suivi et une régulation précise de l'utilisation de l'énergie grâce à l'application de technologies avancées, assurant ainsi une compréhension approfondie des modèles de consommation et facilitant l'identification des opportunités d'économies d'énergie [27].

2.4 Architecture d'un SGE

L'architecture d'un système de gestion d'énergie, c'est-à-dire sa structure générale, englobant ainsi les composants et dispositifs le constituant, est un élément essentiel à considérer pour assurer un fonctionnement correct, optimal et l'accomplissement idéal de son rôle. On y distingue trois parties principales résumées dans le schéma suivant :

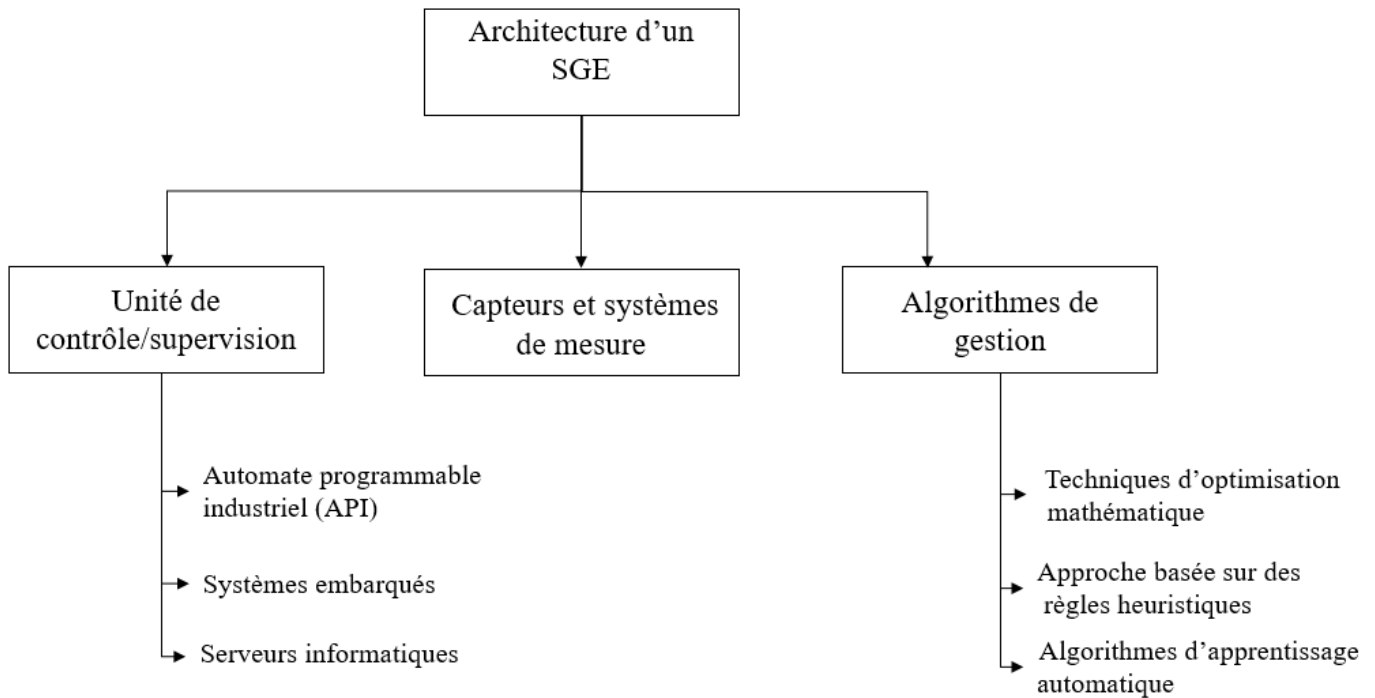


FIGURE 2.1 – Architecture d'un SGE

Une compréhension approfondie de cette architecture permet de mieux appréhender les défis et dysfonctionnement que l'on peut rencontrer dans ce genre de système, ainsi assurer des solutions efficaces pour y faire face.

2.4.1 Unité de contrôle/supervision

Au cœur d'un SGE, on trouve l'unité de contrôle et de supervision, elle joue un rôle essentielle en étant responsable de la prise des décisions éclairées et à la gestion dynamique du système énergétique hybride. Cette unité assure le bon fonctionnement et vise à atteindre des objectifs bien définis.

Elle peut prendre plusieurs formes en fonction des besoins spécifiques [38, 39] :

-Automate programmable industriel : Il est conçu pour fonctionner dans des environnements complexes, son plus grand avantage est sa fiabilité et sa robustesse. Les multiples entrées et sorties de l'API lui permet de recevoir de diverses informations des capteurs et des actionneurs pour répondre aux exigences des systèmes de contrôle industriels avec assurance.

-Systèmes embarqués, tels que le Raspberry Pi ou l'Arduino : Ces dispositifs constituent des solutions adaptées aux applications de taille modeste. Ils offrent des réponses à la fois performantes, pratiques et fiables, convenant particulièrement bien aux projets de moindre envergure ne nécessitant pas des infrastructures trop conséquentes.

-Serveurs informatiques : Ils représentent une forme d'implémentation des unités de contrôle. Ils sont souvent utilisés pour les algorithmes complexes car leurs puissance de calcul est d'analyse très élevée.

Peu importe le choix de l'implémentation matérielle, l'unité centrale de contrôle est programmée pour appliquer méticuleusement les algorithmes nécessaires à la gestion adéquate du système, ce qui permet d'optimiser les performances globales du système hybride.

2.4.2 Capteurs et systèmes de mesure

Les capteurs et systèmes de mesure sont d'une importance cruciale dans chaque système de gestion d'énergie. Ils sont responsable de la collecte en temps réel des différentes données et grandeurs caractéristiques du système.

On distingue principalement quatre types de données [39] :

- Données sur la production des sources d'énergie (puissance, tension, courant, etc).
- Données sur l'état de charge et puissance des systèmes de stockage.
- Données sur la consommation des charges électriques.
- Données sur les différentes grandeurs du réseau tel que la tension, fréquence et autres grandeurs.

Une fois obtenues, ces informations sont acheminées à l'unité de contrôle, assurant ainsi un contrôle et une régulation en temps réel des sorties du système. Les capteurs utilisent généralement des protocoles de communication standardisés (Modbus, CAN bus, etc.) pour transmettre les données.

2.4.3 Algorithmes de gestion et de prise de décision

Si l'unité de contrôle est le cœur d'un SGE, les algorithmes de gestion sont son cerveau, leur rôle est de traiter, coordonner le fonctionnement du système d'énergie contrôlé par le SGE en fonction des objectifs définis au préalable [40].

Ils peuvent inclure différentes approches, tel que [41, 42, 43] :

- Approche basée sur les techniques d'optimisation mathématique : Cette approche utilise des méthodes d'optimisation mathématique avancées, telles que la programmation linéaire, quadratique, mixte en nombres entiers, etc. Elle permet d'assurer un fonctionnement optimal du système électrique selon des consignes et objectifs prédéfinis, tout en prenant en compte les contraintes techniques du système.

- Approche basée sur des règles heuristiques : C'est une approche algorithmique de gestion et de contrôle en temps réel des systèmes hybrides d'énergie. Elle se caractérise par l'utilisation d'un organigramme de décision dans lequel sont codifiées un ensemble de règles de fonctionnement prédéfinies.

- Algorithmes d'apprentissage automatique : Les SGE peuvent également utiliser des algorithmes d'apprentissage automatique avancés, tels que l'apprentissage par renforcement et les réseaux de neurones artificiels. Ces techniques permettent d'optimiser le fonctionnement du système de manière autonome, en apprenant des patterns dans les données de production, de consommation et de marché de l'électricité. Elles peuvent ainsi améliorer la prise de décision et l'adaptation du système aux conditions variables.

Ces algorithmes prennent en compte les données collectées par les capteurs, les prévisions disponibles (production, consommation, etc.) et les contraintes du système pour déterminer les consignes optimales à appliquer aux différents composants.

2.5 Niveaux de contrôle et d'optimisation

Les SGE intègrent différents niveaux de contrôle et d'optimisation afin d'assurer une gestion efficace et durable du système énergétique hybride.

2.5.1 Contrôle en temps réel

Le contrôle en temps réel est une composante essentielle d'un système de gestion de l'énergie. Il permet la gestion et l'ajustement instantané des flux d'énergie entre les différents composants du système hybride. Cette capacité à réagir rapidement et efficacement aux changements dans le système est importante pour atteindre plusieurs objectifs clés [38].

Maintenir la stabilité du système : Le contrôle en temps réel permet de maintenir la stabilité du système en ajustant les paramètres tels que la fréquence et la tension. Cela est essentiel pour assurer le bon fonctionnement du système et prévenir les pannes ou les dysfonctionnements.

Assurer l'équilibre production-consommation : Le contrôle en temps réel permet également d'assurer l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie. Cela est crucial pour éviter les surcharges ou les pénuries d'énergie.

Garantir la qualité de l'énergie : ce contrôle permet de garantir la qualité de l'énergie en surveillant des paramètres tels que le taux de distorsion harmonique.

Réagir aux variations de la demande et de la production renouvelable : Le contrôle en temps réel permet de réagir rapidement aux variations de la demande d'énergie et de la production d'énergie renouvelable. Cela permet d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques et de minimiser les coûts.

La fréquence de mise à jour du contrôle en temps réel est généralement de l'ordre de la seconde à la minute. Cela permet une réaction rapide aux changements dans le système.

2.5.2 Gestion à court terme (jour, semaine)

La gestion à court terme, sur un horizon allant du jour à la semaine, est une composante essentielle des SGE. Elle vise à optimiser le fonctionnement du système d'énergie en temps quasi-réel, en tenant compte des prévisions à court terme de production, de consommation et des conditions du marché de l'électricité.

Ce type de gestion a plusieurs objectifs principaux et ce afin d'assurer un fonctionnement optimal du système. Tout d'abord, il s'agit de minimiser les coûts d'exploitation du système hybride, notamment les coûts liés à l'achat et à la vente d'électricité sur le marché, ainsi que les coûts de maintenance des différents composants. Ensuite, l'optimisation vise à maximiser l'autoconsommation de l'énergie produite localement par les sources renouvelables, afin de réduire les achats sur le réseau et d'améliorer l'autonomie énergétique du système. Enfin, un autre objectif majeur est de diminuer les émissions de CO₂ associées à la production d'électricité, contribuant ainsi à une transition énergétique plus durable.

Pour atteindre ces objectifs d'optimisation, les SGE intègrent des prévisions à court terme sur plusieurs paramètres clés. Tout d'abord, les prévisions de production des sources d'énergie renouvelables, comme le solaire et l'éolien, permettent d'anticiper les variations de la production locale. Ensuite, les profils de consommation des charges sont également pris en compte afin de mieux estimer les besoins énergétiques du système. Enfin, les prix du marché de l'électricité, qui fluctuent de manière dynamique, sont intégrés dans l'optimisation pour déterminer les meilleures stratégies d'achat et de vente [41, 42].

2.5.3 Planification à moyen/long terme

L'élaboration d'une stratégie de planification à moyen et à long terme est aussi importante pour optimiser la configuration et les dimensions des composants des systèmes hybrides [40]. Cela inclut la poursuite de plusieurs objectifs principaux [36] :

- Il est vital de maximiser le rendement total du système sur l'ensemble de son cycle de vie pour assurer une utilisation efficace et durable de l'énergie. Par ailleurs, il est impératif de réduire au minimum les coûts liés à l'investissement initial et aux opérations quotidiennes du système, ce qui contribue directement à la viabilité économique du projet.

-L'intégration des sources d'énergie renouvelables doit être effectuée de manière optimale pour profiter de leurs avantages environnementaux sans compromettre la performance globale du système.

-Pour actualiser efficacement cette planification, il convient de prendre en compte un large éventail de données, y compris les informations historiques ainsi que les prévisions concernant divers facteurs ayant une influence significative sur le système. Cela implique d'examiner les tendances concernant la demande en énergie et les fluctuations des prix, tout en gardant un œil attentif sur les changements technologiques et réglementaires susceptibles d'affecter le secteur.

Ces différents niveaux de contrôle et d'optimisation sont étroitement liés et interactifs au sein du SGE, permettant une gestion optimisée du système hybride à différentes échelles de temps.

2.6 Structure des SGE

Les SGE peuvent être organisés de diverses façons afin de satisfaire les exigences particulières de chaque système. La structure de gestion centralisée, la structure de gestion décentralisée et la structure de gestion hybride sont les trois types de structures que l'on peut observer dans les SGE.

2.6.1 Structure de gestion centralisée

Dans le cadre d'une configuration de contrôle centralisé, un contrôleur central joue un rôle crucial. Il est chargé de définir les valeurs de référence que les contrôleurs locaux doivent suivre. Pour se faire, il se base sur une multitude d'informations collectées à travers l'ensemble du système. Ces informations peuvent inclure les tensions, les puissances, l'état de charge des

batteries, entre autres. Le contrôleur central prend également en compte les contraintes de fonctionnement et les objectifs globaux du système. Ces objectifs peuvent viser la réduction des coûts, la prolongation de la durée de vie du système, ou d'autres buts similaires [44].

Le tableau suivant regroupe les principaux avantages et inconvénients de ce type de configuration :

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients d'un système centralisé

Avantages	Inconvénients
-Optimisation globale du système pour atteindre des objectifs d'ensemble	-Point de défaillance unique, risquant d'impacter tout le système en cas de panne
-Prise de décision centralisée permettant une coordination efficace	-Besoin de communications fiables entre l'unité centrale et les sous-systèmes
-Gestion simplifiée des interactions entre les différents composants	-Complexité de mise en œuvre pour des systèmes de grande taille

La figure ci-dessous illustre le fonctionnement de cette architecture :

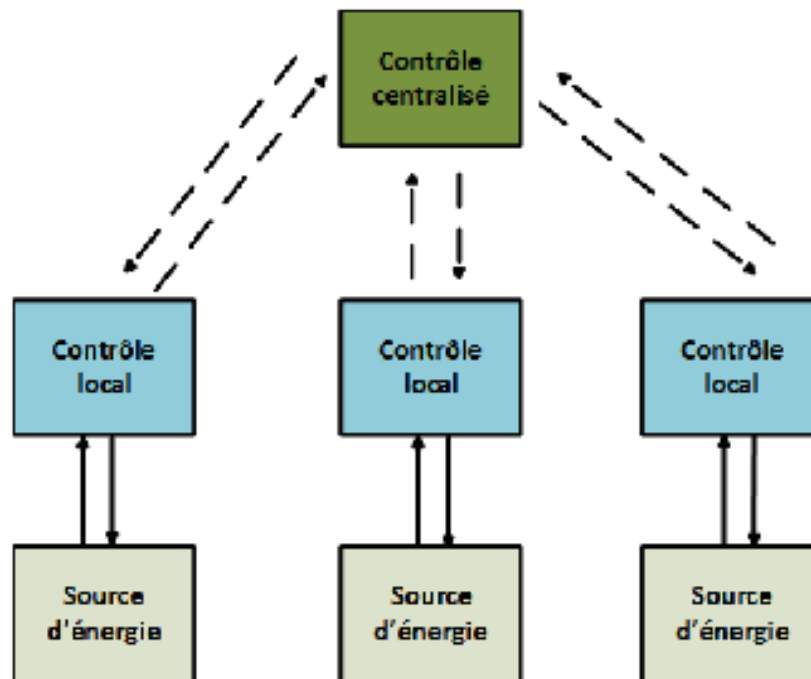


FIGURE 2.2 – Architecture du contrôle centralisé [45].

2.6.2 Structure de gestion décentralisée

Aussi connue sous le nom de système multi-agents, la gestion décentralisée est une approche où les décisions sont prises au niveau de chaque contrôleur local en prenant en compte les informations provenant des autres contrôleurs locaux ainsi que de la charge dans le système. Cette approche est bien adaptée aux micro-réseaux où les générateurs sont la propriété de différentes personnes, rendant la prise de décisions centralisées difficile ou non-optimale pour un individu.

Dans ce système, les contrôleurs centraux des micro-réseaux sont en communication non seulement avec le gestionnaire du réseau de distribution, mais également entre eux. Ils peuvent ainsi interagir, échanger des informations concernant la demande et l'offre d'énergie électrique en temps réel et prendre des décisions concernant l'échange d'énergie électrique entre eux. Chaque contrôleur, qu'il soit central ou local, est souvent appelé "agent", et l'ensemble constitue un système multi-agents dans lequel ils échangent entre eux différentes informations concernant les différentes grandeurs du réseau et même des données prévisionnelles [46].

Le tableau suivant regroupe les principaux avantages et inconvénients de ce type de configuration :

TABLE 2.2 – Avantages et inconvénients d'un système décentralisé

Avantages	Inconvénients
-Flexibilité et facilité d'évolution du système	-Coordination et optimisation globale plus complexes à mettre en œuvre
-Robustesse accrue grâce à l'absence de point de défaillance unique	-Nécessité de communications fiables entre les sous-systèmes
-Prise de décision locale adaptée aux spécificités de chaque sous-système	-Gestion des interactions et des conflits potentiels entre les sous-systèmes

La figure ci-après illustre le fonctionnement de cette architecture :

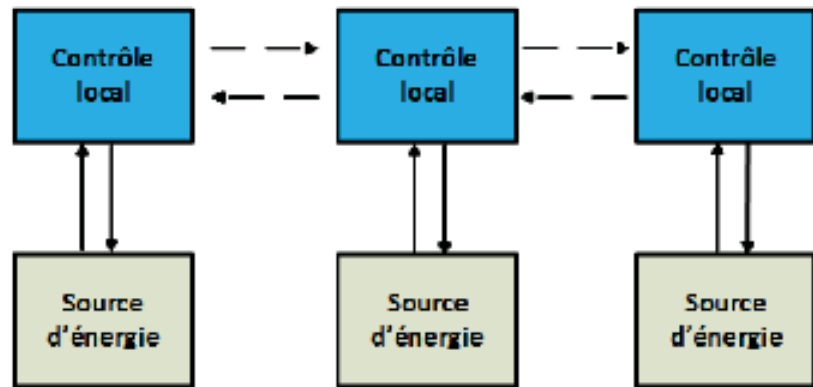


FIGURE 2.3 – Architecture du contrôle décentralisé [45].

2.6.3 Structure de gestion hybride

L'architecture de contrôle hybride combine les éléments des architectures décentralisée et centralisée. Elle intègre des communications horizontales pour le contrôle décentralisé, ainsi que des communications verticales pour le contrôle centralisé. Ainsi, chaque SHER (Système Hybride d'Énergie Renouvelables) fonctionne de manière optimale grâce au contrôle centralisé, et la coordination globale est maintenue par le contrôle décentralisé [45].

Le tableau suivant regroupe les principaux avantages et inconvénient de ce type de configuration :

TABLE 2.3 – Avantages et inconvénients de l'architecture de contrôle hybride

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Optimisation locale et globale du système - Meilleure fiabilité et tolérance aux pannes - Flexibilité et évolutivité du système 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexité accrue de mise en œuvre - Exigences élevées en matière de communication - Risque de cohérence des décisions entre niveaux local et global

La figure ci-dessous représente la structure de cette architecture :

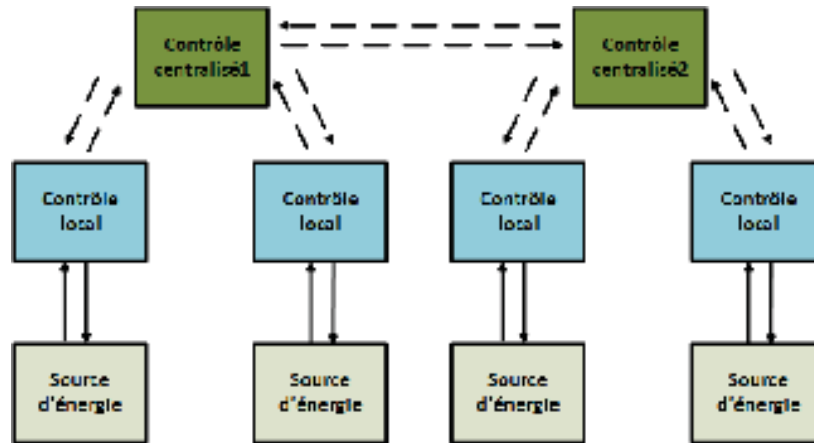


FIGURE 2.4 – Architecture du contrôle hybride.

2.7 Intégration des énergies renouvelables et du stockage

L'intégration optimale des sources d'énergie renouvelable dans le réseau électrique représente un défi majeur à l'heure actuelle. Alors que les énergies renouvelables telles que le solaire et l'éolien offrent d'énormes avantages en termes de durabilité et de réduction des émissions, leur production présente une variabilité importante et imprévisible. Cette variabilité pose des défis significatifs pour l'équilibrage du réseau électrique, la stabilité du système et la qualité de l'énergie électrique. Pour relever ces défis, le SGE joue un rôle essentiel en prévoyant la production renouvelable, en coordonnant les systèmes de stockage d'énergie, en gérant en temps réel les flux d'énergie, en optimisant le fonctionnement global du système hybride et en mettant en place des interfaces intelligentes avec le réseau électrique.

2.7.1 Défis liés à la variabilité de la production

L'intégration efficace de ces sources d'énergie renouvelable dans le réseau électrique pose des défis spécifiques en raison de la variabilité de leur production.

Fluctuations de la production

Les énergies renouvelables comme le solaire dépendent fortement des conditions météorologiques, qui peuvent varier de manière importante et imprévisible. Par exemple, la production solaire dépend étroitement de la couverture nuageuse, qui peut évoluer rapidement

et de façon imprévisible. Ces variations imprévues de la production peuvent poser des défis pour l'équilibrage du réseau électrique et la planification de la production [40].

Risque de déséquilibre production-consommation

Lorsque la production des énergies renouvelables varie de manière importante et rapide, il peut devenir difficile de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Ce déséquilibre peut menacer la stabilité du réseau électrique, car une trop forte différence entre la production et la consommation peut entraîner des variations de fréquence et de tension, pouvant aller jusqu'à des pannes. Cette variabilité pose des défis pour le maintien de la qualité de l'énergie électrique, notamment en termes de fréquence, de tension et d'harmoniques. Des variations excessives de fréquence peuvent endommager les équipements électriques sensibles. De même, des fluctuations de tension importantes peuvent entraîner des dysfonctionnements des appareils. Pour garantir une alimentation électrique fiable, il est essentiel de mettre en œuvre des systèmes de régulation et de contrôle [39].

Cependant, la variabilité des énergies renouvelables rend ce défi plus complexe. Les systèmes de régulation doivent être conçus pour s'adapter aux fluctuations rapides de la production, tout en maintenant la qualité de l'énergie dans des limites acceptables. Cela nécessite des solutions innovantes et des investissements supplémentaires pour garantir une alimentation électrique stable et de haute qualité.

2.7.2 Rôle du SGE pour l'intégration optimale

Les SGE sont des systèmes complexes conçus pour optimiser de manière intégrée et intelligente la production, la distribution et la consommation d'électricité. Leurs principales fonctions sont les suivantes :

Collecte et analyse des données énergétiques

Les SGE jouent un rôle crucial dans la collecte et l'analyse des données énergétiques. Ils acquièrent en temps réel les mesures de consommation, de production et de qualité de l'énergie grâce à un réseau de capteurs et de compteurs intelligents répartis sur le système électrique. Ces données sont ensuite traitées et analysées pour identifier les tendances, les inefficacités et les opportunités d'optimisation. Cette collecte et cette analyse de données permettent aux SGE d'avoir une vision globale et détaillée du fonctionnement du système énergétique [47].

Gestion et contrôle des flux d'énergie

Les SGE assurent la gestion et le contrôle des flux d'énergie sur l'ensemble du système électrique. Ils régulent les différentes sources de production, en ajustant en temps réel la production des centrales électriques, des unités de cogénération et des installations renouvelables. Ils équilibrent également la demande et l'offre d'électricité, en coordonnant l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie pour absorber les excédents de production et combler les déficits [45].

Prise de décision et planification

Les SGE jouent un rôle essentiel dans la prise de décision et la planification des systèmes énergétiques. Ils s'appuient sur des modèles de prévision de la demande énergétique à court, moyen et long terme, tenant compte des tendances de consommation, des conditions météorologiques et des évolutions des usages. Cette prévision permet de planifier de manière optimale la production et l'approvisionnement en énergie. Les SGE fournissent également une aide à la décision pour les investissements dans de nouvelles capacités de production ou de stockage, ainsi que pour la maintenance du système électrique [48].

Amélioration de l'efficacité énergétique

Les SGE jouent un rôle clé dans l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes électriques. Grâce à leurs capacités de détection et de gestion des charges et des pics de consommation, ils permettent d'optimiser l'utilisation de l'énergie. Ils contrôlent et optimisent également la consommation des bâtiments et des processus industriels, réduisant ainsi les pertes et la facture énergétique. Cette amélioration de l'efficacité énergétique contribue à la durabilité et à la compétitivité des systèmes électriques [49].

Intégration des énergies renouvelables

Les SGE jouent un rôle essentiel dans l'intégration optimale des énergies renouvelables variables et intermittentes au sein des réseaux électriques. Ils gèrent la production fluctuante des sources renouvelables, en la coordonnant avec les systèmes de stockage d'énergie pour assurer la flexibilité du réseau. Les SGE favorisent également le développement de l'autoproduction et de l'autoconsommation d'électricité verte, permettant ainsi une meilleure intégration des énergies renouvelables à l'échelle locale. Cette intégration optimale des ressources renouvelables est un enjeu majeur pour la transition énergétique [50].

2.8 Normes relatives aux SGE

La mise en place de normes est essentielle pour standardiser et harmoniser les pratiques au sein des organisations. Elles permettent de définir des exigences et des lignes directrices communes, ce qui favorise l'interopérabilité, la qualité et la sécurité. Plusieurs normes internationales ont été créées dans le domaine des SGE afin de réguler les meilleures pratiques et de faciliter l'amélioration continue des performances énergétiques. Voici quelques normes essentielles dans ce domaine [52].

2.8.1 Normes ISO 50001

La norme ISO 50001 est élaborée et publiée par l'Organisation Internationale de Normalisation (en anglais ISO : International Organization for Standardization), qui établit de nombreuses normes pour les entreprises. Cette norme vise à définir un cadre international pour la gestion de la consommation d'énergie par les organisations.

Elle spécifie les exigences pour établir, mettre en œuvre, maintenir et améliorer un SGE. Son objectif est de permettre à une organisation de suivre une approche systématique pour améliorer continuellement les performances énergétiques [51].

2.8.2 IEC 61850

Est une référence essentielle pour la communication et l'automatisation des sous-stations électriques. Elle définit des protocoles de communication Ethernet et IP standardisés, permettant l'interopérabilité entre les différents équipements d'automatisation, de contrôle et de surveillance des réseaux électriques. Cette norme spécifie des modèles de données et des mécanismes de communication temps-réel, facilitant l'intégration de systèmes hétérogènes au sein des sous-stations. IEC 61850 vise à assurer la fiabilité, l'efficacité et la flexibilité des systèmes de gestion et de contrôle des infrastructures électriques.

2.8.3 IEEE 2030

La série de normes IEEE 2030 fournit un cadre de référence complet pour l'interopérabilité et l'intégration des technologies des réseaux électriques intelligents (smart grids). Cette série de standards couvre des domaines tels que l'électrification des véhicules, les microgrids et l'architecture générale des smart grids. IEEE 2030 a pour objectif d'assurer une intégration harmonieuse des systèmes de l'information et de la communication (TIC) aux infrastructures électriques, afin d'améliorer la fiabilité, l'efficacité et la durabilité du système énergétique

dans son ensemble. Cette approche normative joue un rôle essentiel pour le déploiement des réseaux électriques du futur [51].

2.9 conclusion

En conclusion, SGE s'affirment comme des outils incontournables pour relever les défis majeurs de la transition énergétique. Leur capacité à superviser, contrôler et optimiser le fonctionnement des systèmes électriques en fait des éléments clés pour assurer une gestion intelligente et durable des réseaux du futur.

Face à l'intégration croissante des énergies renouvelables variables et intermittentes, ainsi que du stockage d'énergie, les SGE jouent un rôle essentiel pour maintenir la stabilité et la fiabilité des réseaux. Grâce à leurs algorithmes de gestion avancés, ils permettent d'optimiser l'utilisation des différentes ressources énergétiques de manière coordonnée, minimisant les impacts de la variabilité de la production renouvelable.

Au-delà de la simple gestion opérationnelle, les SGE offrent également des fonctionnalités d'optimisation plus stratégique, visant à réduire les coûts, à améliorer l'efficacité énergétique et à favoriser l'intégration d'une part croissante d'énergies renouvelables. Leur capacité d'adaptation et d'apprentissage en fait des outils essentiels pour accompagner la transformation profonde des systèmes électriques.

Le chapitre suivant sera dédié à la présentation détaillée du modèle sélectionné pour les besoins de l'expérimentation. Cette étude approfondie du système choisi permettra d'en saisir les caractéristiques essentielles et de mieux appréhender les conditions dans lesquelles seront menées les investigations à venir.

Chapitre 3

Cas d'étude : Vue globale du système

3.1 Modèle d'étude

Pour cette étude, nous avons sélectionné un modèle préexistant constitué d'une charge RLC constante et d'une charge variable, qui sont alimentées par trois sources distinctes : un générateur photovoltaïque, un système de stockage d'énergie, ainsi que le réseau électrique conventionnel (voir figure 3.1). Ce modèle intègre également un système de calcul du prix de revenu par kilowatt-heure (kWh).

Il est conçu pour simuler SGE dans un micro-réseau, impliquant l'utilisation de deux algorithmes de supervision fonctionnant de manière distincte, grâce auxquels les divers blocs et dispositifs du modèle fonctionnent afin d'optimiser les coûts opérationnels, de réguler la fréquence et l'amplitude de la tension, de contrôler les flux d'énergie, et de maximiser l'exploitation des sources d'énergie renouvelables ainsi que du système de stockage d'énergie.

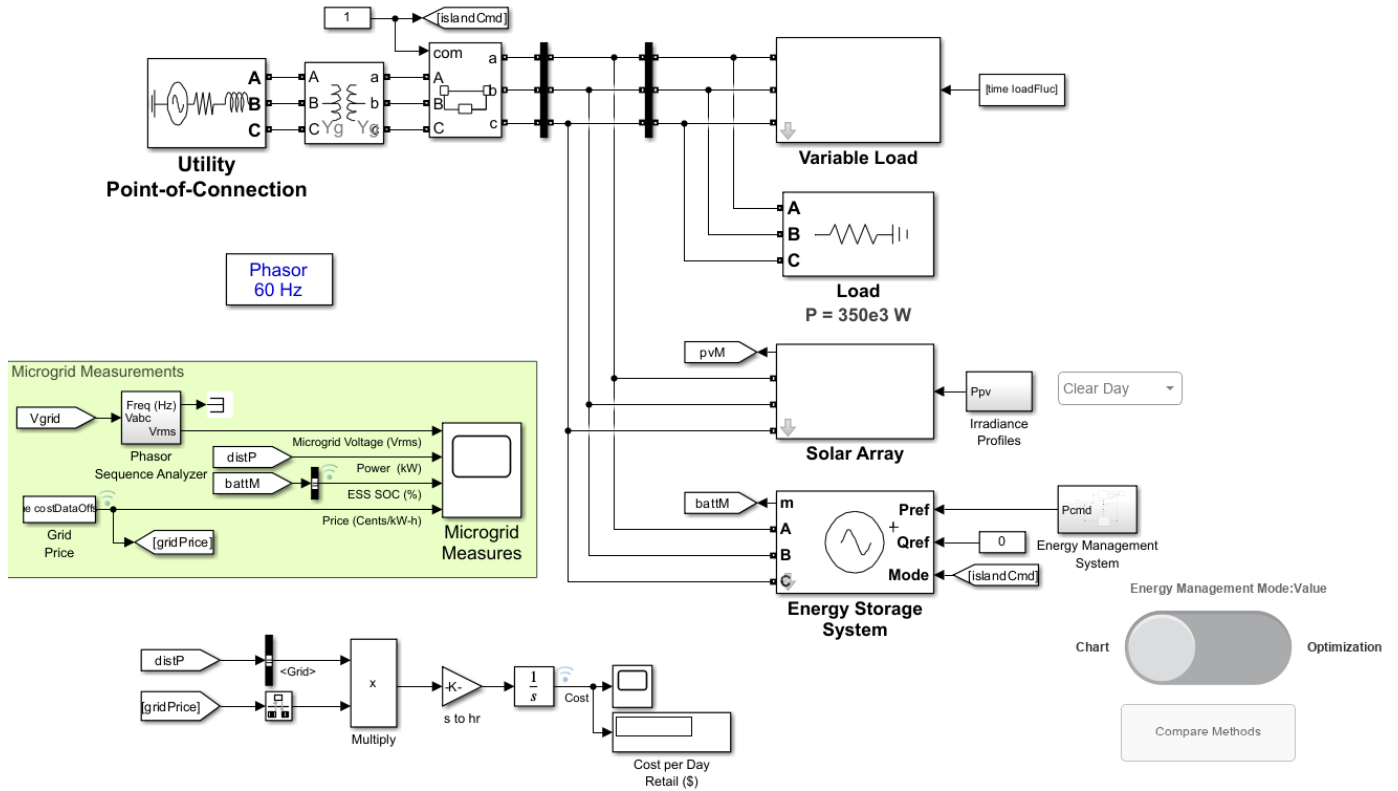


FIGURE 3.1 – Vue d'ensemble du modèle Simulink du système.

3.2 Détails du modèle

Comme mentionné précédemment, ce système est constitué de trois sources principales qui fournissent de l'énergie aux deux types de charges, à savoir les charges variables et constantes. Dans cette partie, nous allons examiner de plus près les valeurs spécifiques liées à chaque partie du modèle.

3.2.1 Générateur photovoltaïque

Dans ce système, le générateur photovoltaïque est la principale source d'énergie, en tandem avec le réseau électrique traditionnel. Durant les heures d'ensoleillement, il assure dans un premier temps l'alimentation des charges, puis en cas de surplus de production, selon le mode d'optimisation, il recharge le système de stockage ou bien revend ce surplus au réseau.

Le concepteur de ce modèle a prédéfini la surface occupée par les panneaux du générateur à $2500m^2$, avec un rendement électrique égale à **30%**.

3.2.2 Système de stockage d'énergie

Afin de supplier le générateur photovoltaïque et de diminuer l'usage du réseau électrique, ce modèle intègre un système de stockage par batteries. Ses grandeurs caractéristiques sont comme suit :

Capacité de stockage d'énergie

La "capacité de stockage" fait référence à la quantité maximale d'énergie électrique pouvant être stockée dans la batterie. Elle est généralement exprimée en kilowattheures (kWh) ou en joules (J). Plus la batterie peut stocker d'énergie et plus elle peut fournir d'énergie aux charges en période de faible production du générateur PV ou de demande élevée. Dans ce modèle elle est égale à **2500 kWh**.

Contraintes de puissance

Charge maximale

Elle correspond à la puissance maximale (en watts) que la batterie peut recevoir lorsqu'elle est chargée depuis une source d'énergie, telle que le générateur PV ou le réseau électrique. Dans l'exemple précédent, cette valeur est définie à **400 kW**.

Décharge maximale

Elle correspond à la puissance maximale (en watts) que la batterie peut fournir lorsqu'elle décharge de l'énergie vers les charges du système. Dans l'exemple précédent, cette valeur est définie à **-400 kW**.

Contraintes d'énergie

Charge maximale SOC_{max}

Elle fait référence à la puissance maximale à laquelle la batterie peut être chargée, c'est-à-dire la quantité maximale d'énergie pouvant être injectée dans la batterie depuis le générateur photovoltaïque (PV) ou le réseau électrique. Cela est généralement exprimé en watts (W) ou en kilowatts (kW). Dans cet exemple, elle est égale à **80%** de la capacité maximale de la batterie.

Décharge maximale SOC_{min}

De manière similaire, la charge minimale fait référence à la puissance minimale à laquelle la batterie peut être chargée, c'est-à-dire la quantité minimale d'énergie pouvant être injectée dans la batterie. Ici elle est prise à **20%** de la capacité maximale de la batterie.

État de charge initial

Cette grandeur n'est pas une grandeur commune, dans ce modèle elle représente l'état de remplissage de la batterie au moment du début de l'expérience, dans ce cas elle est égale à la moitié de la capacité maximale de la batterie.

3.2.3 Charges à alimenter

Les deux sources citées précédemment, s'allient avec les réseau d'électricité traditionnel et ce afin d'alimenter deux types des charges : Une charge **constante** et une charge **variable**.

Charge constante

Pour celle-ci, elle représente les différentes machines et dispositifs qui nécessitent une alimentation constante et ininterrompue tout au long de la journée, tel que des dispositifs de refroidissement (frigos, chambre froide..) ou bien des dispositif de sécurité (caméras de surveillance, systèmes de détection d'incendies..) et divers autres appareils exigeant une telle alimentation. Dans notre modèle, elle est modélisée via une charge RLC constante d'une valeur de **350kW**.

Charge variable

Ce type de charges quant à lui, modélise différents moteurs et machines qui ne fonctionnent pas constamment tout au long de la journée, tel que des chaines de production, des pompes à eau... etc

Dans le cas de notre modèle, cette charge passe d'un minimum de **-98,56kW** à un maximum de **277kW**.

NB : Le profile de l'évolution de la consommation de ces charges au fil de la journée sera détaillé dans le chapitre suivant.

3.2.4 Récapitulatif

Le tableau ci-après résume les différentes grandeurs liées au éléments du système :

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des grandeurs du système.

<i>Générateur Photovoltaïque</i>		
Surface totale :	2500 m²	
Rendement :	30%	
<i>Système de stockage par batteries</i>		
Capacité :	2500 kWh	
Puissances :	-400 kW	400 kW
Limite de décharge :	SOC_{min} = 20%	
Limite de charge :	SOC_{max} = 80%	
<i>Charges</i>		
Variable :	-98,56 kW	277 kW
Constante :	350 kW	

3.3 Modèle réel

Comme cité précédemment, le modèle choisi représente un système multi-sources d'électrification, constitué d'un générateur photovoltaïque, un système de stockage par batteries, et ce pour alimenter une charge RLC constante de **350kW** et une charge variable avec un profil prédéfini, relié également au réseau électrique traditionnel, le tout géré via un système de gestion d'énergie. La figure suivante résume les différents composant constituant ce modèle.

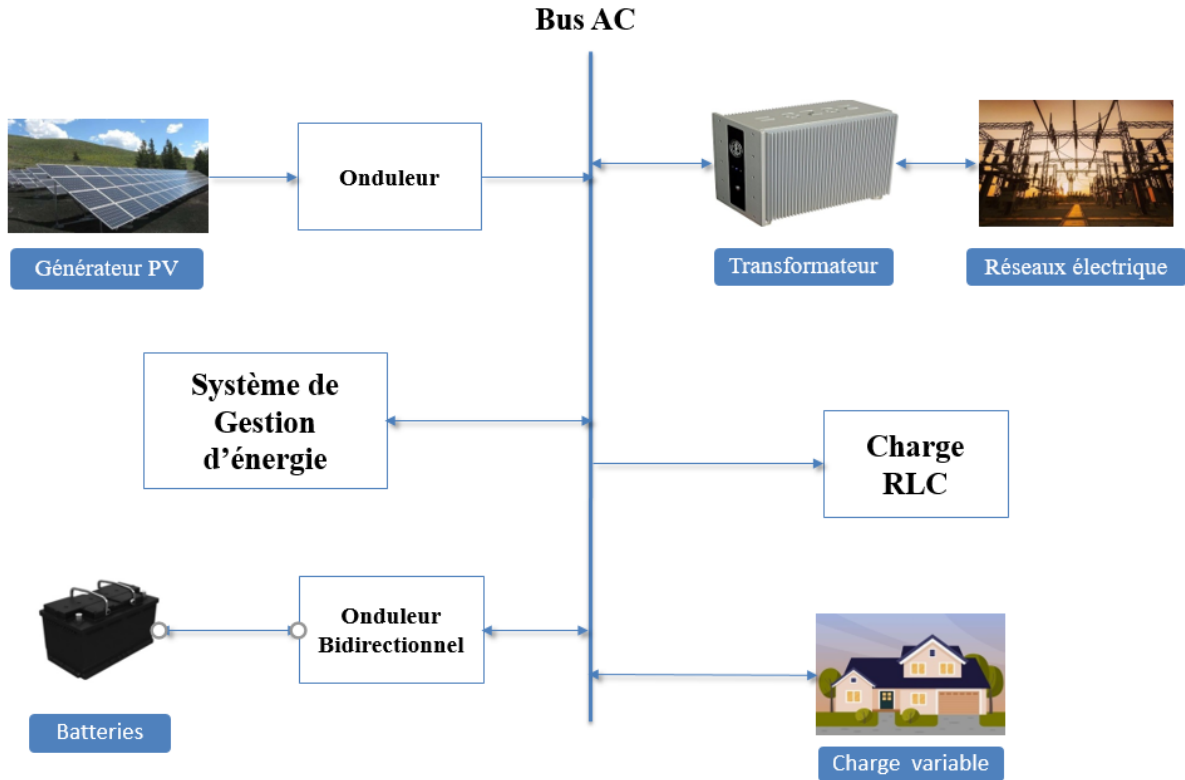


FIGURE 3.2 – Modèle réel du système.

3.4 Système de gestion de l'énergie

Pour synchroniser et gérer ces différentes sources d'énergie (réseau, générateur PV, batteries), un SGE est mis en place. Ce dernier intègre deux méthodes d'optimisation indépendantes l'une de l'autre, et ce afin d'assurer une utilisation efficace et coordonnée des ressources énergétiques, tout en visant à optimiser les coûts d'exploitation de cette installation. Le détail de ce bloc, les paramètres d'optimisation et des méthodes utilisées est donné dans la suite de ce point.

3.4.1 Bloc SGE

Ce bloc est responsable de la gestion globale de l'énergie dans le micro-réseau. Il prend en compte les prévisions de demande d'énergie, la production d'énergie à partir de sources renouvelables et les prix du marché pour assurer une gestion plus efficace et économique de l'énergie.

Le système de gestion de ce modèle est conçu pour prendre des décisions en temps réel sur la production et la consommation d'énergie en fonction du profil de charge (qui fluctue à cause de la charge variable), des disponibilités du soleil et de l'état de charge du système

de stockage. Il utilise des techniques d'optimisation pour résoudre un problème complexe d'affectation des ressources énergétiques, en prenant en compte les contraintes et les objectifs spécifiques à atteindre.

3.4.2 Paramètres d'optimisation

Ce bloc est régi via des paramètres d'optimisation prédéfinis qui sont comme suit :

Intervalle d'optimisation

C'est la fréquence à laquelle l'optimisation est effectuée. Dans ce cas, elle est définie à 5 minutes, ce qui signifie que toutes les **5 minutes**, le système recalculera les décisions de gestion de l'énergie en fonction des nouvelles données disponibles.

Horizon de prédiction

C'est la période sur laquelle les prévisions sont basées lors de l'optimisation. Dans ce cas, l'horizon de prédiction est défini à **20 heures**. Cela signifie que le système utilise les données actuelles ainsi que les prévisions pour les 20 prochaines heures pour prendre des décisions sur la gestion de l'énergie. Cela permet au système d'anticiper les variations de la production d'énergie solaire et de la demande d'électricité, ce qui est essentiel pour une gestion efficace de l'énergie dans un micro-réseau.

Le poids final sur le stockage d'énergie

Le poids final sur le stockage d'énergie, fixé ici à **1**, permet de contrôler l'équilibre entre deux objectifs principaux de l'optimisation dans le système de gestion d'énergie : d'une part, maximiser l'utilisation du système de stockage d'énergie (maxSSE), et d'autre part, minimiser le coût total de l'électricité prélevée sur le réseau (Prixttot).

Ce rapport, qu'on peut appeler β , est défini par l'équation suivante :

$$\beta = \frac{\text{maxSSE}}{\text{Prixttot}} \quad (3.1)$$

En fixant ce coefficient à 1, les deux objectifs ont donc une importance équivalente dans la recherche de la solution optimale. Un poids plus élevé favoriserait l'utilisation maximale de la batterie, même si cela pouvait augmenter légèrement le coût de l'électricité prélevée sur le réseau. Inversement, un poids plus faible mettrait davantage l'accent sur la minimisation du coût réseau, au détriment d'une utilisation optimale du stockage. En définissant le poids à 1, les deux objectifs sont traités avec une importance égale dans le processus d'optimisation.

3.4.3 Méthodes d'optimisation

Dans ce modèle, deux méthodes d'optimisation sont utilisées afin d'atteindre un rendement énergétique et tarifaire le plus efficace possible pour chaque scénario envisager

Méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques

Définition

Cette méthode dite en anglais "rule-based", est une approche algorithmique de gestion et de contrôle en temps réel des systèmes hybrides d'énergie. Elle se caractérise par l'utilisation d'un organigramme de décision dans lequel sont codifiées un ensemble de règles de fonctionnement prédéfinies. Ces règles déterminent les priorités et les modes d'utilisation des différents composants du système hybride (production, stockage, connexion réseau, etc.) en fonction des mesures et des prévisions disponibles. L'objectif est d'optimiser certains critères prédéfinis, comme la minimisation des coûts, la maximisation de l'autoconsommation ou la stabilité du réseau [52].

Principes clés

Cette type d'optimisation repose sur plusieurs règles et principes clés pour assurer son bon fonctionnement [52] :

- Organigramme de décision structuré : L'algorithme de gestion d'énergie s'appuie sur un organigramme détaillé qui séquence les différentes étapes de prise de décision. Cet organigramme permet de formaliser la logique de fonctionnement du système de manière claire et structurée.

- Règles de gestion prédéfinies : Ces règles, codées dans l'organigramme, définissent les conditions d'activation et les priorités d'utilisation des différents composants du système hybride (sources d'énergie, stockage, charges, etc.). Elles guident ainsi le système dans ses choix de fonctionnement.

- Optimisation simplifiée des objectifs : Les règles de gestion visent à optimiser de manière simplifiée certains objectifs clés, comme la maximisation de l'autosuffisance énergétique ou la minimisation des coûts. Cependant, cette approche ne garantit pas forcément l'optimalité globale du système.

- Implémentation informatique : L'organigramme et les règles de gestion sont généralement implémentés sous forme de code informatique au sein du SGE. Cela permet une mise en œuvre concrète et opérationnelle du système.

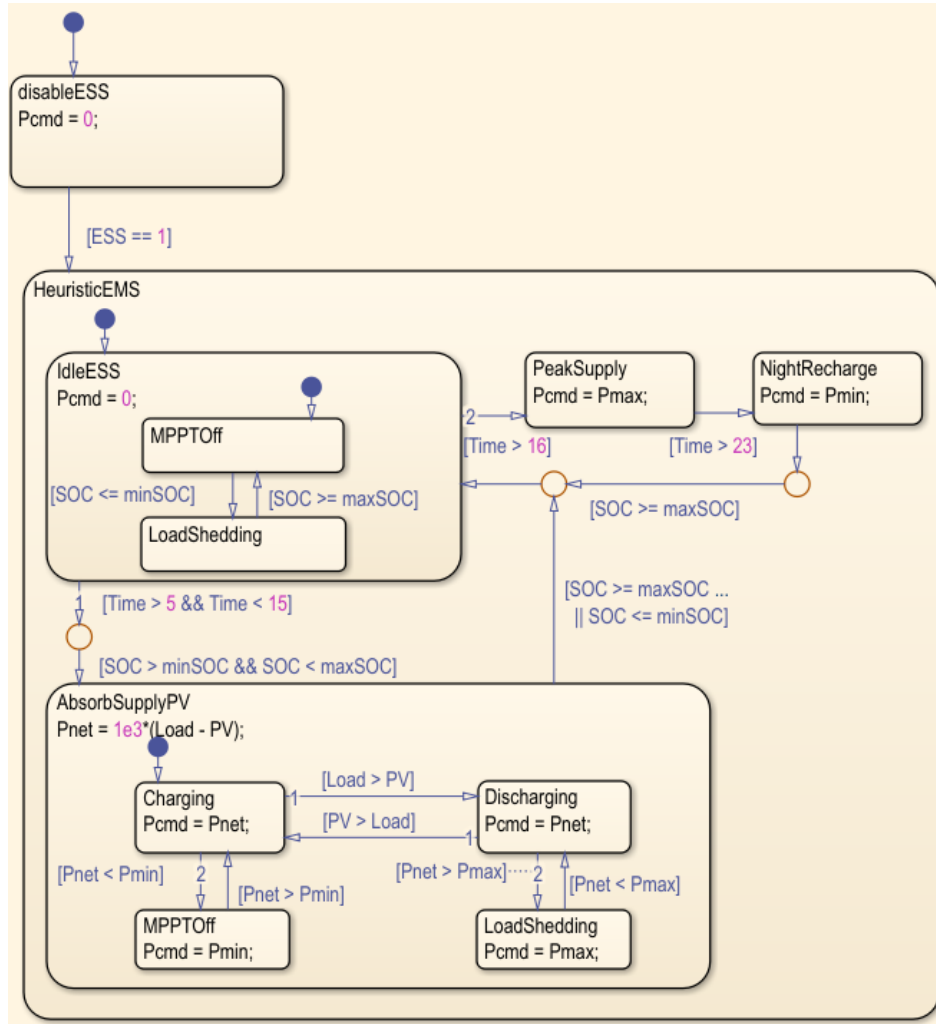


FIGURE 3.3 – Organigramme de décisions de la méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques.

Applications typiques

La méthode basée sur des règles heuristiques (dite en anglais Rule based optimization) est généralement utilisée pour la gestion de systèmes hybrides de petite et moyenne taille, tels que des microréseaux ou des systèmes de production décentralisée d'électricité. Cette approche permet une gestion en temps réel efficace, grâce à l'exécution rapide de l'organigramme de décision.

Cependant, elle reste limitée dans sa capacité d'adaptation aux situations complexes ou imprévues. Les règles de gestion prédéfinies, bien que robustes, peuvent avoir du mal à s'ajuster aux changements dynamiques des conditions de fonctionnement ou aux évolutions du système.

Ainsi, cette méthode s'avère généralement mieux adaptée aux applications de taille réduite, où la complexité du système reste relativement maîtrisable. Pour des systèmes plus importants ou évolutifs, d'autres approches d'optimisation plus avancées peuvent s'avérer nécessaires [53].

Avantages et inconvénients

Le tableau ci-après récapitule les principaux avantages et limites de l'approche d'optimisation basée sur des règles heuristiques [53] :

TABLE 3.2 – Avantages et limites de l'optimisation basé sur des règles heuristiques.

Avantages	Limites
Simplicité de mise en œuvre et de programmation	Capacité d'adaptation limitée aux situations complexes ou imprévues
Gestion en temps réel efficace grâce à l'exécution rapide de l'organigramme	Difficulté à garantir l'optimalité globale du système
Robustesse et fiabilité du fonctionnement du système hybride	Nécessité d'ajuster régulièrement les règles de gestion en fonction de l'évolution du système

Cas du modèle utilisé

Dans ce modèle simulink, cette méthode est utilisée afin d'optimiser le coût de revenu de l'électricité. Elle est donnée sous forme d'un organigramme de règles et de priorités prédéfinies. Cette méthode fonctionne selon les cinq règles suivantes :

-Priorité à l'utilisation du système de stockage d'énergie pour compenser la production PV :

Lorsque le générateur photovoltaïque commence à fournir de la puissance, le SSE est prioritairement utilisé pour absorber cette production excédentaire. Cette stratégie permet de limiter le recours au réseau électrique, évitant ainsi d'acheter de l'électricité auprès du réseau lorsque la production locale du GPV est suffisante. Le SSE joue donc un rôle clé dans cette phase pour optimiser l'utilisation des ressources locales et minimiser les coûts d'approvisionnement.

-Recharge du SSE avant revente au réseau :

Dans le cas où la production PV dépasse les besoins de la charge locale, la priorité est d'abord de recharger le SSE jusqu'à ce qu'il atteigne son état de charge maximal (SOCmax). Ce n'est qu'une fois que le SSE a été rechargé au maximum que l'éventuel surplus de production PV est alors revendu au réseau électrique. Cette logique permet de privilégier le stockage local de l'énergie pour une utilisation ultérieure, plutôt que de la revendre directement au réseau.

-Décharge du SSE en cas de baisse de la production PV :

Lorsque la production PV commence à décliner, le SSE est alors utilisé pour compenser cette baisse de production, en se déchargeant progressivement. Ce mécanisme de décharge du SSE se poursuit jusqu'à ce que son état de charge minimal (SOCmin) soit atteint. Ainsi, le SSE joue un rôle de tampon pour lisser les variations de la production PV et assurer une alimentation stable de la charge.

-Recours au réseau lorsque les sources locales sont épuisées :

Dans le cas où la production PV et le SSE ne peuvent plus alimenter la charge, le réseau électrique prend alors le relais pour assurer l'alimentation de la charge. Ce recours au réseau intervient lorsque les ressources locales (GPV et SSE) sont épuisées ou insuffisantes pour couvrir les besoins de la charge.

-Recharge du SSE pendant les périodes de prix bas du réseau :

Pendant les périodes de la nuit où le prix d'achat de l'électricité du réseau est particulièrement bas, le SSE est rechargé à partir du réseau. Cette stratégie permet de profiter des tarifs avantageux du réseau pour reconstituer les réserves du SSE, en vue de les utiliser de manière optimale les jours suivants.

Méthode d'optimisation linéaire

Définition

La programmation linéaire est une technique d'optimisation mathématique largement utilisée dans les SGE pour optimiser le fonctionnement des systèmes hybrides d'énergie. Cette méthode permet de résoudre des problèmes d'optimisation où les objectifs (minimisation des coûts, maximisation de l'autoconsommation, etc.) et les contraintes techniques du système (capacités des composants, équilibre production-consommation, etc.) sont linéaires par rapport aux variables de décision.

L'utilisation de la programmation linéaire dans les SGE offre plusieurs avantages. Elle garantit de trouver une solution optimale si elle existe, ce qui n'est pas toujours le cas avec des méthodes heuristiques. De plus, elle permet une certaine adaptabilité en permettant de remodeler rapidement les contraintes et objectifs face à des changements prévisibles dans les conditions de fonctionnement. Enfin, cette approche est bien adaptée aux systèmes de grande taille et complexes grâce à sa capacité à gérer de nombreuses variables et contraintes [54].

Principes clés

Modélisation linéaire : Les composants du système hybride (production, stockage, connexion réseau, etc.) sont modélisés par des équations linéaires qui reflètent leurs relations et leurs limitations.

Fonction objectif : Une fonction linéaire est définie pour représenter l'objectif à optimiser, comme la minimisation des coûts ou la maximisation de l'efficacité énergétique.

Solutions optimales : Les solutions sont trouvées en identifiant les valeurs qui maximisent ou minimisent la fonction objectif tout en respectant les contraintes du système.

Simplicité et efficacité : La résolution de problèmes linéaires est généralement plus simple et plus rapide que celle des problèmes non linéaires, ce qui permet une mise en œuvre efficace en temps réel [55].

Applications typiques

La méthode d'optimisation linéaire est souvent utilisée dans la planification et l'opération de grands systèmes énergétiques où les relations entre les composants peuvent être approximées par des fonctions linéaires. Elle est idéale pour les situations où les paramètres du système et les conditions de fonctionnement sont bien connus et peu susceptibles de changer brusquement [54].

Avantages et limites

Les avantages et limites de l'optimisation linéaire pour la gestion d'énergie sont résumés par le tableau suivant [54] :

TABLE 3.3 – Avantages et limites de l'optimisation linéaire.

Avantages	Limitations
Optimalité garantie : Contrairement à la méthode "rule-based", l'optimisation linéaire garantit de trouver une solution optimale si elle existe.	Prérequis linéaires : Elle nécessite que les relations entre les composants du système soient linéaires, ce qui n'est pas toujours le cas dans les systèmes réels.
Adaptabilité : Elle peut s'adapter à des changements prévisibles dans les conditions de fonctionnement grâce à la re-modélisation rapide des contraintes et objectifs.	Moins robuste face aux imprévus : Les modèles linéaires peuvent ne pas bien gérer les événements imprévus ou les changements soudains dans les conditions de fonctionnement.
Évolutivité : Cette méthode est bien adaptée aux systèmes de grande taille et complexes grâce à sa capacité à gérer de nombreuses variables et contraintes.	

Cas du modèle utilisé

Cette méthode a aussi pour but d'optimiser le coût de l'électricité utilisées par les charges connectées à ce micro-réseau. Elle est donc basée sur un algorithme qui prédéfinit les paramètres et les règles de l'optimisation.

Cette méthode quant à elle, elle fonctionne selon trois principes :

-Recharge du SSE pendant les périodes de prix bas du réseau :

La méthode d'optimisation mise en place privilégie la recharge de l'ESS lorsque le prix d'achat de la puissance du réseau électrique est minimal, généralement pendant les heures de la nuit. Cette stratégie permet de tirer parti des tarifs avantageux proposés par le réseau pendant ces périodes creuses de la consommation. En profitant de ces prix bas, le système peut reconstituer efficacement les réserves du SSE, en vue de les utiliser de manière optimale les jours suivants, notamment lors des périodes de prix élevés.

-Injection du surplus PV au réseau en milieu de journée :

Pendant les heures de la journée où la production du générateur photovoltaïque est supérieure aux besoins de la charge locale, le surplus de cette production électrique est injecté sur le réseau électrique afin d'y être revendu. Cette approche permet de valoriser au mieux cette production PV excédentaire, plutôt que de la stocker dans SSE lorsque celui-ci est déjà plein. Ainsi, le système optimise l'utilisation des différentes sources d'énergie disponibles en fonction des conditions du moment.

-Utilisation du SSE pendant les heures de pointe de consommation :

Lors des heures de la journée correspondant aux pics de consommation, où le prix de l'énergie du réseau électrique est particulièrement élevé, le système fait appel au SSE pour diminuer considérablement l'énergie consommée depuis le réseau. Cette utilisation stratégique du SSE pendant ces périodes de prix élevés permet de réduire significativement les coûts d'approvisionnement en électricité. Le système tire ainsi parti des capacités de stockage du SSE pour optimiser ses achats sur le réseau en fonction des conditions tarifaires.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble du système énergétique hybride étudié, composé d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage d'énergie et d'un système de gestion de l'énergie.

Le modèle détaillé du système a été décrit, incluant les caractéristiques du générateur photovoltaïque et du système de stockage. Les différents paramètres d'optimisation du système de gestion de l'énergie ont également été présentés, tels que l'intervalle d'optimisation, l'horizon de prédiction et le poids accordé au stockage d'énergie.

Deux méthodes d'optimisation ont été implémentées pour le système de gestion de l'énergie : une approche basée sur des règles heuristiques et une méthode d'optimisation linéaire. Ces deux approches seront évaluées et comparées dans les chapitres suivants afin de déterminer la stratégie de gestion la plus performante pour ce système hybride.

L'analyse approfondie de ce cas d'étude permettra de mieux comprendre les défis liés à l'intégration des énergies renouvelables variables et du stockage d'énergie, ainsi que les bénéfices apportés par un système de gestion énergétique avancé. Les résultats de cette étude pourront être utilisés pour guider la conception et l'optimisation de systèmes énergétiques hybrides similaires.

Chapitre 4

Effet des facteurs d'influence sur le système multi-sources

4.1 Introduction

Les composantes d'un système multi-sources peuvent varier selon plusieurs critères cruciaux tel que le budget assigné au projet, les infrastructures disponibles, l'espace que peut occuper l'installation, la topographie des lieux et les spécificités météorologiques du site. Dans ce chapitre, on verra l'impact de la variation de certains de ces facteurs sur les coûts d'exploitation du système, notamment :

- Les méthodes d'optimisation utilisées.
- Les conditions météorologiques.
- Le nombre de panneaux utilisés.
- Le rendement photovoltaïque des panneaux.
- La capacité du SSE.

La comparaison entre ces différents paramètres se fera sur la base du prix total de revenu en fin de journée, grandeur donnée en dollars américain, étant donné que le modèle du réseau simulé se base sur le modèle du réseau électrique américain.

Mais avant cela, on présentera le profil de puissance des charges à alimenter, qui avec les différentes sources, sont connectées à un micro-réseau ainsi que l'évolution du prix de revenu du kWh puisé depuis le réseau électrique au long de la durée de l'expérimentation.

4.2 Analyse des constantes

4.2.1 Profil de charge

La charge totale alimenté par cette installation est divisée en deux composantes. On trouve une charge constante d'une valeur de **350kW** qui matérialise des équipements qui fonctionnent en continu. On trouve aussi, une charge variable, dont le profil sera détaillé dans ce point, et qui représente les équipements qui fonctionnent de manière intermittente tel que des machines de production ou d'autres dispositifs électriques.

La courbe suivante représente la puissance demandée par la charge variable en fonction du temps.

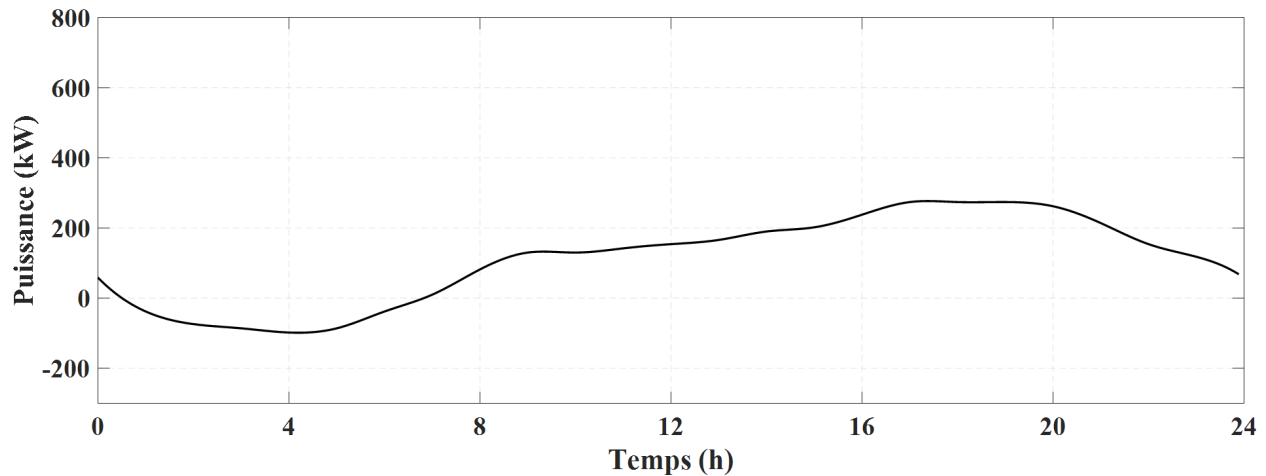


FIGURE 4.1 – Profil de puissance de la charge variable.

En début de journée, de 00h30min jusqu'à 6h50min, la courbe passe par des valeurs de puissance négatives qui peut s'expliquer par la présence de machine, qui à certains moment se mettent a produire de l'électricité pour parer une anomalie du réseau telle une chute de tension ou autre. Ensuite, pour le reste de la journée une consommation normale qui augmente progressivement est à noter. Au long de la journée, elle passe donc d'un minimum mesuré à **-98,56kW** (le signe - représente la direction de la puissance), à un maximum de **277kW** au alentours de 17h10min.

La consommation totale correspond à la somme à tout instant de la charge constante et de la charge variable. Elle est représentée par la courbe complète et varie entre **251,44 kW** et **627 kW**.

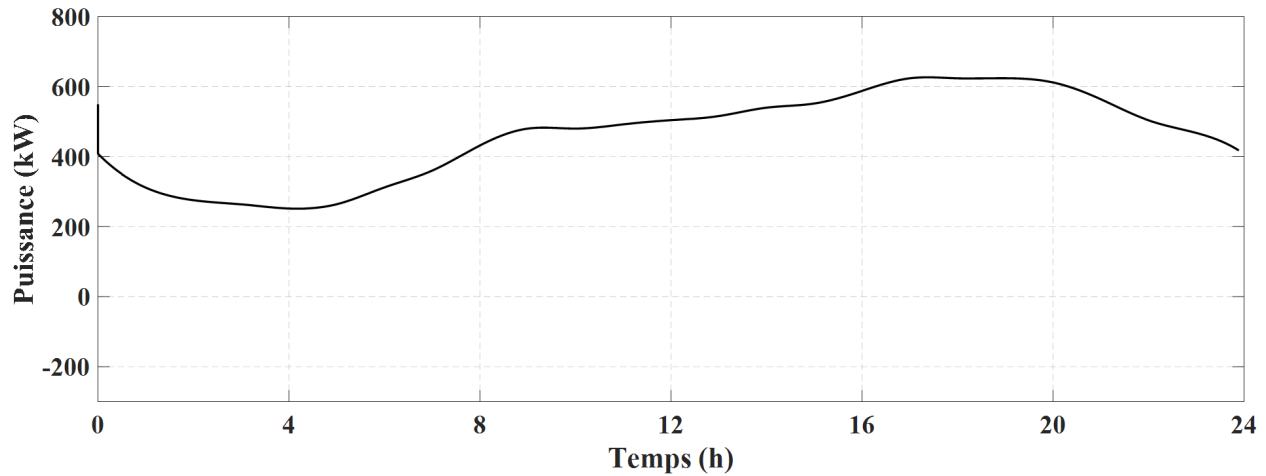


FIGURE 4.2 – Profil de puissance de la charge totale.

Le profil de puissance de la charge est une donnée essentielle, qui permet de comprendre l'évolution des besoins énergétique durant la journée, une information essentielle pour dimensionner correctement le générateur photovoltaïque, le système de stockage d'énergie et optimiser l'utilisation de l'électricité provenant du réseau traditionnel. En surveillant cette courbe, il est possible d'ajuster la production d'énergie solaire et le stockage par batteries afin de répondre aux variations de la demande de manière efficace et d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

4.2.2 Évolution du prix du kWh

La connaissance des changements du prix de revenu du kWh au long de la journée est une mesure primordiale pour une bonne gestion d'énergie qui peut mener par la suite à de grandes économies d'argent.

La figure suivante représente l'évolution du prix du kWh sur le réseau traditionnel au cours d'une journée.

En pleine nuit, le prix se stabilise aux environs de **14 cents/kWh** et ce jusqu'aux alentours de 4h30min où on voit une légère augmentation du prix qui monte jusqu'à **15 cents/kWh** puis reprend son prix initial et stagne de 7h à 16h30. À partir de cette heure, on remarque une hausse graduelle jusqu'à atteindre un pic de **30,3 cents/kWh** vers 20h15min, ce qui s'explique par une forte charge sur le réseau (la population regagne majoritairement son domicile dans ces heures). Enfin cette hausse redescend jusqu'à atteindre son niveau normal vers 22h45min.

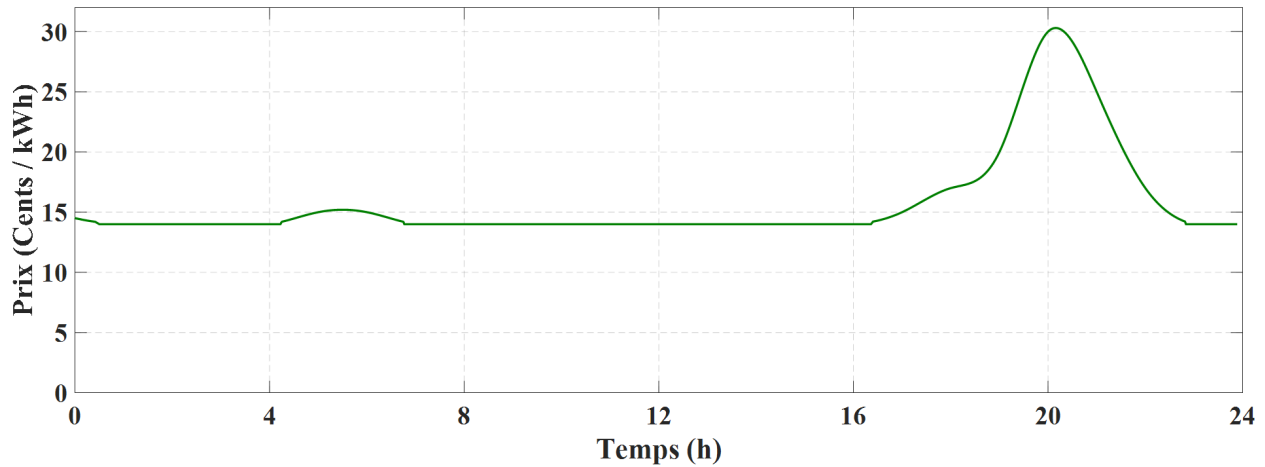


FIGURE 4.3 – Évolution du prix du kWh sur le réseau traditionnel au cours d'une journée.

4.3 Facteurs d'influence

4.3.1 Méthodes d'optimisation

Comme cité dans le chapitre précédent, le modèle étudié comprend deux méthodes d'optimisation distinctes, la première basée sur un algorithme d'optimisation linéaire, la deuxième étant une optimisation basée sur des règles heuristiques (empiriques) reposant sur un organigramme de décisions.

Dans ce point, on passera en revue puis on analysera et comparera les différents résultats obtenus par chaque méthode d'optimisation, et ce afin de déterminer les différences, les avantages et les inconvénients qu'apporte chacune d'entre elles.

Méthode d'optimisation linéaire

Cette méthode basée sur un algorithme d'optimisation linéaire, vise à maximiser l'utilisation du SSE et à la valorisation de l'excédent d'énergie photovoltaïque en le revendant sur le réseau et à la réduction des coûts d'approvisionnement en électricité, et ce en utilisant l'ESS pendant les périodes de pointe de consommation lorsque le GPV n'est plus suffisant.

La courbe qui suit, montre les variations de la puissance des différents éléments du micro-réseau tout au long de la journée.

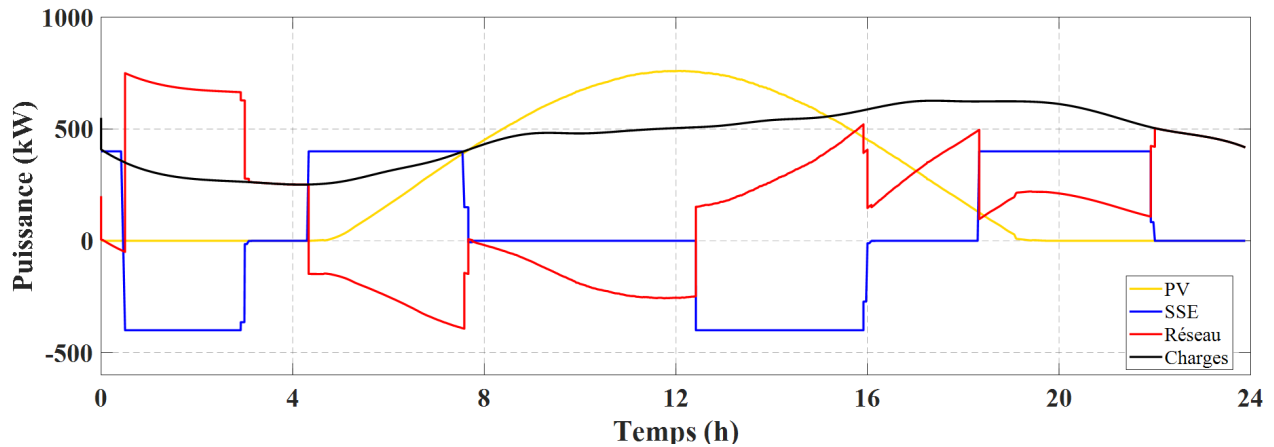


FIGURE 4.4 – Bilan de puissance de la méthode d'optimisation linéaire.

Aux alentours de 00h30min, quand le prix du kWh est au plus bas, le réseau s'occupe de la recharge du système de stockage pour qu'il atteigne son SOCmax vers 03h10min du matin.

Juste avant que les premières lueurs de soleil arrivent, et que le prix du kWh voit une augmentation, le SSE qui donne sa pleine puissance couvre dans un premier temps les besoins de la charge, et quand le GPV se met en marche il se joint aux batteries, et revend ensuite l'excédent d'énergie profitant du léger pic de prix.

Quand la production du GPV dépasse la demande des charges aux coups de 7h45min, les batteries s'arrêtent de fournir de l'énergie, et l'excédent de production est directement revendu au réseau.

Après 12h30min, la puissance du GPV se met à décliner progressivement, le réseau se met donc à réapprovisionner en énergie le SSE pour qu'il atteigne son niveau de charge maximal, car dans cette période le prix du kWh est au plus bas.

Par la suite, vers 18h20min, quand le prix de revenu du kWh voit une augmentation et que le GPV se met à progressivement à l'arrêt, le SSE rentre en jeu pour limiter au maximum l'intervention du réseau traditionnel, et ce afin de minimiser le prix total journalier.

Méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques

Le point dans cette méthode est mis dans sur la minimisation de l'utilisation du réseau même quand le prix du kWh est bas. Lorsque le générateur photovoltaïque débute sa production, il est épaulé par le SSE qui compense le manque de puissance des premières heures. Ensuite, la priorité dans cette méthode est d'abord de recharger les batteries avant de revendre tout éventuel excédent d'énergie.

La courbe ci-dessous représente l'évolution des différentes puissances des sources et charges connectées au micro-réseau tout au long de la journée.

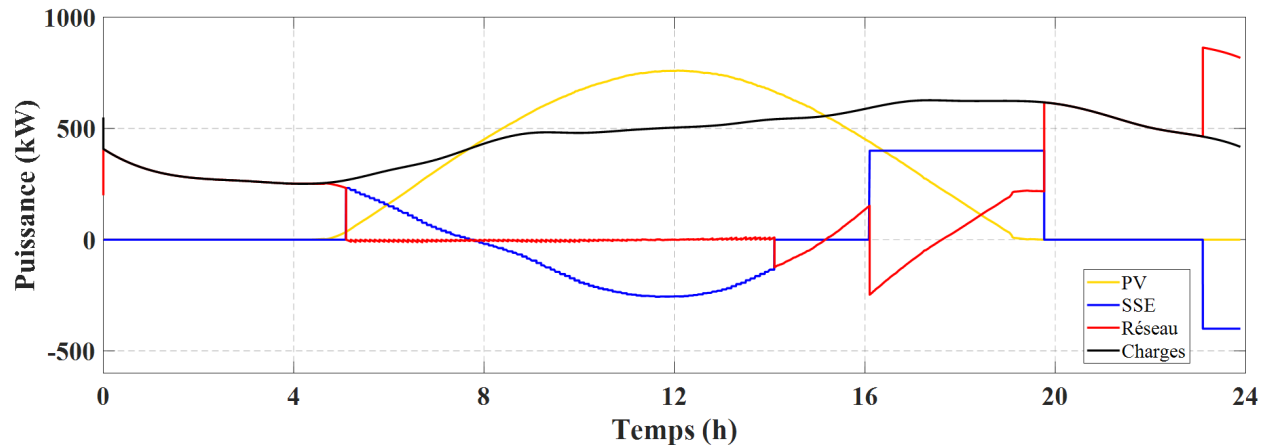


FIGURE 4.5 – Bilan de puissance de la méthode d'optimisation basée sur des règles heuristiques.

Au début de la période expérimentale, de minuit à 5h00min du matin, le réseau traditionnel s'occupe de couvrir les besoins en énergie de l'installation au vu du faible prix du kWh de cette intervalle. Passée cette heure, lorsque les premiers rayons de soleil arrivent et que le GPV commence sa production, l'énergie n'est plus drainée du le réseau et les besoins sont complètement couverts par le générateur PV couplé au système de stockage.

Ensuite, de 7h45min à 15h10min, la production photovoltaïque dépasse la consommation des charges, la priorité est donnée d'abord à la recharge du système de stockage, puis quand celui-ci atteint son SOCmax aux alentours de 14h05min, le surplus est revendu au réseau jusqu'à la fin de cette période.

En déclinant, la puissance du générateur PV devient insuffisante pour alimenter les différentes charges, celle-ci est compensée par le SSE, quand celle-ci ne suffit plus, le réseau entre en jeu pour compenser le manque de puissance. Quand le SSE atteint son SOCmin vers 19h45min, le réseau prend en charge complètement l'alimentation des différentes charges.

Enfin, en pleine nuit, lorsque le prix du kWh est moindre, le SSE se recharge. Le cycle se répétera de nouveau.

Analyse des coûts

La figure ci-dessous représente l'évolution du prix total de consommation journalière d'électricité.

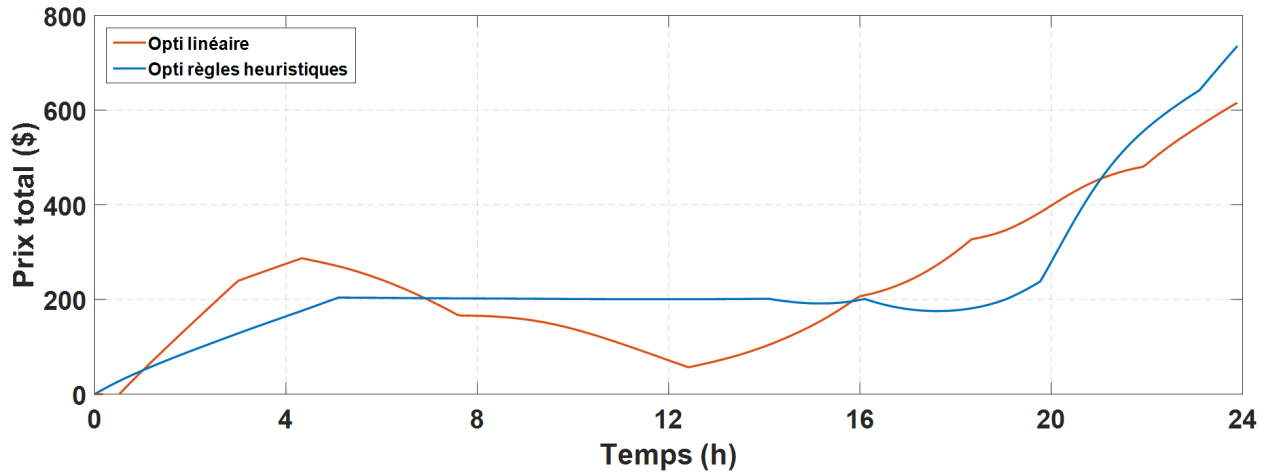


FIGURE 4.6 – Évolution du prix total des deux méthodes.

Le profil de cette évolution illustre la différence d'optimisation entre les deux méthodes. En rouge, la progression du prix total lorsque l'optimisation est faite via la méthode linéaire, on voit qu'en début de journée elle voit un pic considérable contrairement à la méthode basée sur des règles heuristiques, qui en vert, voit une progression plus lente lors de la même période.

En milieu de journée, on voit une forte baisse de prix pour la première méthode, qui s'explique par la revente de l'excédent d'énergie au réseau tandis que l'autre reste presque constante tout au long des heures d'ensoleillement.

En fin de journée on aperçoit une forte augmentation de la somme totale pour les deux approches, avec un total plus important de **735,7\$** pour stratégie basée sur des règles heuristiques, alors que l'autre cumule à **616\$**. Cette différence de **19,45%** est principalement due à la revente en milieu d'excédent de production de journée ce qui a considérablement baissé le prix total au profit de l'optimisation linéaire.

Pour la suite de l'expérimentation, la variation des autres paramètres se fera avec la méthode d'optimisation linéaire, qui fournit de meilleurs résultats en terme de prix par rapport à la deuxième méthode.

4.3.2 Conditions météorologiques

Dans des conditions réelles, le profil météorologique du lieu à étudier est une donnée primordiale à prendre en compte pour optimiser et adapter du mieux possible la production et l'utilisation des ressources, et ce dans le but d'assouvir pleinement les besoins énergétiques des charges à alimenter. Dans ce point, on étudiera l'impact du changement de profil d'éclairement sur les performances générales du système multi-sources.

Profil d'irradiation

La figure suivante représente l'allure de la puissance fournit par le GPV dans chaque cas.

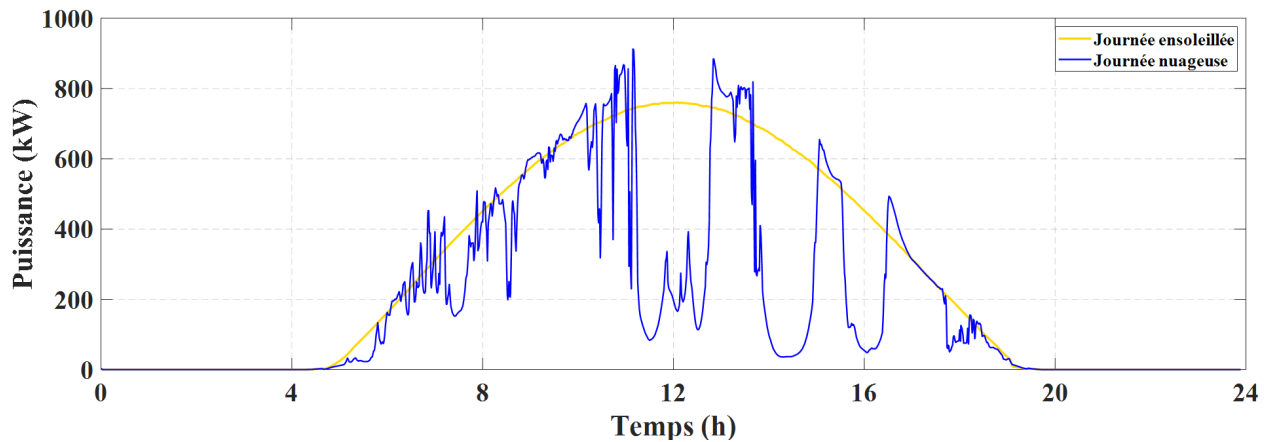
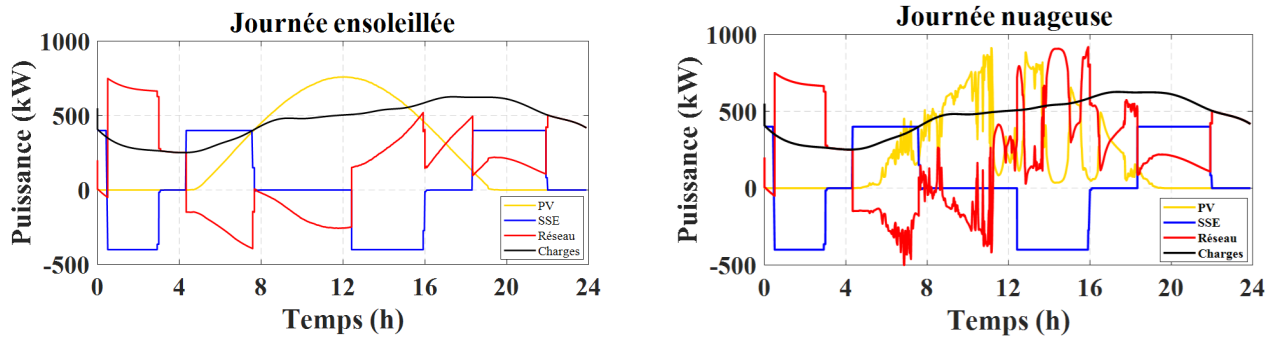


FIGURE 4.7 – Profils de puissance du GPV.

Sur la courbe correspondante à une journée ensoleillée, représentée sur la figure en orange, la puissance a un signal relativement lisse et est sous forme de cloche. En revanche, dans l'autre cas, en couleur bleu, on observe que le signal de puissance du GPV voit des perturbations qui se traduisent par des pics et des creux de puissance, ceux-ci reflètent l'alternance entre des périodes d'ensoleillement et des périodes de couverture du ciel durant la journée.

Bilan de puissance

Avec les fluctuations que voit la production photovoltaïque lors de la journée couverte, le comportement des différentes sources d'énergie du micro-réseau ne demeurera pas le même d'un cas à l'autre. La figure ci-après représente les bilans de puissance suivant chaque condition météorologique.



On constate que durant le début et la fin de la journée, à cause d'absence d'ensoleillement, le micro-réseau se comporte exactement de la même manière dans les deux cas. À l'arrivée des premiers rayons solaire, le champ PV se met en marche, les trois sources (PV, SSE et réseau) s'alternent donc pour assurer une alimentation constante des charges. Cependant, lors de la journée couverte, le réseau traditionnel intervient de manière plus importante pour compenser les fluctuations de la production photovoltaïque due aux conditions météorologique.

Analyse des coûts

Pour voir concrètement l'effet que ce changement apporte aux performances du système, on compare le prix final de consommation pour chaque météo. La figure ci-dessous illustre l'évolution de cette somme au cours de la journée.

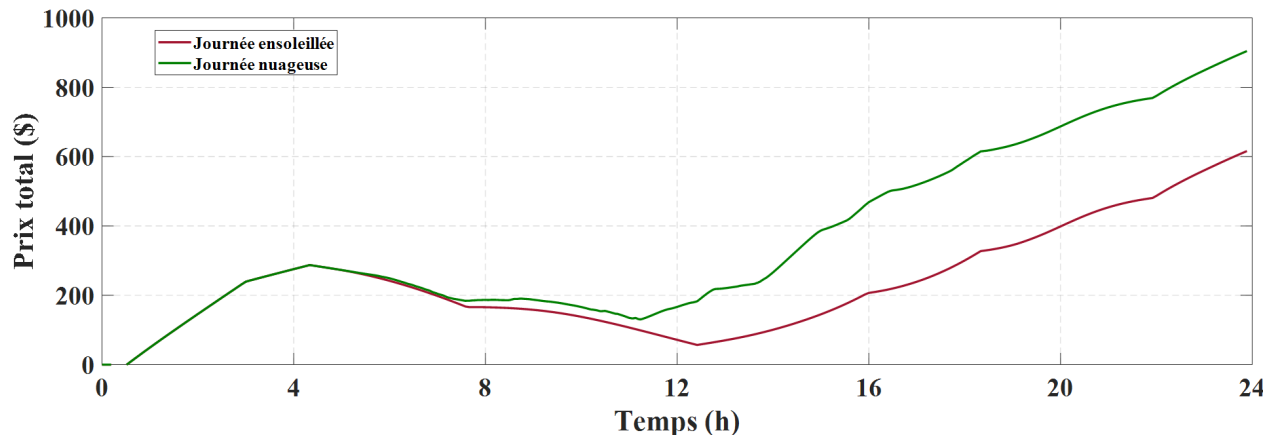


FIGURE 4.8 – Évolution du prix total pour les deux météos.

Les profils du prix total dans les deux conditions ont la même allure de minuit à 07h30min, on y voit une importante augmentation du prix total, qui s'explique par l'alimentation totale des charges par le réseau. Passé cette heure, le coût décline progressivement dans les deux cas, car le surplus de production du GPV couplé à l'énergie fournit par le SSE est revendu au réseau. Après cette période de revente, qui s'arrête plus tôt pour le cas de la journée couverte,

les prix voient de nouveau une augmentation plus importante, et ce pour atteindre un totale de **904\$**, une somme qui est **46,7 %** plus élevé que lors d'une journée ensoleillée qui dans ce cas cumule à un total de **616\$**.

4.3.3 Nombre de panneaux

Due à des contraintes budgétaires ou à des soucis d'infrastructures et d'espace, le nombre de panneaux utilisés dans un générateur photovoltaïque peut varier ce qui affecte directement la quantité d'énergie générée au cours d'une journée.

Dans ce présent point, on verra les conséquences de la variation du nombre de panneaux (qui se traduit par la variation de la surface occupée par ceux-ci) sur les performances du système et sa rentabilité. On passera donc par trois surface, **1500m²**, **2500m²** et **3500m²**.

Profil d'irradiation

La figure suivante illustre les trois profils de puissance du GPV pour chaque cas.

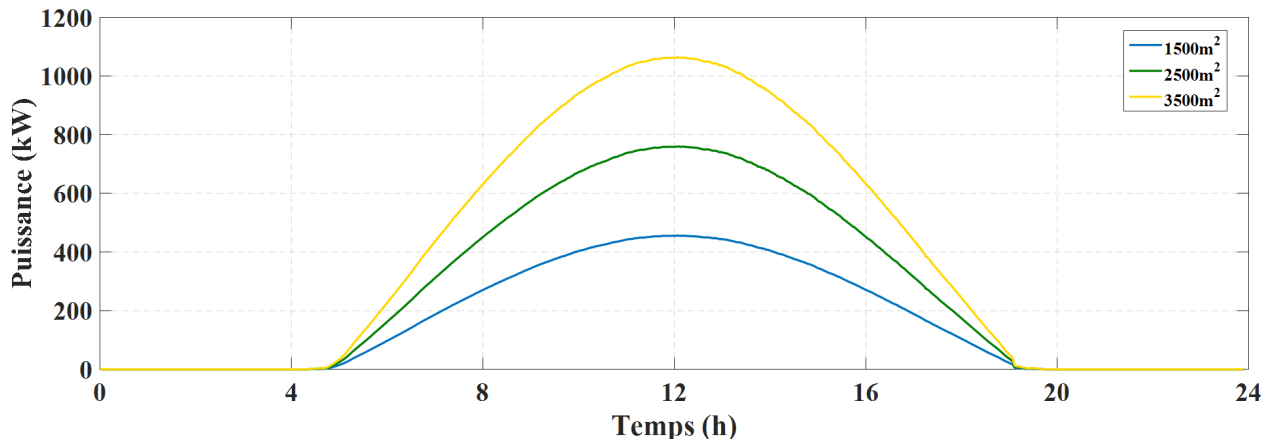


FIGURE 4.9 – Profils de puissances du GPV.

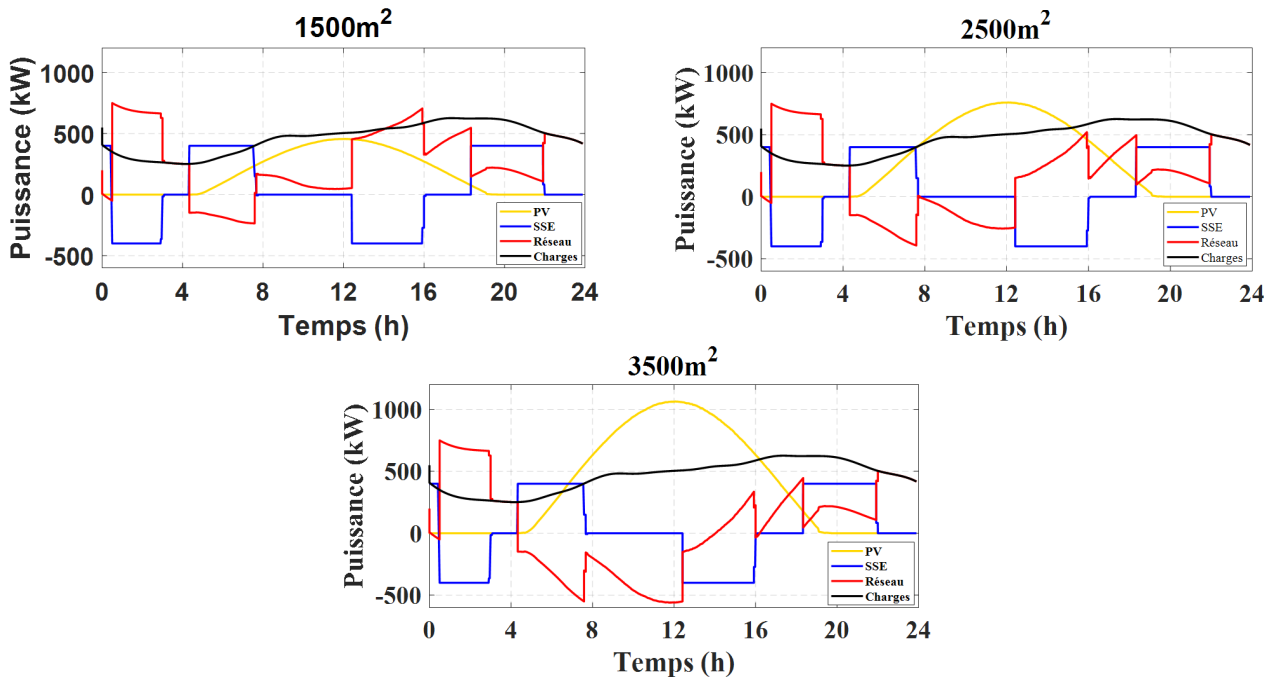
Comme vu précédemment, le profil en cloche caractéristique d'une journée ensoleillée est retrouvée encore une fois ici pour les trois surfaces. La différence est dans leurs évolution au file de la journée, car plus la surface du GPV est grande plus la puissance fournit par celui-ci pour le même éclairage augmente.

En chiffre, en comparant les puissances maximales de chaque cas, on voit une augmentation de **65%** en passant de 1500m² à 2500m², contre seulement **38%** en passant de 2500m² à 3500m².

Bilan de puissance

Naturellement, avec le changement des puissances produites par le GPV, la répartition des charges sur les sources d'énergie alimentant le micro-réseau ne restera pas la même selon chaque surface de puissance.

La figure suivante, rassemble les bilans énergétiques de chaque cas.



Logiquement, plus la puissance du GPV augmente plus la revente de l'excédent d'énergie est importante, également la puissance qui est puisée depuis le réseau est moindre.

Dans la configuration où on a utilisé des panneaux d'une surface totale de 1500m², le réseau électrique est constamment sollicité même lors des heures d'ensoleillement, or dans la configuration avec une surface utile de 3500m², on distingue plutôt une revente sur quasiment toute la journée, avec une intervention très minime du réseau.

Analyse des coûts

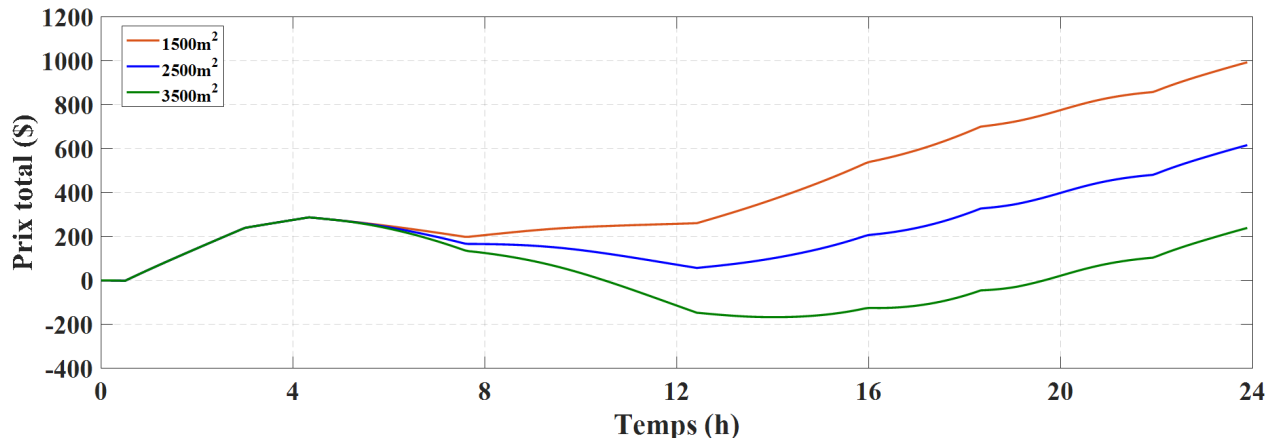


FIGURE 4.10 – Évolution du prix total pour les trois surfaces.

Cette différence de comportement du réseau dans chaque cas, se traduit principalement par la réduction ou l'augmentation du prix total de consommation journalière. Avant le lever du soleil et la mise en marche du GPV, les profils des prix sont sensiblement les mêmes. Cependant quand la production photovoltaïque débute, les courbes se détachent l'une de l'autre, passant par des valeurs négatives pour celle représentant la configuration à $3500m^2$ de surface, valeurs qui indiquent que le système est dans une phase de rentabilité (prix total de vente > prix total d'achat), et allant vers de forte augmentation pour la courbe représentant le totale de la configuration à $1500m^2$ de surface.

En fin de journée, on se retrouve avec des totaux allant de **238,9\$** pour la structure avec la plus grande surface, à **993\$** pour la structure avec la surface la plus réduite. Une réduction d'environ **61%** du total journalier du coût d'électricité est à mentionnée en augmentant la surface de base des panneaux qui est de $2500m^2$ de seulement $1000m^2$.

4.3.4 Rendement du générateur PV

Dépendamment du matériau dont le panneau PV est fabriqué, son rendement (qui représente l'efficacité de la conversion photovoltaïque dans le panneau) varie. En passant d'un module à base de silicium polycristallin, à un module à base de silicium monocristallin, le prix varie fortement pour cause de la différence de rendement qu'il a entre les deux. Le premier, fabriqué avec un matériau plus simple à obtenir, a un rendement moindre qui varie entre **14%** et **18%**, tandis que le deuxième, à base d'un matériau qui nécessite des procédés plus coûteux pour son obtention, plafonne aux alentours de **23%** [56].

Selon le budget assigné à ces équipement, l'efficacité du panneau choisi varie également

ce qui influence directement la puissance fournit par le GPV. Dans cet essai on passera en revue l'effet de la variation de ce paramètre, avec des rendements de **10%**, **20%** et de **30%**.

Profile d'irradiation

Ici aussi, comme dans les essais où la journée est ensoleillée, les trois profils correspondant aux trois rendements, suivent sensiblement la même allure sous forme de cloche, en notant une baisse importante et logique de la puissance de sortie du GPV à fur et à mesure que l'on réduit le rendement. En diminuant le rendement à seulement 20%, on note une sévère baisse de puissance d'un facteur de **0,34**, tandis que le baisser à 10% fait perdre au générateur PV **67%** de sa puissance de sortie.

La figure ci-dessous illustre ces différents profils.

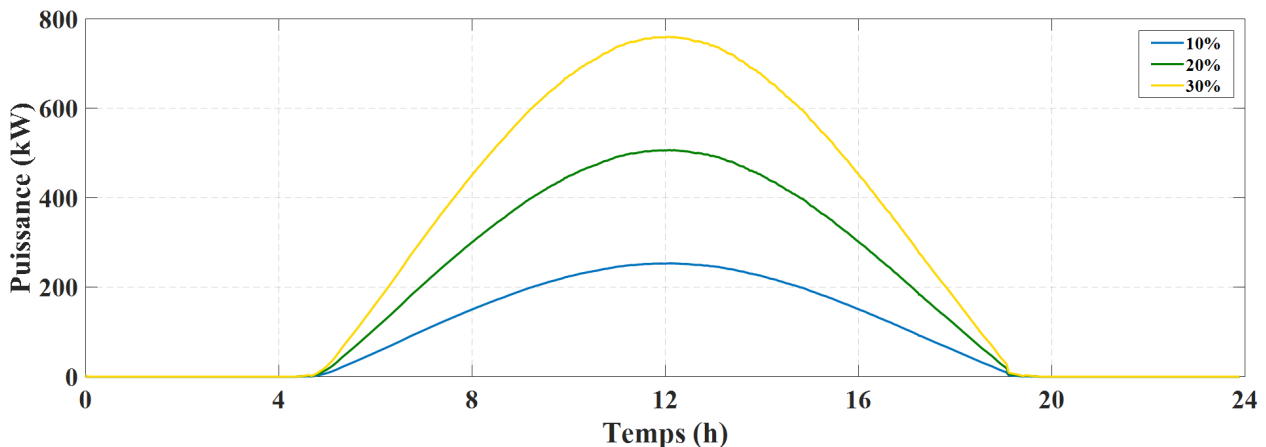


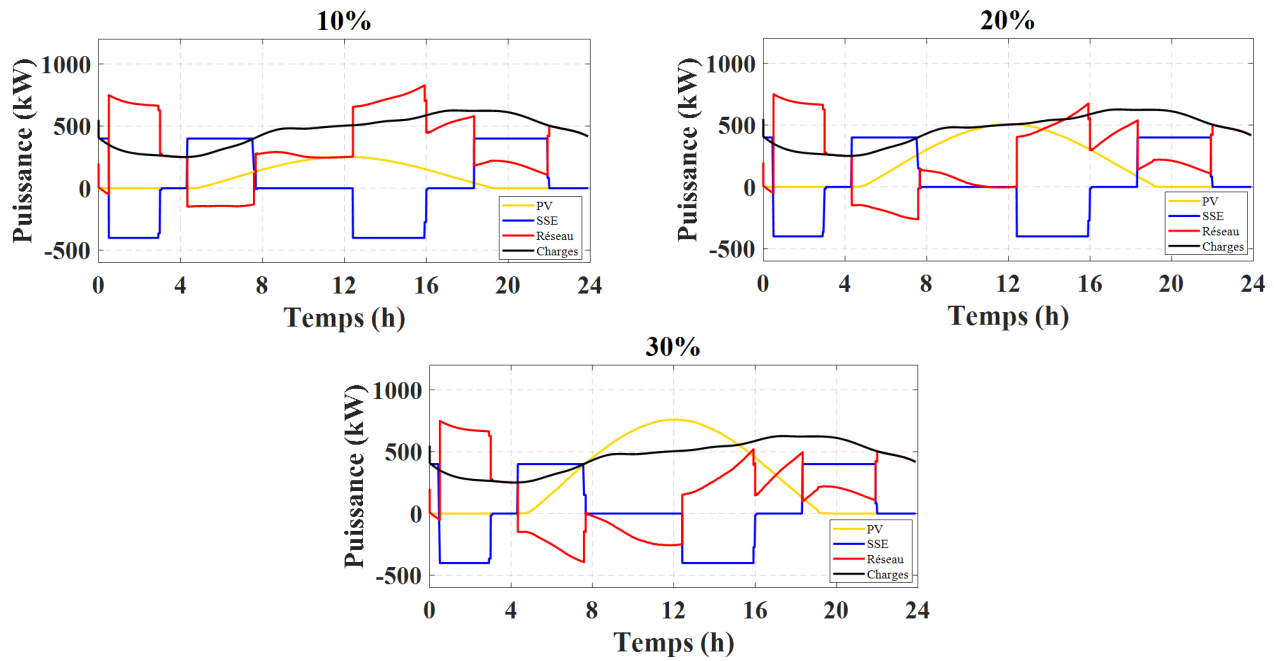
FIGURE 4.11 – Profils de puissances du GPV.

Bilan de puissance

Tout comme dans les cas précédents, influencer la puissance de sortie du GPV revient à influencer tout le reste des sources d'énergie connectée au micro-réseau.

La figure suivante illustre les différents bilans de puissance et ce pour chacun des cas.

Sans surprise, le constat sera le même que les essais où la puissance du GPV est altérée. Car plus celle-ci prend des valeurs importantes, plus le système fait moins appel au réseau électrique. En baissant le rendement à 10% le réseau est sollicité durant quasi toute la journée. À 20%, le réseau est un peu moins sollicité, et s'alterne avec les autres sources pour assurer l'alimentation des charges. Puis enfin à 30%, le réseau intervient très peu durant les heures de soleil.



Analyse des coûts

La figure ci-dessous présente l'évolution du prix total pour les trois rendements :

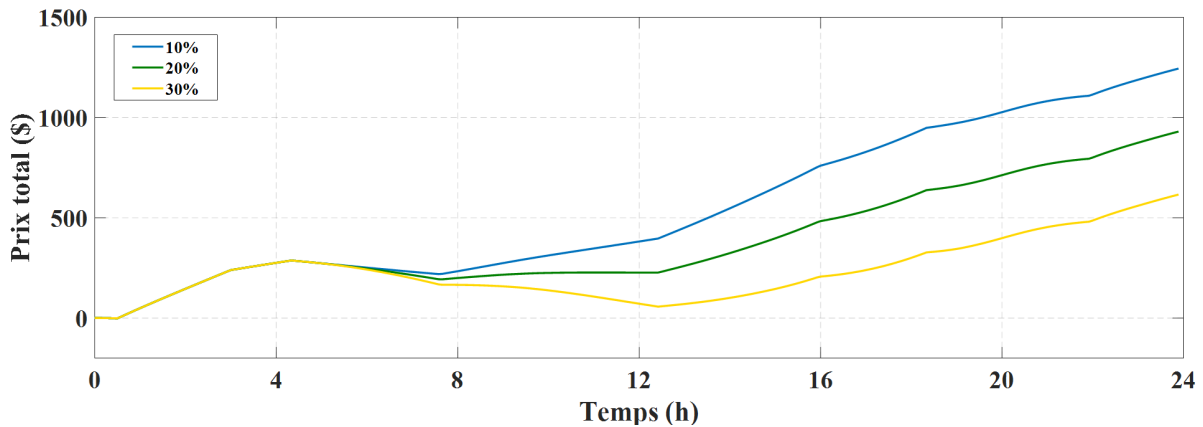


FIGURE 4.12 – Évolution du prix total pour les trois rendements

Lors de l'absence d'éclairément, les trois courbes voient une progression identique. En début de journée, à cause de l'alimentation exclusive par le réseau, les totaux augmentent considérablement. Toutefois, dès la mise en marche du champ solaire, les prix se mettent à diminuer. En bleu, la courbe caractéristique des panneaux avec le rendement le plus faible, enregistre une légère baisse de son total, puis remonte fortement jusqu'à un prix final de **1245\$**. D'autre part, en orange la courbe relative au panneaux avec le meilleur rendement, voit sa diminution prolongée sur une plus longue durée, ce qui permet d'avoir un total deux fois inférieur qui s'élève à seulement **616\$**.

4.3.5 Capacité de stockage

Les systèmes de stockage en général, sont une part indissociable des systèmes multi-sources et ce afin d'assurer une autonomie d'énergie fiable à tout instant, ils assurent l'alimentation des charges quand les prix du réseau sont trop élevés, ou bien lorsque la production d'énergie renouvelables n'est pas suffisante.

En moyenne les systèmes de stockage par batteries représentent plus ou moins **30%** du coût total d'une installation photovoltaïque, prix qui varie fortement suivant la technologie utilisée, la taille de ce système et l'usage auquel il est destiné.

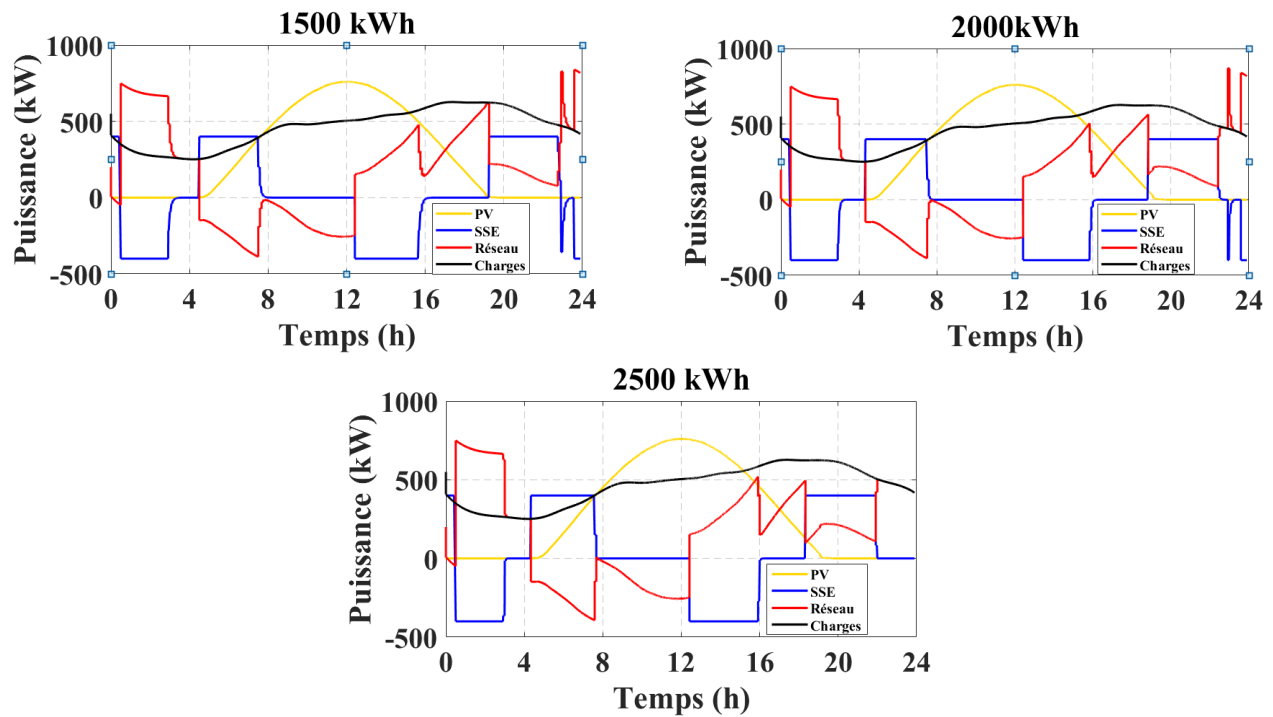
Suivant l'ampleur du projet, une réduction de 20-40% de la taille du système de stockage peut induire à d'importantes économies d'échelle sur le coût initial de l'installation, réduction qui peut s'avérer encore plus intéressante dans les installations de grandes envergures.

Dans cet essai, on constate l'impact de la réduction de la capacité de stockage sur le prix total de la consommation en fin de journée. Ainsi on passera d'une capacité initiale de **2500kWh** à **1500kWh**, passant par une capacité de **2000kWh**.

Bilan de puissance

Ici contrairement aux cas précédents, le système n'est que peu affecté par cette réduction de capacité. Car en effet, mis à part quelques pics dans l'allure de la puissance du réseau et celle du SSE en fin de journée, dus à la recharge de la batterie, le système se comporte de la même manière dans les trois cas. La figure ci-dessous illustre l'évolution des puissances du système au long de la journée, et ce pour les trois configurations.

La figure ci après regroupe les bilans de puissance pour les trois cas.



Analyse des coûts

Les perturbations notées dans les bilans de puissance précédents, se manifestent ici comme de légères augmentations dans le prix total de la consommation en fin de journée.

Une diminution de la capacité initiale de **20%** amène une augmentation du prix final de seulement **4,1%** passant alors de **616\$** à **641,8\$**. En diminuant encore la capacité du système de stockage avec un autre 20%, passant alors à une diminution de **40%**, engendre une augmentation du prix total de de **6%**, passant alors à un total de **652\$**.

L'évolution du prix total pour les trois capacités est donnée par la figure ci-dessous :

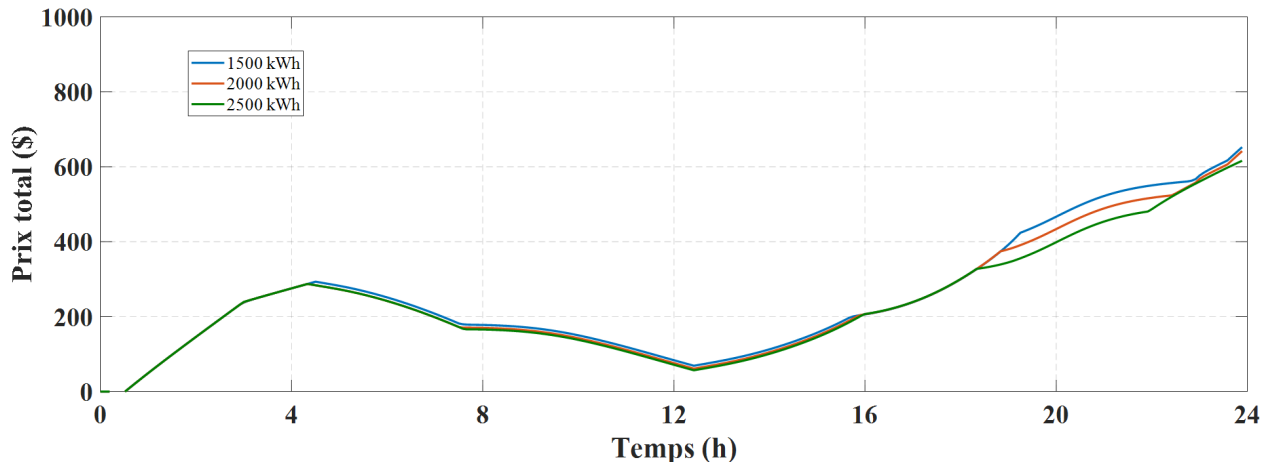


FIGURE 4.13 – Évolution du prix total pour les trois capacités

Une légère augmentation du prix de l'électricité consommée peut s'avérer avantageuse. En d'autres termes, étant donné que SSE représente une part importante du coût initial de l'installation, la réduction de sa taille permet de réaliser des économies significatives sur le prix global et d'améliorer la rentabilité de l'installation.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a permis d'analyser en détail les divers facteurs influençant les performances et les coûts d'exploitation d'un système multi-sources alimentant un micro-réseau.

La comparaison des deux méthodes d'optimisation a révélé que l'approche linéaire permettait d'obtenir de meilleures performances en termes de coûts totaux, grâce à une valorisation plus efficace de l'excédent d'énergie photovoltaïque. Cependant, la méthode heuristique basée peut s'avérer intéressante pour les systèmes où la minimisation de l'utilisation du réseau est la priorité, entraînant alors des coûts totaux plus élevés mais une dépendance réduite au réseau électrique traditionnel.

L'étude de l'impact des conditions météorologiques a mis en évidence que la prise en compte de la variabilité de la production photovoltaïque est cruciale dans les choix d'optimisation. Ainsi, les périodes de faible ensoleillement se traduisent par une hausse significative des coûts liés à l'utilisation du réseau, soulignant l'importance d'adapter les stratégies en fonction des conditions climatiques.

Une conclusion similaire est à noter pour l'analyse de l'influence du nombre de panneaux photovoltaïques et de leur rendement. Elle a démontré que l'augmentation de la surface de captation et du rendement permet de réduire substantiellement les coûts d'exploitation, en maximisant la production locale d'énergie renouvelable et en diminuant la dépendance au réseau électrique.

Enfin, l'étude de la capacité de stockage a révélé que sa diminution, bien que générant une légère augmentation des coûts d'exploitation, peut s'avérer intéressante d'un point de vue économique global. En effet, la réduction de la capacité de stockage, et donc du coût associé, peut permettre de réaliser des économies substantielles sur le budget global d'investissement de l'installation.

Au final, ce chapitre a mis en lumière la complexité de la gestion optimale d'un système multi-sources, qui nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres techniques et économiques. Les méthodes d'optimisation développées constituent des outils précieux pour guider la prise de décision et améliorer de manière continue les performances de tels systèmes.

Conclusion générale

Nous nous sommes intéressés dans ce mémoire à l'étude des SHE et à l'optimisation de leur gestion par l'intermédiaire de SGE. L'objectif principal était d'analyser l'impact du choix de l'approche de gestion dans les SGE, ainsi que l'influence de certains facteurs clés tels que les conditions météorologiques, le nombre et le type de panneaux solaires photovoltaïques, sur l'optimisation de la gestion d'un système hybride d'énergie.

L'analyse approfondie menée au cours de ce travail a permis de mettre en évidence les avantages et les limites des différentes approches de gestion de l'énergie. Les résultats ont montré que le choix de l'algorithme de gestion, qu'il s'agisse d'approches basées sur des règles heuristiques ou de méthodes d'optimisation linéaire, a une influence significative sur les performances du système hybride en termes de minimisation des coûts, de maximisation de l'autosuffisance énergétique et de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

De plus, l'étude de l'impact des paramètres du système, tels que les conditions météorologiques, les caractéristiques des panneaux solaires et la capacité du système de stockage, a permis de mieux comprendre la sensibilité des SHE à ces facteurs externes. Cette analyse a mis en évidence l'importance de l'adaptation et de l'optimisation des stratégies de gestion en fonction des spécificités du système et de son environnement.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire soulignent l'importance d'une gestion optimisée des systèmes hybrides d'énergie pour relever les défis de la transition énergétique. L'intégration efficace des énergies renouvelables, associée à une gestion coordonnée des différentes composantes du système, représente une voie prometteuse pour assurer la fiabilité de l'approvisionnement énergétique tout en réduisant l'impact environnemental.

Les travaux futurs pourront s'appuyer sur les enseignements de cette étude pour approfondir les recherches sur l'optimisation des SGE, en explorant notamment des approches d'optimisation utilisant les méthodes intégrant l'IA, tel que les réseaux de neurones, l'optimisation par essaim de fourmis...etc, ou en étendant l'analyse à d'autres types de systèmes hybrides intégrant d'autres sources d'énergie renouvelables. L'objectif sera de continuer à améliorer les performances et la résilience des systèmes énergétiques dans le cadre de la transition écologique.

Bibliographie

- [1] Agence internationale de l'énergie (AIE). Key world energy statistics 2019, 2019.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2021 : The physical
- [3] Organisation mondiale de la santé (OMS). Pollution de l'air ambiant, 2018.
- [4] Commission européenne. Pacte vert pour l'europe, 2021.
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable capacity statistics 2020, 2020.
- [6] Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista, and Ricardo J. Mantz. *Wind Turbine Control Systems : Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer, 2016.
- [7] Hao Bai, Shukui Miao, Xiuli Ran, and Chao Ye. Optimal sizing of energy storage system in active distribution network. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10(3) :638–647, 2016.
- [8] Michel Deshaies. Problèmes géographiques des transitions énergétiques : quelles perspectives pour l'évolution du système énergétique ? *Monde en développement*, 48(44) :25–44, 2020.
- [9] RTE. Bilan électrique français 2019 : une consommation en baisse depuis 10 ans, une production, 2020.
- [10] Mohamed AhmedBelbachir, Wafa AhmedBelbachir, and Kuider Senouci. Energies renouvelables : Transition et perspectives - cas de l'algerie. VIII(1), 2022.
- [11] Energy Information Administration. International Energy Outlook 2021, 2021.
- [12] Muiyiwa Adaramola. *Wind turbine technology : Principles and design*. CRC Press, 2014.
- [13] Djamel Saba. *Modélisation Sémantique à base d'Agents pour la Gestion d'Energie dans un Système Multi Sources à Energie Renouvelable*. PhD thesis, Université Kasdi Merbah Ouargla, 06 2017.
- [14] Kawther Achari N Diaye Papa Amadou. Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque. 2019.
- [15] Daniel Suchet and EV Johnson. *L'énergie solaire photovoltaïque*. EDP science, 2022.
- [16] Benlameur, Zidane and Nouiri, Sana Ramzi. Etude et modélisation d'un système photovoltaïque pour l'habitat résidentiel autonome. Master's thesis, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2022.

- [17] Khaled Khoudja Roufaïda and Kheir Fatima Zohra. Etude et réalisation de l'effet de l'ombrage sur les panneaux photovoltaïques, 2023.
- [18] Amel Gellab, Taqy Eddine Boukelia, S Djimli, and Nadia Aderghal. Etude expérimentale sur les caractéristiques électriques d'un panneau hybride pvt. In *Fifth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution*, Constantine, Algérie, 2019. ICEMAEP.
- [19] Hristiyan Kanchev. *Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lille ; Université Technique de Sofia. Faculté Francophone, 2014.
- [20] Nacera Abdelli and Radia Sidi Said. Etude et optimisation des centrales solaires thermiques à concentrateurs linéaires de fresnel : Application en algérie. Master's thesis, UMMTO, 2020.
- [21] Driada Mitrushî. *Apport d'une station de transfert d'énergie par pompage sur le taux d'intégration des EnR*. PhD thesis, Université Pascal Paoli ; Universiteti politeknik i Tiranës. Albanie, 2016.
- [22] Jean-Sébastien Marcil. La géothermie profonde : une ressource abondante absente du portfolio énergétique québécois. *Ressources Énergies Industrie*, 1(3) :16–20, December 2021.
- [23] Dossier Pour la Science. Énergies à volonté ! vers des ressources propres et renouvelables. Dossier Pour la Science, 69 :65–70, octobre – décembre 2010.
- [24] Falah Alobaid, Nicolas Mertens, Ralf Starkloff, Thomas Lanz, Christian Heinze, and Bernd Epple. Progress in dynamic simulation of thermal power plants. *Progress in energy and combustion science*, 59 :79–162, 2017.
- [25] Samir Deghboudj. *Etude Et Simulation Numérique Des Vibrations Des Poutres Homogènes Application Aux Cas Des Aubes Longues D'une Turbine à Vapeur*. PhD thesis, Université de Tébessa, 07 2013.
- [26] Thiriet Tony. *Traitement mécaniques et thermochimiques couplés sur acier inoxydable et alliage base nickel austénitiques*. PhD thesis, 11 2010.
- [27] Nathalie Devillers. *Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [28] Eric Korsaga, Zacharie Koalaga, D Bonkoukou, and François Zougmoré. Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne. *Journal International de Technologie, de l'Innovation, de la Physique, de l'Energie et de l'Environnement*, 2018.
- [29] Karim Abdennadher. *Etude et Elaboration d'un système de Maintenance Prédicative Pour les condensateurs et les Batteries Utilisés dans les Alimentations sans Interruptions (ASI)*. PhD thesis, PhD thesis, Université de LYON 1, 2010.
- [30] Emiliano Borri, Alessio Tafone, Gabriele Comodi, Alessandro Romagnoli, and Luisa F Cabeza. Compressed air energy storage—an overview of research trends and gaps through a bibliometric analysis. *Energies*, 15(20) :7692, 2022.
- [31] Abdoul Karim Traoré. *Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles*. PhD thesis, Université du Québec à Trois-Rivières, 2016.
- [32] Ludmil Stoyanov. *Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables*. PhD thesis, Université Pascal Paoli, 2011.
- [33] Claude Ronneau. *Énergie, pollution de l'air et développement durable*. Presses univ. de Louvain, 2013.
- [34] Guillaume Bourgeois. *Innovation et diffusion des énergies renouvelables : quelle efficacité des politiques climatiques ?* PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2020.
- [35] Emad M Natsheh, Alhussein Albarbar, and Javad Yazdani. Modeling and control for smart grid integration of solar/wind energy conversion system. In *2011 2nd IEEE PES International conference and exhibition on innovative smart grid technologies*, pages 1–8. IEEE, 2011.
- [36] Shahzad Khan, Devashish Paul, Parham Momtahan, and Moayad Aloqaily. Artificial intelligence framework for smart city microgrids : State of the art, challenges, and opportunities. In *2018 third international conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)*, pages 283–288. IEEE, 2018.
- [37] Carole Wernert. Origines et histoire de la gestion énergétique locale à metz : les stratégies économiques de l'usine d'électricité de metz (uem). *Flux*, (3) :36–47, 2017.
- [38] Nayanajith W. A. Lidula and Athula D. Rajapakse. Microgrids research : A review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(1) :186–202, 2011.

BIBLIOGRAPHIE

- [39] Naveen Venkatesan, Jignesh Solanki, and Sarika Khushalani Solanki. Residential demand response model and impact on voltage profile and losses of an electric distribution network. *Applied energy*, 96 :84–91, 2012.
- [40] M Thirunavukkarasu, Yashwant Sawle, and Himadri Lala. A comprehensive review on optimization of hybrid renewable energy systems using various optimization techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 176 :113192, 2023.
- [41] Daniel E Olivares, Claudio A Cañizares, and Mehrdad Kazerani. A centralized energy management system for isolated microgrids. *IEEE Transactions on smart grid*, 5(4) :1864–1875, 2014.
- [42] Nasreddine Attou, Sid-Ahmed Zidi, Mohamed Khatir, and Samir Hadjeri. Energy management system for hybrid microgrids. *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 69(2), 2021.
- [43] Alessandra Parisio, Evangelos Rikos, and Luigi Glielmo. A model predictive control approach to microgrid operation optimization. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 22(5) :1813–1827, 2014.
- [44] Mohamed-Hamza Laraki. *L'étude de la gestion d'énergie dans les systèmes résidentiels raccordés aux réseaux autonomes dans le Nord québécois*. PhD thesis, École de technologie supérieure, 2019.
- [45] Peter Meibom, Klaus Baggesen Hilger, Henrik Madsen, and Dorthe Vinther. Energy comes together in denmark : The key to a future fossil-free danish power system. *IEEE power and energy magazine*, 11(5) :46–55, 2013.
- [46] Khadija Tazi, Fouad Mohamed Abbou, and Farid Abdi. Multi-agent system for micro-grids : design, optimization and performance. *Artificial Intelligence Review*, 53(2) :1233–1292, 2020.
- [47] Manuel Castillo-Cagigal, Alvaro Gutiérrez, Felix Monasterio-Huelin, Estefanía Caamaño-Martín, D Masa, and Javier Jiménez-Leube. A semi-distributed electric demand-side management system with pv generation for self-consumption enhancement. *Energy Conversion and Management*, 52(7) :2659–2666, 2011.
- [48] Xuefeng Gao and Ali Malkawi. A new methodology for building energy performance benchmarking : An approach based on intelligent clustering algorithm. *Energy and Buildings*, 84 :607–616, 2014.
- [49] Rehman Zafar, Anzar Mahmood, Sohail Razzaq, Wamiq Ali, Usman Naeem, and Khurram Shehzad. Prosumer based energy management and sharing in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 :1675–1684, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

- [50] Anna Inisan. ISO 50001 : tout savoir sur le système de management énergie.
- [51] International Electrotechnical Commission. Communication networks and systems for power utility automation, 2013.
- [52] Shiyao Zhou, Ziqiang Chen, Deyang Huang, and Tiantian Lin. Model prediction and rule based energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle with hybrid energy storage system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(5) :5926–5940, 2021.
- [53] Saif Jamal, Jagadeesh Pasupuleti, and Janaka Ekanayake. A rulebased energy management system for hybrid renewable energy sources with battery bank optimized by genetic algorithm optimization. *Scientific Reports*, 14 :4865, 2024.
- [54] Marco Vaccari, Gabriele Mancuso, Jacopo Riccardi, Matteo Cantù, and Gabriele Panocchia. A sequential linear programming algorithm for economic optimization of hybrid renewable energy systems. *Journal of Process Control*, 74 :189–201, 2019. Efficient energy management.
- [55] Armin Cosic, Michael Stadler, Muhammad Mansoor, and Michael Zellinger. Mixed-integer linear programming based optimization strategies for renewable energy communities. *Energy*, 237 :121559, 2021.
- [56] Liang Jiang, Sai Cui, Peng Sun, Yanyan Wang, and Chao Yang. Comparison of monocrystalline and polycrystalline solar modules. In *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, pages 341–344, 2020.