

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : ENERGIE ET ENVIRONNEMENT

Présenté par :
BELKHITER YAHIA ILYES
MAYOUF AYMEN

Thème

**Modélisation , commande et gestion d'énergie d'un
micro-réseau hybride PV-batterie-nanogénérateur**

Soutenu publiquement, le 21/06 / 2026 , devant le jury composé de:

M.BELAROUCI Salim	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M.CHEMIDI Abdelkarim	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M.KERBOUA Abdelfetah	MCA	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
Mme.BOUSMAHA Imen	MCA	ESSA. Tlemcen	Examinatrice 1
Mme.MIDOUN Nadja	MCA	ESSA. Tlemcen	Examinatrice 2

Année universitaire : 2025 / 2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédication

Nous dédions ce modeste travail :

À nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours. Vos encouragements ont été notre force.

À nos familles, pour leur présence, leur bienveillance et leurs prières qui nous ont accompagnés à chaque étape de ce chemin.

À nos amis et proches, pour leur soutien moral et les moments de partage qui ont rendu cette aventure plus légère.

À tous ceux qui nous ont transmis le savoir et guidés vers la lumière de la connaissance.

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à notre encadreur, Monsieur Abdelkarim Chemidi, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce travail. Ses orientations ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce projet.

Nous remercions également Monsieur Fares Meziani et Monsieur Abdelfetah Kerboua pour leur encadrement, leur soutien et l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du corps enseignant et administratif de l'École Supérieure des Sciences Appliquées de Tlemcen pour la qualité de la formation dispensée et les conditions de travail offertes durant notre cursus.

Enfin, nous remercions les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

الملخص

تتناول هذه المذكرة النمذجة والتحكم وإدارة الطاقة في شبكة صغيرة هجينة تتكون من لوح كهروضوئي وبطارية ومولد كهربائي احتكاكي نانوي. يتمثل الهدف الرئيسي في ضمان تغذية كهربائية مستمرة ومستقرة لحمل قدره 122 واط وحساس ذي استهلاك منخفض (0,16 واط)، بصرف النظر عن ظروف الإشعاع الشمسي. يعتمد النظام على أربعة محولات للتيار المستمر: محول رافع-خافض ثنائي الاتجاه لإدارة شحن وتفريغ البطارية، ومحولين خافضين مخصصين لتغذية الحساس، ومحول رافع مثبت في مخرج اللوح الكهروضوئي. يضمن مصبوح تناسبي-تكاملي التنظيم الدقيق لتيار البطارية. أما المولد الكهربائي الاحتكاكي النانوي، المُنمذج بدائرته المكافئة، فيغذي الحساس عبر سلسلة معالجة تشمل مقوِّماً وفلترًا ومحولاً خافضاً. تمت محاكاة النظام الكامل باستخدام ماتلاب/سيمولينك وفق سيناريوهين تكامليين للإشعاع الشمسي (متصاعد ومتناقص). تؤكد النتائج المحصل عليها فعالية استراتيجية إدارة الطاقة المعتمدة واستمرارية تغذية النظام في جميع ظروف التشغيل.

الكلمات المفتاحية: الشبكة الصغيرة الهجينة، الطاقة الشمسية الكهروضوئية، البطارية، المولد الكهربائي الاحتكاكي النانوي، إدارة الطاقة، سيمولينك.

Abstract

This thesis focuses on the modeling, control and energy management of a hybrid microgrid consisting of a photovoltaic panel, a battery and a triboelectric nanogenerator. The main objective is to ensure a continuous and stable power supply for a 122 W load and a low-power sensor (0.16 W), regardless of solar irradiation conditions. The system relies on four DC-DC converters: a bidirectional Buck-Boost converter for battery charge and discharge management, two Buck converters dedicated to sensor power supply, and a Boost converter placed at the output of the photovoltaic panel. A Proportional-Integral (PI) controller ensures precise regulation of the battery current. The triboelectric nanogenerator, modeled by its equivalent circuit (ECM), powers the sensor through a conditioning chain consisting of a rectifier, a filter and a Buck converter. The entire system was simulated under MATLAB/Simulink using two complementary irradiation scenarios (increasing and decreasing). The obtained results validate the effectiveness of the adopted energy management strategy and confirm the continuity of power supply under all operating conditions.

Keywords: Hybrid microgrid, Photovoltaic, Battery, Triboelectric nanogenerator, Energy management, MATLAB/Simulink.

Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation, la commande et la gestion d'énergie d'un micro-réseau hybride composé d'un panneau photovoltaïque, d'une batterie et d'un nanogénérateur triboélectrique. L'objectif principal est d'assurer une alimentation continue et stable d'une charge de 122 W et d'un capteur de faible puissance (0,16 W), indépendamment des conditions d'ensoleillement. Le système repose sur quatre convertisseurs DC-DC : un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel pour la gestion de la charge et de la décharge de la batterie, deux convertisseurs Buck dédiés à l'alimentation du capteur, et un convertisseur Boost placé en aval du panneau photovoltaïque. Un correcteur Proportionnel-Intégral (PI) assure la régulation précise du courant de batterie. Le nanogénérateur triboélectrique, modélisé par son circuit équivalent (ECM), alimente le capteur via une chaîne de conditionnement composée d'un redresseur, d'un filtre et d'un convertisseur Buck. L'ensemble du système a été simulé sous MATLAB/Simulink selon deux scénarios d'irradiation complémentaires (croissante et décroissante). Les résultats obtenus valident l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie adoptée et confirment la continuité d'alimentation du système dans toutes les conditions de fonctionnement.

Mots-clés : Micro-réseau hybride, Photovoltaïque, Batterie, Nanogénérateur triboélectrique, Gestion d'énergie, MATLAB/Simulink.

Table des matières

Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XII
Introduction générale	13
1 La transition énergétique	16
1.1 Introduction	16
1.2 L'énergie	16
1.3 Les différentes formes de l'énergie	17
1.3.1 Énergie Cinétique	17
1.3.2 Énergie Potentielle	17
1.3.3 Énergie Chimique	17
1.3.4 Énergie Rayonnante	17
1.3.5 Énergie Électrique	17
1.3.6 Énergie Thermique	17
1.3.7 Énergie Nucléaire	18
1.4 Les énergies non renouvelables : Définition et caractéristiques	18
1.4.1 Exemples et principes de fonctionnement	18
1.4.2 Analyse des Avantages et Inconvénients	20
1.5 Les énergies renouvelables : Définition et caractéristiques	21
1.5.1 Exemples et principes de fonctionnement	21
1.5.2 Analyse des Avantages et Inconvénients	23
1.6 La Transition Énergétique Mondiale : De l'Ère Fossile vers la Durabilité	25
1.6.1 Contexte Historique : L'Hégémonie des Combustibles Fossiles	25
1.6.2 Les Déclencheurs de la Mutation Énergétique	25
1.6.3 Les Piliers de la Transition: Décarbonation et Décentralisation	25
1.6.4 Vers un Objectif « Net Zero » d'ici 2050.....	26
1.7 Conclusion.....	26

2	Introduction aux nanogénérateurs triboélectriques (TENG)	28
2.1	Introduction	28
2.2	L'effet triboélectrique	28
2.3	Récupération d'énergie	31
2.4	Modes de fonctionnement des TENG.....	35
2.5	Principe de fonctionnement	36
2.6	Modélisation électrique du TENG	37
2.7	Conclusion.....	39
3	simulation et commande	40
3.1	Introduction	40
3.2	Architecture globale du système.....	40
3.3	La source photovoltaïque	41
3.4	Générateur Triboélectrique (TENG).....	42
3.4.1	Modèle de circuit équivalent et paramètres	43
3.4.2	Architecture du système de conditionnement	43
3.4.3	Comportement du TENG à vide.....	44
3.4.4	Comportement du TENG en charge	45
3.4.5	Tension et courant de sortie après le convertisseur Buck	46
3.5	la batterie :	48
3.6	Convertisseur Boost DC-DC avec commande MPPT	49
3.7	Convertisseur bidirectionnel Buck-Boost	50
3.7.1	Mode Boost (décharge de la batterie)	51
3.7.2	Mode Buck (charge de la batterie).....	51
3.7.3	Rôle des composants principaux	51
3.8	Chaîne de conversion et de conditionnement de l'énergie de la batterie vers le capteur.....	52
3.9	charge et capteur:	52
3.10	Stratégie de commande du système.....	53
3.10.1	Commande MPPT du générateur photovoltaïque.....	53
3.10.2	Système de Gestion d'Énergie (EMS)	55
3.10.3	Commande du convertisseur Buck-Boost bidirectionnel	58
3.10.4	Conclusion.....	58
4	Interprétation des résultats	60
4.1	Introduction	60
4.2	Conditions et Paramètres de Simulation	60
4.3	Simulation 1 : Irradiation Croissante ($200 \rightarrow 1000 \text{ W/m}^2$).....	61
4.3.1	Profil d'irradiation et température	61
4.3.2	Tension et courant du panneau photovoltaïque	61
4.3.3	Bilan de puissance (P_{PV} , P_{load} , P_{bat}).....	62
4.3.4	Courant et tension de la batterie.....	63
4.3.5	État de charge de la batterie (SOC)	64
4.3.6	Tension de la charge (V_{load}) — Simulation 1.....	65
4.4	Simulation 2 : Irradiation Décroissante ($1000 \rightarrow 200 \text{ W/m}^2$).....	66
4.4.1	Profil d'irradiation et température	66
4.4.2	Tension et courant du panneau photovoltaïque	67
4.4.3	Bilan de puissance (P_{PV} , P_{load} , P_{bat}).....	68

4.4.4	Courant et tension de la batterie.....	69
4.4.5	État de charge de la batterie (SOC)	70
4.4.6	Tension de la charge (Vload) — Simulation 2.....	71
4.5	Alimentation du Capteur Triboélectrique.....	72
4.5.1	Phase transitoire : Batterie vers Nanogénérateur.....	72
4.5.2	Puissance du capteur en régime permanent	73
4.5.3	Tension d'alimentation du capteur (V_{cap})	73
4.6	Analyse Comparative des Deux Simulations.....	74
4.7	Conclusion.....	75
Conclusion générale		76
Bibliographie		LXXVIII

Liste des figures

1.1	Le charbon [5]	18
1.2	Le pétrole [6]	19
1.3	Gaz naturel [7]	19
1.4	Centrale nucléaire de Gösgen, Suisse [8]	20
1.5	panneaux solaires [11]	22
1.6	Les éoliennes [12]	22
1.7	STEP [13]	22
1.8	La biomasse [14]	23
1.9	La géothermie [15]	23
1.10	vers une énergie verte [19]	26
2.1	Exemple courant de triboélectrification[20]	29
2.2	Série triboélectrique de quelques matériaux [28]	30
2.3	Générateur de Van de Graaff [22]	31
2.4	Ordres de grandeur de la puissance et applications correspondantes [24].....	32
2.5	Illustration de différentes sources d'énergie environnementales pouvant alimenter des systèmes de capteurs intelligents sans fil	33
2.6	Illustration de la récupération d'énergie mécanique à partir de différentes sources	34
2.7	Illustration des quatre principaux modes de fonctionnement des TENG [26].....	35
2.8	Schéma du circuit du TENG	37
2.9	Liste de polymères avec leur densité de charge de surface triboélectrique [18].....	37
3.1	Architecture globale du système.....	41
3.2	PV array bloc.....	42
3.3	Schéma Simulink complet du système TENG – Redresseur – Buck – Capteur.....	43
3.4	Tension du TENG avant redressement – Circuit ouvert	44
3.5	Tension du TENG après redressement et filtrage – Circuit ouvert	45
3.6	Tension du TENG avant redressement – En charge.....	45
3.7	Tension du TENG après redressement et filtrage – En charge.....	46
3.8	Tension V_{teng} et courant I_{teng} en sortie du convertisseur Buck	47
3.9	battery bloc	48

3.10	convertisseur boost	50
3.11	convertisseur buck boost	51
3.12	Chaîne de conversion et de conditionnement de l'énergie du batterie vers le capteur	52
3.13	charge et capteur	53
3.14	Architecture décisionnelle du système EMS hybride	57
4.1	Profil d'irradiation et température – Simulation 1	61
4.2	Tension V_{PV} – Simulation 1	62
4.3	Courant I_{PV} – Simulation 1	62
4.4	Bilan de puissance P_{PV} , P_{load} et P_{bat} – Simulation 1	63
4.5	Courant de batterie I_{bat} – Simulation 1	64
4.6	Tension de batterie V_{bat} – Simulation 1	64
4.7	État de charge SOC – Simulation 1	65
4.8	Tension de la charge V_{load} – Simulation 1	66
4.9	Profil d'irradiation et température – Simulation 2	67
4.10	Tension V_{PV} – Simulation 2	68
4.11	Courant I_{PV} – Simulation 2	68
4.12	Bilan de puissance P_{PV} , P_{load} et P_{bat} – Simulation 2	69
4.13	courant de batterie I_{bat} – Simulation 2	70
4.14	Tension de batterie V_{bat} – Simulation 2	70
4.15	État de charge SOC – Simulation 2	71
4.16	Tension de la charge V_{load} – Simulation 2	72
4.17	Puissances P_{cap} , P_{batcap} et P_{teng} – Transition batterie vers nanogénérateur	73
4.18	Tension d'alimentation du capteur V_{cap}	74

Liste des tableaux

3.1	Caractéristiques du panneau et estimation d'une cellule photovoltaïque	42
3.2	Paramètres du modèle ECM du TENG	43
3.3	Paramètres des étages de conditionnement.....	44
3.4	Grandeurs caractéristiques du TENG – Comparaison à vide et en charge	47
3.5	Les paramètres de la batterie	49
4.1	Paramètres communs des deux simulations	60
4.2	Évolution de I_{PV} et V_{PV} en fonction de l'irradiation – Simulation 1	62
4.3	Évolution de I_{PV} et V_{PV} en fonction de l'irradiation – Simulation 2	68
4.4	Comparaison des résultats des deux simulations	74

Liste des abréviations

Acronyme	Signification
ESSAT	Ecole Supérieure en Sciences Appliquées
PV	Photovoltaïque
TENG	Triboelectric Nanogenerator
ECM	Equivalent Circuit Model
PI	Proportionnel-Intégral
EMS	Energy Management System
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PWM	Pulse Width Modulation
DC	Direct Current
SOC	State Of Charge
EnR	Énergies Renouvelables
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
IEA	International Energy Agency
IRENA	International Renewable Energy Agency

Introduction générale

L'énergie constitue le pilier central de tout processus physique, se manifestant sous des apparences multiples telles que la chaleur, le mouvement ou l'électricité. Pour l'ingénieur, l'intérêt majeur réside dans sa capacité à être captée et convertie d'une forme naturelle brute vers une forme utile et exploitable, facilitant ainsi le développement des technologies durables [1].

Depuis les prémices de la civilisation, la quête d'énergie a été le véritable moteur du progrès humain et de la transformation des sociétés. Initialement restreint à l'exploitation de la biomasse traditionnelle et de la force musculaire, ce besoin a connu une croissance exponentielle avec l'avènement des révolutions industrielles. L'humanité s'est alors massivement tournée vers les ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) pour soutenir une urbanisation rapide, propulser les moyens de transport et alimenter une industrialisation à grande échelle. Ce modèle énergétique, bien qu'ayant permis un essor technologique et économique sans précédent, a reposé sur une logique d'extraction linéaire ignorant la finitude des ressources planétaires [2].

Aujourd'hui, les conséquences de cette hyper-dépendance aux hydrocarbures sont manifestes. Face à l'épuisement inéluctable de ces réserves géologiques et à l'urgence climatique dictée par l'accumulation alarmante des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la pérennité du modèle de consommation actuel est profondément remise en question. La recherche de la durabilité est ainsi devenue l'impératif absolu du XXI^e siècle. Cette prise de conscience mondiale a précipité une transition énergétique majeure, orientant la recherche scientifique et les investissements industriels vers les énergies renouvelables. Des ressources naturelles inépuisables et décarbonées, telles que le rayonnement solaire et l'énergie cinétique du vent, se présentent désormais comme les alternatives les plus viables pour garantir la sécurité énergétique de demain.

Cependant, l'intégration à grande échelle de ces sources propres se heurte à des obstacles techniques d'une grande complexité. Contrairement aux centrales thermiques conventionnelles qui offrent une production pilotable et constante, la génération d'électricité issue des systèmes photovoltaïques ou éoliens est intrinsèquement intermittente et stochastique. Elle demeure strictement assujettie aux fluctuations météorologiques (alternance jour/nuit, passage nuageux, variations du vent). Cette variabilité brutale pose un défi critique pour la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques modernes, où l'équilibre strict entre la production et la consommation doit être maintenu à chaque instant pour éviter l'effondrement du système (blackout) [3].

C'est précisément à cette intersection que le rôle de l'ingénierie électrique prend toute son importance. Pour surmonter ces contraintes d'intermittence, l'axe de recherche contemporain ne se limite plus à la simple captation de l'énergie, mais se concentre intensivement sur l'amélioration de l'efficacité globale des systèmes de conversion et de gestion. Il devient impératif de concevoir des architectures hybrides résilientes, associant plusieurs sources de production à des systèmes de stockage électrochimique (batteries) performants. L'enjeu actuel réside dans le développement de stratégies de commande avancées et de convertisseurs statiques optimisés, capables de lisser la puissance injectée, de maximiser l'extraction d'énergie et de garantir une alimentation continue et de haute qualité.

C'est précisément dans ce contexte de transition et d'optimisation technologique que s'inscrit notre travail de recherche, menant à la formulation de la problématique suivante :

Problématique

L'intégration massive et décentralisée de sources d'énergie renouvelables, qu'elles soient interconnectées au réseau électrique global ou exploitées en mode autonome (site isolé chez le consommateur), soulève des défis d'ingénierie complexes. L'intermittence inhérente à ces ressources, couplée à la dynamique de charge variable des utilisateurs, rend l'équilibre entre la production et la demande extrêmement sensible.

Dès lors, la question centrale de notre étude se pose ainsi :

Comment concevoir une architecture de conversion efficace et optimiser les stratégies de gestion d'un système hybride multisources afin de garantir la stabilité, la continuité et la qualité de l'alimentation électrique, tout en maximisant l'exploitation des ressources disponibles ? De cette problématique majeure découlent plusieurs sous-questions critiques :

.Comment gérer efficacement l'interopérabilité entre des sources d'énergies aux caractéristiques électriques et dynamiques fondamentalement différentes ?

.Quels types d'algorithmes et de topologies de convertisseurs statiques permettent de lisser les fluctuations de puissance et de prolonger la durée de vie des systèmes de stockage électrochimique ?

.Quelle stratégie d'optimisation adopter pour assurer une répartition intelligente des flux énergétiques en temps réel ?

Afin de répondre à notre problématique, nous formulons les trois hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 (Optimisation de l'EMS) : L'application d'un algorithme d'optimisation avancée au sein de l'EMS permet d'assurer une répartition en temps réel des flux énergétiques, maximisant ainsi le rendement global du système hybride.

Hypothèse 2 (Longévité de la batterie) : Une gestion adaptative de l'état de charge (SOC) permet de limiter les sollicitations dynamiques sévères sur la batterie, prolongeant ainsi sa durée de vie utile.

Hypothèse 3 (Intégration du TENG) : Une coordination optimale des convertisseurs par l'EMS permet de valoriser l'apport du nanogénérateur triboélectrique tout en garantissant la stabilité du bus continu.

Afin de répondre à ces interrogations, ce mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires.

Le **premier chapitre** établit le cadre énergétique général du travail. Il présente les différentes formes d'énergie disponibles, distingue les sources fossiles des sources renouvelables, et analyse leurs avantages et inconvénients respectifs. Il aborde ensuite les enjeux de la transition énergétique mondiale et la nécessité de développer des architectures hybrides autonomes.

Le **deuxième chapitre** est consacré aux nanogénérateurs triboélectriques (TENG). Il expose le principe physique de l'effet triboélectrique, décrit les quatre modes de fonctionnement des TENG, et présente le modèle de circuit équivalent (ECM) retenu pour la simulation. Le positionnement du TENG comme source d'énergie mécanique ambiante pour les capteurs autonomes y est également justifié.

Le **troisième chapitre** présente la modélisation complète du système hybride sous MATLAB/Simulink. L'architecture globale du système est décrite, incluant le panneau photovoltaïque avec son algorithme MPPT, la batterie avec son convertisseur Buck-Boost bidirectionnel, et le TENG avec sa chaîne de conditionnement. La stratégie de commande PI et le système de gestion d'énergie (EMS) y sont également détaillés.

Le **quatrième chapitre** présente et interprète les résultats des simulations réalisées selon deux scénarios d'irradiation complémentaires — croissante et décroissante. Les performances du système en termes de stabilité du bus DC, de continuité d'alimentation et d'autonomie du capteur triboélectrique y sont analysées et validées.

Enfin, une **conclusion générale** synthétise les principaux résultats obtenus et propose des perspectives d'amélioration pour les travaux futurs.

La transition énergétique

1.1 Introduction

L'énergie constitue le moteur fondamental du développement humain et de la croissance économique mondiale. Depuis la révolution industrielle, la civilisation moderne s'est construite sur une dépendance quasi-exclusive aux énergies fossiles — charbon, pétrole et gaz naturel — dont l'exploitation intensive a permis des avancées technologiques et sociales sans précédent. Cependant, cette trajectoire énergétique a engendré des conséquences environnementales majeures, notamment l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, responsable du dérèglement climatique qui menace aujourd'hui les équilibres naturels et humains à l'échelle planétaire.

Face à ces enjeux, la transition énergétique s'impose comme une nécessité incontournable. Elle désigne le processus de transformation profonde des systèmes de production, de distribution et de consommation d'énergie, visant à réduire progressivement la part des énergies fossiles au profit des énergies renouvelables. Ces dernières, issues de ressources naturelles inépuisables telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse, offrent une alternative durable et respectueuse de l'environnement.

Ce chapitre présente un panorama général des différentes formes d'énergie disponibles, en distinguant les sources fossiles des sources renouvelables, et en analysant leurs avantages et inconvénients respectifs. Il aborde ensuite les motivations et les enjeux de la transition énergétique mondiale, ainsi que la volonté croissante d'améliorer et de perfectionner les technologies liées aux énergies renouvelables pour répondre aux défis énergétiques du XXI^e siècle.

1.2 L'énergie

Dans le domaine de la physique, l'énergie représente le potentiel intrinsèque d'un système à générer une action ou à induire un changement d'état de la matière. Elle est perçue comme une grandeur fondamentale qui, bien qu'elle change de forme à travers diverses interactions, demeure constante au sein d'un système isolé, conformément aux principes de la thermodynamique [3].

1.3 Les différentes formes de l'énergie

L'énergie se manifeste sous plusieurs aspects physiques, chacun jouant un rôle distinct dans les processus de conversion et de transport :

1.3.1 Énergie cinétique

Elle se manifeste par le mouvement d'une masse. Dans le contexte des énergies renouvelables, elle est captée par les pales des éoliennes pour être transformée en travail mécanique exploitable. Elle dépend directement de la vitesse du fluide ou de l'objet en mouvement.

1.3.2 Énergie potentielle

Cette forme représente le potentiel de travail accumulé par un corps en raison de sa position, notamment dans un champ gravitationnel. Elle est fondamentale dans le stockage d'énergie par pompage-turbinage (STEP), où l'eau en hauteur constitue une réserve énergétique.

1.3.3 Énergie chimique

Dérivée des interactions atomiques au sein de la matière, elle est libérée lors de réactions moléculaires. Pour l'ingénieur électricien, elle représente la forme de stockage prédominante dans les batteries, permettant de stabiliser les réseaux face à l'intermittence des sources.

1.3.4 Énergie rayonnante

Propagée sous forme de rayonnement électromagnétique (photons), elle est le moteur des systèmes photovoltaïques. Sa conversion directe en électricité sans pièce mobile constitue l'un des piliers de la transition énergétique actuelle.

1.3.5 Énergie électrique

Considérée comme le vecteur d'énergie par excellence, elle est générée par le flux de charges à travers un milieu conducteur. Sa valeur réside dans sa grande flexibilité et sa capacité à être transportée sur de longues distances avec des pertes maîtrisées.

1.3.6 Énergie thermique

Elle traduit le degré d'agitation microscopique des particules d'un système. Bien qu'elle soit souvent perçue comme une perte (effet Joule), elle est le produit recherché dans les applications de chauffage ou les centrales solaires à concentration.

1.3.7 Énergie nucléaire

Concentrée au cœur de l'atome, elle correspond aux forces de liaison entre les nucléons. Sa libération, par fission ou fusion, permet de produire des quantités massives de chaleur avec une densité énergétique inégalée par rapport aux sources conventionnelles [4].

Après avoir présenté les différentes formes sous lesquelles l'énergie peut se manifester, il est nécessaire de s'intéresser aux sources permettant sa production. Ces sources peuvent être classées en deux grandes catégories : les énergies non renouvelables et les énergies renouvelables. Nous commencerons par l'étude des énergies non renouvelables, qui ont longtemps constitué la base du développement industriel mondial.

1.4 Les énergies non renouvelables : Définition et caractéristiques

Les énergies non renouvelables regroupent les ressources énergétiques dont les réserves terrestres sont limitées et ne se régénèrent pas à l'échelle du temps humain. Leur formation résulte de processus géologiques complexes s'étendant sur des millions d'années. Une fois consommées, ces ressources sont définitivement épuisées, ce qui les distingue fondamentalement des flux énergétiques naturels et inépuisables.

1.4.1 Exemples et principes de fonctionnement

Le charbon

Une roche sédimentaire issue de la décomposition de matières organiques végétales. Il reste l'une des sources les plus utilisées au monde pour la production d'électricité de base en raison de son abondance relative.



Figure 1.1: Le charbon [5]

Le pétrole

Un hydrocarbure liquide concentré dans des gisements souterrains. Il constitue le pilier du secteur des transports et de l'industrie pétrochimique mondiale grâce à sa haute densité énergétique.



Figure 1.2: Le pétrole [6]

Le gaz naturel

Composé principalement de méthane, il est souvent considéré comme la moins polluante des énergies fossiles lors de sa combustion. Il est privilégié pour sa grande flexibilité dans la production thermique et électrique.



Figure 1.3: Gaz naturel [7]

L'énergie Nucléaire (Fissile)

Bien qu'elle ne soit pas fossile, elle est classée parmi les énergies non renouvelables car elle dépend de l'uranium, une ressource minière limitée. Elle repose sur la fission des noyaux atomiques pour libérer une quantité massive de chaleur.



Figure 1.4: Centrale nucléaire de Gösgen, Suisse [8]

1.4.2 Analyse des avantages et inconvénients

Opérationnel

Avantages

Pilotabilité : Elles permettent une production d'énergie stable et continue, indépendamment des conditions climatiques.

Désavantages

Épuisement : Les réserves mondiales diminuent inévitablement, entraînant une hausse des coûts d'extraction.

Économique

Avantages

Densité énergétique : Elles libèrent une grande quantité d'énergie pour un faible volume de combustible.

Désavantages

Géopolitique : La dépendance vis-à-vis des pays producteurs crée des tensions et une volatilité des prix sur le marché.

Infrastructure

Avantages

Technologie mature : Les installations (centrales, réseaux) sont déjà optimisées et fonctionnelles à grande échelle.

Désavantages

Impact environnemental : Émissions massives de gaz à effet de serre (CO₂) et de polluants atmosphériques (SO_x, NO_x).

Sécurité

Avantages

Facilité de stockage : Les combustibles fossiles sont facilement transportables et stockables sous forme physique.

Désavantages

Gestion des déchets : Problématique complexe des déchets radioactifs pour le nucléaire et des cendres pour le charbon [9]-[10].

Malgré leur contribution majeure au développement économique et industriel, les énergies non renouvelables présentent plusieurs limites liées à leur caractère épuisable et à leur impact environnemental. Face à ces contraintes, l'intérêt s'est progressivement porté vers des alternatives plus durables : les énergies renouvelables.

1.5 Les énergies renouvelables : Définition et caractéristiques

Les énergies renouvelables (EnR) désignent l'ensemble des ressources énergétiques issues de flux naturels, cycliques et théoriquement inépuisables à l'échelle du temps humain. Contrairement aux énergies conventionnelles, leur exploitation repose sur la capture de phénomènes physiques constants (rayonnement solaire, mouvements atmosphériques, marées) ou biologiques. Elles se distinguent par un impact carbone réduit, jouant un rôle central dans la transition vers des systèmes énergétiques durables et décarbonés.

1.5.1 Exemples et principes de fonctionnement

L'énergie solaire

Elle exploite le rayonnement électromagnétique du soleil. On distingue le photovoltaïque (PV), qui convertit directement les photons en électrons, et le solaire thermique, qui utilise la chaleur pour chauffer un fluide ou produire de la vapeur.



Figure 1.5: panneaux solaires [11]

L'énergie éolienne

Elle transforme l'énergie cinétique des masses d'air en énergie mécanique via des pales, puis en électricité grâce à une génératrice. Elle est caractérisée par une forte variabilité selon les conditions météorologiques.



Figure 1.6: Les éoliennes [12]

L'énergie hydraulique

Elle utilise la force gravitationnelle de l'eau (chutes ou courants) pour actionner des turbines. C'est actuellement la source renouvelable la plus stable et la plus mature techniquement pour la production de masse.



Figure 1.7: STEP [13]

La biomasse

Elle provient de la valorisation des matières organiques (bois, déchets agricoles, biogaz). Elle est considérée comme neutre en carbone car le CO₂ libéré lors de sa combustion a été préalablement absorbé par les plantes lors de leur croissance.



Figure 1.8: La biomasse [14]

La géothermie

Elle consiste à extraire la chaleur stockée dans le sous-sol terrestre pour des besoins de chauffage ou de production d'électricité, offrant une source d'énergie constante et indépendante du climat.

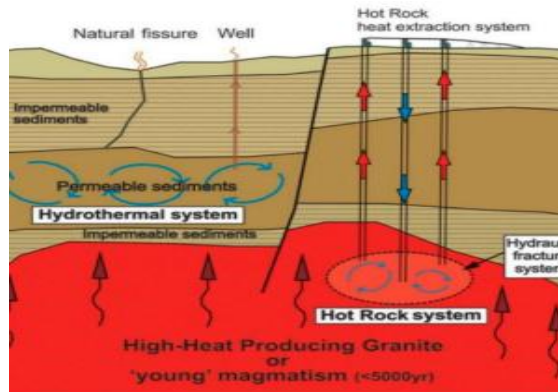


Figure 1.9: La géothermie [15]

1.5.2 Analyse des avantages et inconvénients

Environnement

Avantages

Faible empreinte carbone : Réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution atmosphérique.

Désavantages

Emprise au sol : Certaines installations (parcs solaires ou éoliens) nécessitent de grandes surfaces de terrain.

Ressources

Avantages

Inépuisabilité : Dépendance à des flux naturels gratuits et disponibles partout de manière décentralisée.

Désavantages

Intermittence : La production dépend des cycles naturels (jour/nuit, vent), ce qui complique l'équilibre du réseau électrique.

Économie

Avantages

Indépendance énergétique : Réduit la facture énergétique nationale en limitant l'importation de combustibles fossiles.

Désavantages

Coûts initiaux : L'investissement de départ (CAPEX) reste élevé, bien que les coûts d'exploitation (OPEX) soient faibles.

Technologie

Avantages

Modularité : Possibilité d'installation à petite échelle (micro-réseaux) ou à grande échelle (centrales).

Désavantages

Besoin de stockage : Nécessite des solutions coûteuses (batteries, hydrogène) pour gérer le déphasage entre production et consommation [1]-[9].

L'essor des énergies renouvelables ne résulte pas uniquement d'une évolution technologique, mais s'inscrit dans une transformation profonde du modèle énergétique mondial. Cette évolution, connue sous le nom de transition énergétique, vise à réduire la dépendance aux combustibles fossiles tout en favorisant des sources d'énergie plus respectueuses de l'environnement.

1.6 La Transition Énergétique Mondiale : De l'Ère Fossile vers la Durabilité

1.6.1 Contexte Historique : L'Hégémonie des Combustibles Fossiles

Depuis la première révolution industrielle au XIXe siècle, le développement socio-économique des nations a été intrinsèquement lié à l'exploitation des ressources carbonées. Le charbon a d'abord servi de moteur principal à l'industrie sidérurgique et au transport ferroviaire. Au XXe siècle, l'avènement du pétrole et du gaz naturel a redéfini la mobilité mondiale et la production d'électricité de masse. Ce modèle, caractérisé par une production centralisée et une forte intensité carbone, a permis une croissance sans précédent, mais au prix d'une dépendance géopolitique et d'une accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

1.6.2 Les Déclencheurs de la Mutation Énergétique

Le basculement vers un nouveau paradigme s'est opéré sous l'effet de deux facteurs majeurs. D'une part, les chocs pétroliers des années 1970 ont mis en évidence la vulnérabilité des économies face à la finitude des ressources fossiles. D'autre part, les rapports successifs du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ont scientifiquement établi le lien entre les émissions anthropiques de CO_2 et le réchauffement climatique. L'Accord de Paris (2015) a marqué un tournant diplomatique décisif, engageant la communauté internationale à limiter l'élévation de la température mondiale à moins de $1,5^\circ C$ par rapport aux niveaux préindustriels.

1.6.3 Les Piliers de la Transition: Décarbonation et Décentralisation

La transition énergétique actuelle repose sur une restructuration profonde du mix énergétique mondial. Elle s'articule autour de trois axes fondamentaux, souvent appelés les « 3D » :

1. Décarbonation : Substitution des centrales thermiques à flamme par des sources renouvelables (solaire photovoltaïque, éolien, hydraulique) dont l'empreinte carbone est quasi nulle en phase d'exploitation.

2. Décentralisation : Passage d'un modèle de production unidirectionnel vers une architecture distribuée. Dans ce schéma, les consommateurs deviennent des « prosommateurs » (producteurs-consommateurs), intégrant des micro-réseaux (Microgrids) au niveau local.

3. Digitalisation : Utilisation des technologies de l'information et de la communication pour gérer l'intermittence des énergies propres. L'émergence des Smart Grids

permet d'équilibrer l'offre et la demande en temps réel grâce à des algorithmes de gestion intelligente et des systèmes de stockage avancés.

1.6.4 Vers un Objectif « Net Zero » d'ici 2050

Selon les trajectoires définies par les organismes internationaux, l'avenir énergétique mondial s'oriente vers la neutralité carbone à l'horizon 2050. Cela implique une électrification massive des usages, notamment dans le secteur des transports (véhicules électriques) et du chauffage. Les défis techniques restent de taille : l'optimisation du rendement des convertisseurs de puissance, l'amélioration de la densité énergétique des batteries et la résilience des infrastructures réseau face à la variabilité climatique. Pour l'ingénieur, cette transition représente non seulement un défi technologique, mais aussi une opportunité d'innover vers des solutions énergétiques plus sobres et équitables [16]-[17]-[18].



Figure 1.10: vers une énergie verte [19]

1.7 Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir un état des lieux complet du paysage énergétique mondial, en mettant en évidence les limites des énergies fossiles face aux impératifs environnementaux et climatiques actuels. L'analyse comparative des différentes sources d'énergie a montré que les énergies renouvelables représentent une alternative viable et prometteuse, capable de répondre aux besoins énergétiques croissants tout en préservant les ressources naturelles pour les générations futures.

La transition énergétique, portée par une volonté politique et scientifique internationale, constitue un levier essentiel pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Elle s'accompagne d'une dynamique d'innovation technologique intense, visant à améliorer l'efficacité, la fiabilité et le coût des systèmes de production d'énergie renouvelable.

C'est dans ce contexte de transformation énergétique que s'inscrit le travail présenté dans ce mémoire. Parmi les technologies émergentes qui incarnent cette évolution, les nanogénérateurs triboélectriques représentent une avancée particulièrement prometteuse, permettant de récupérer l'énergie mécanique ambiante pour alimenter des systèmes autonomes à faible consommation. Le chapitre suivant sera consacré à la présentation détaillée de cette technologie et de ses principes de fonctionnement.

Introduction aux nanogénérateurs triboélectriques (TENG)

2.1 Introduction

Dans le contexte de la transition énergétique et du développement des systèmes autonomes à faible consommation, la récupération d'énergie mécanique ambiante représente une voie de recherche particulièrement prometteuse. Parmi les technologies émergentes dans ce domaine, les nanogénérateurs triboélectriques (TENG) se distinguent par leur capacité à convertir des mouvements mécaniques de faible amplitude — tels que les vibrations, le vent ou les mouvements humains — en énergie électrique exploitable, sans recourir à une source d'alimentation externe.

Découverts en 2012 par l'équipe du professeur Zhong Lin Wang, les TENG reposent sur la combinaison de deux phénomènes physiques bien connus : l'effet triboélectrique, qui génère des charges électrostatiques par contact et frottement entre deux matériaux de natures différentes, et l'effet d'induction électrostatique, qui permet de collecter ces charges sous forme de courant électrique. Cette synergie confère aux TENG des propriétés uniques : légèreté, faible coût de fabrication, grande variété de matériaux utilisables et adaptabilité à de nombreuses sources d'énergie mécanique ambiante.

Ce chapitre est consacré à la présentation des nanogénérateurs triboélectriques. Il commence par l'exposé du principe physique de l'effet triboélectrique, puis décrit les quatre modes de fonctionnement des TENG, avant d'aborder les caractéristiques électriques et les domaines d'application de cette technologie. Ces bases théoriques constituent le fondement indispensable à la compréhension du rôle joué par le TENG dans le système hybride développé dans ce mémoire.

2.2 L'effet triboélectrique

L'effet triboélectrique est un type de transfert de charge par lequel deux matériaux quelconques, après avoir été mis en contact, acquièrent des charges électriques de signes opposés. Ce phénomène peut être observé dans la vie quotidienne en frottant une tige en plastique avec un tissu constitué de pratiquement n'importe quel matériau courant, comme la fourrure animale, le coton, la laine, le polyester ou un mélange de tissus présents dans les vêtements contemporains. Lorsqu'elle est rapprochée d'une feuille de papier, une telle tige électrisée peut facilement attirer et

soulever celle-ci. De plus, une tige de ce type repousse d'autres objets électrisés constitués du même matériau. Cette répulsion peut être mise en évidence en suspendant deux tiges à l'aide de fils et en les rapprochant l'une de l'autre.

De telles expériences confirment l'existence de deux types de charges électriques mesurables, opposées l'une à l'autre, la charge totale étant déterminée par une somme algébrique tenant compte du signe. Par exemple, l'attraction électrostatique entre une tige plastique chargée et une feuille de papier neutre s'explique par la séparation temporaire des charges (polarisation électrique ou moment dipolaire) au sein du papier. Une force nette apparaît car les charges les plus proches du dipôle sont attirées plus fortement par le champ non uniforme de la tige. En revanche, dans un champ électrique homogène (comme entre deux plaques parallèles d'un condensateur), le papier se polarise sans qu'il y ait de force nette d'attraction.

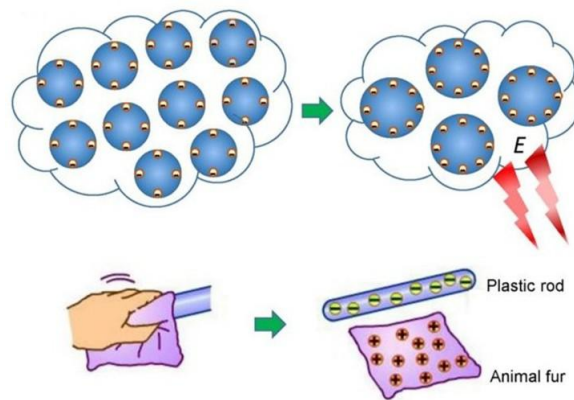


Figure 2.1: Exemple courant de triboélectrification[20]

La polarité et l'intensité des charges générées dépendent de nombreux paramètres tels que la nature des matériaux, la rugosité de surface, la température, les contraintes mécaniques, etc. En raison du caractère imprévisible de l'effet triboélectrique, seules des généralisations qualitatives peuvent être établies. Bien que ce phénomène soit connu depuis des millénaires, sa compréhension fondamentale reste limitée. Diverses méthodes ont été développées pour caractériser la triboélectrification, mais elles manquent souvent de contrôle précis ou ne permettent pas d'observer directement l'interface triboélectrique, ce qui rend difficile une compréhension quantitative du processus.

La majorité des recherches s'est concentrée sur la triboélectrification solide-solide, plutôt que sur les interactions solide-liquide, solide-gaz ou liquide-gaz. Cependant, même dans le cas solide-solide, la nature exacte des espèces de charge transférées reste incertaine, en particulier pour les isolants non ioniques. Cette incertitude a engendré des controverses dans la conception des matériaux utilisés pour les nanogénérateurs triboélectriques (TENG) [21].

Depuis cette découverte, de nombreuses tentatives ont été menées afin d'identifier un modèle universel de la triboélectricité entre différents matériaux.

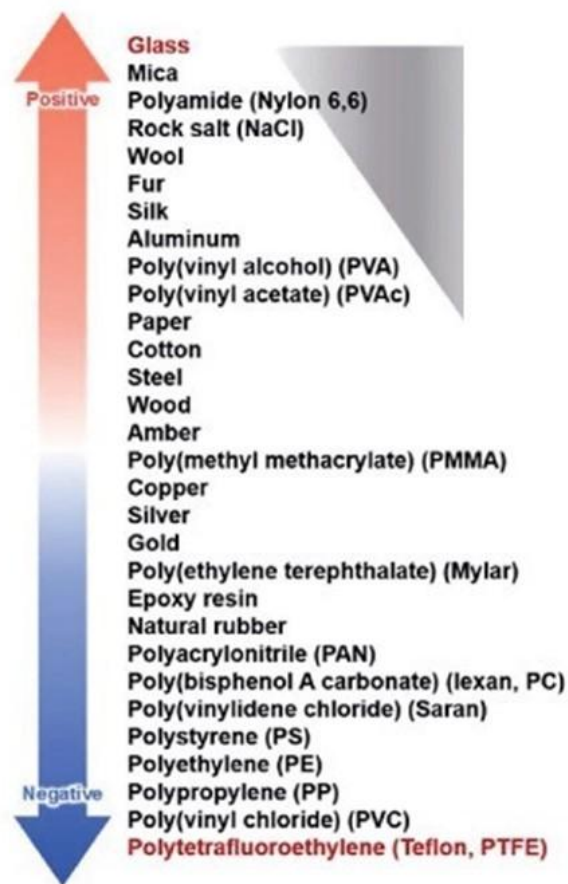


Figure 2.2: Série triboélectrique de quelques matériaux [28]

Il est généralement admis que ce phénomène résulte d'un transfert d'électrons d'un matériau vers un autre lors du contact. Une classification largement reconnue, appelée série triboélectrique (Fig. 2.2), sert de référence. Ainsi, les matériaux peuvent être considérés comme jouant le rôle d'anode ou de cathode. Les différences d'électronégativité, liées à la structure moléculaire ou matérielle, sont considérées comme la principale cause de cette charge. Pour que cette charge persiste, les matériaux triboélectriques doivent présenter une faible conductivité, étant souvent des isolants. En raison de ces différences, certains matériaux cèdent des électrons tandis que d'autres les captent, ce qui conduit à l'apparition de charges triboélectriques en surface. Il est donc possible d'établir une classification des matériaux selon leur tendance à se comporter comme cathode (+) ou anode (-), comme illustré en Fig. 2.2.

L'énergie mécanique à l'origine de ces charges électrostatiques peut être convertie en énergie électrique à l'aide d'un générateur. L'un des générateurs triboélectriques les plus connus est le générateur de Van de Graaff, inventé en 1929. Il exploite les charges électrostatiques accumulées par triboélectrification. Un générateur simple se compose de deux rouleaux de matériaux différents, dont l'un est entouré d'une sphère métallique creuse, et d'une courroie en caoutchouc (ou autre matériau diélectrique flexible), comme illustré en Fig. 2.3.

Les générateurs de Van de Graaff produisent des tensions élevées ; en l'absence de décharge, aucun courant ne circule. La tension maximale théorique pour une sphère polie de 30 cm de diamètre est d'environ 450 kV. Dans ce projet, un nanogénéra-

teur est étudié, impliquant des niveaux de tension plus faibles, et destiné à des applications de récupération d'énergie (energy harvesting).

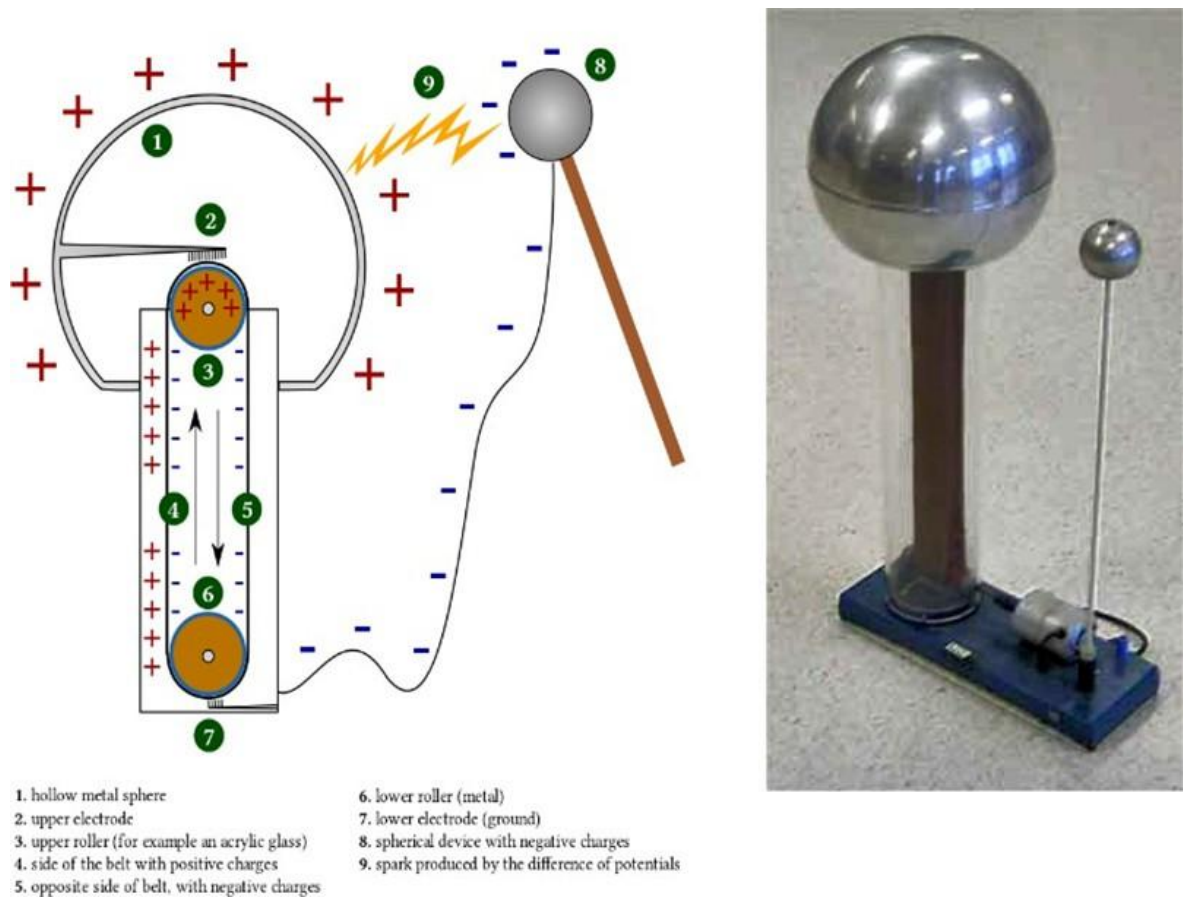


Figure 2.3: Générateur de Van de Graaff [22]

Bien que l'effet triboélectrique soit connu depuis longtemps et exploité dans certains dispositifs électrostatiques, son potentiel en tant que source d'énergie n'a véritablement suscité l'intérêt de la communauté scientifique que récemment. Cette évolution s'inscrit dans le contexte plus large de la récupération d'énergie ambiante, un domaine visant à alimenter des systèmes électroniques autonomes à partir des ressources énergétiques disponibles dans l'environnement.

2.3 Récupération d'énergie

D'une manière générale, le terme « énergie » désigne la puissance nécessaire au fonctionnement d'une usine, d'une ville ou d'un pays. On parle alors de macroénergie, généralement quantifiée à l'échelle du mégawatt (MW) ou du gigawatt (GW). Les caractéristiques principales des technologies énergétiques à grande échelle concernent la production globale de puissance, la stabilité, le rendement de conversion ainsi que le coût. Parmi ces critères, le coût demeure souvent le facteur le plus déterminant.

L'augmentation continue de la demande énergétique constitue l'un des défis technologiques majeurs de notre époque. En moyenne, la consommation mondiale d'énergie augmente de 1 à 2% par an, et la majorité de cette énergie provient

encore des combustibles fossiles [23]. Afin de répondre à cette croissance tout en limitant les effets du changement climatique, des efforts sont déployés pour réduire la consommation énergétique et développer des sources d'énergie alternatives.

Par ailleurs, avec la forte croissance du nombre d'appareils électroniques portables, le développement des technologies de récupération d'énergie devient essentiel, étant donné que la plupart de ces dispositifs fonctionnent à l'aide de batteries.

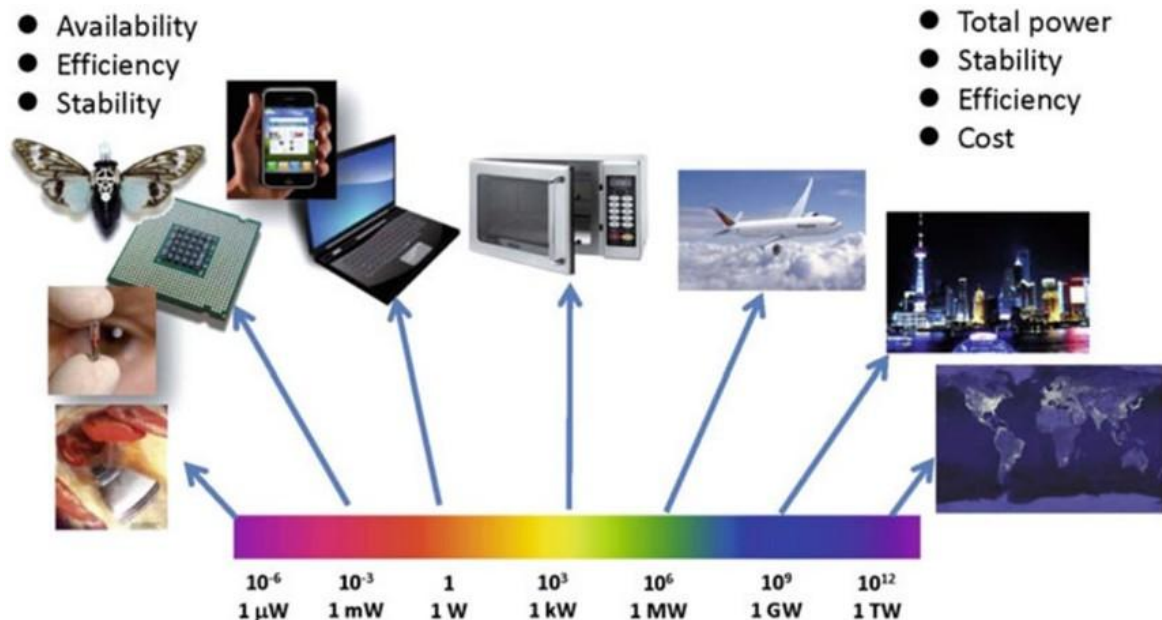


Figure 2.4: Ordres de grandeur de la puissance et applications correspondantes [24]

Bien que la consommation d'énergie de chaque dispositif soit relativement faible, leur nombre total est extrêmement élevé. Avec l'augmentation de l'interconnexion et de l'automatisation à l'échelle mondiale, un très grand nombre de capteurs sera déployé partout dans le monde. L'alimentation d'un tel réseau de capteurs uniquement par batteries s'avère coûteuse et difficile à maintenir, car il est nécessaire de localiser les dispositifs, de remplacer les batteries et de vérifier régulièrement leur bon fonctionnement. La récupération de l'énergie à partir de l'environnement dans lequel le capteur est utilisé constitue une solution prometteuse. Ce domaine relève de la miniaturisation de l'énergie, qui vise à fournir une alimentation durable, autonome et sans maintenance pour les micro- et nanosystèmes, contrairement à la macroénergie destinée à alimenter des villes ou des pays, comme illustré à la Fig. 2.4.

Afin d'améliorer le rendement, la stabilité et la fiabilité des nanogénérateurs, des recherches supplémentaires sont nécessaires. Pour chaque application, les méthodes d'optimisation permettent de déterminer les meilleures conceptions électriques et structurales ainsi que les matériaux les plus adaptés. Ces améliorations permettent d'augmenter la densité de puissance et la durée de vie des nanogénérateurs.

Par exemple, pour accroître leur résistance à l'usure, aux températures élevées et aux variations d'humidité, des solutions d'encapsulation efficaces sont indispensables. L'amélioration du conditionnement (packaging) et l'utilisation de matériaux durables contribuent à renforcer la fiabilité des nanogénérateurs [25].

Les systèmes de récupération d'énergie ne peuvent pas remplacer entièrement

les principales sources d'énergie telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, mais ils peuvent en réduire l'utilisation dans certaines applications. Jusqu'à présent, la majorité des capteurs sont alimentés soit par le réseau électrique, soit par des batteries, ce qui représente non seulement un poids supplémentaire, mais aussi une source de déchets difficile à gérer.

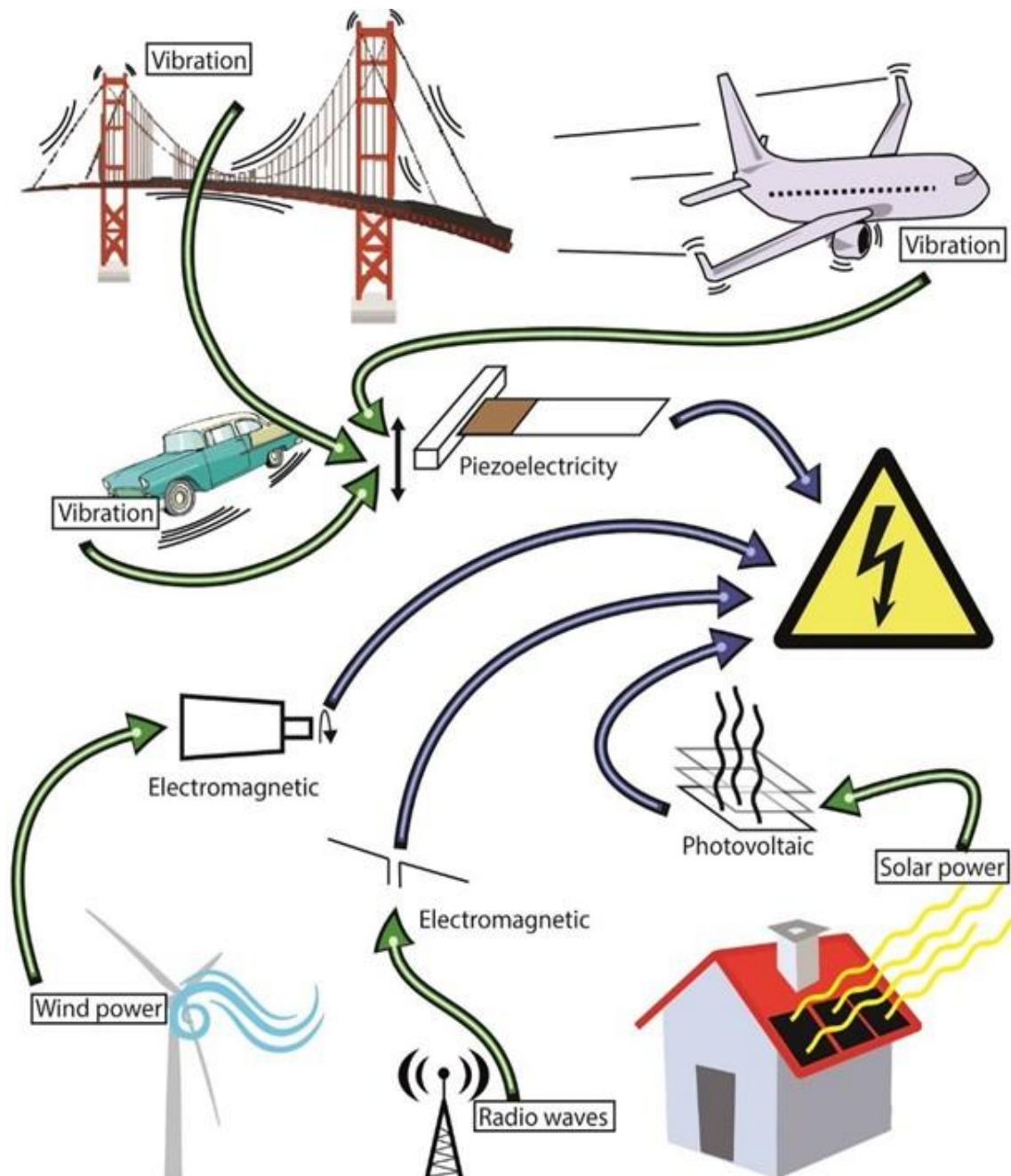


Figure 2.5: Illustration de différentes sources d'énergie environnementales pouvant alimenter des systèmes de capteurs intelligents sans fil

Cependant, les batteries ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées, ce qui impose de les installer dans des emplacements facilement accessibles. Toutefois, cela n'est pas toujours possible, notamment dans certaines applications comme l'automobile. Il apparaît donc clairement que les batteries présentent plusieurs inconvénients qu'il serait préférable de surmonter.

Un autre problème majeur lié à l'utilisation massive de l'électronique est que la majorité de l'énergie consommée aujourd'hui provient de ressources naturelles non renouvelables. De nombreux chercheurs s'intéressent ainsi à des solutions alternatives afin de prévenir une éventuelle crise énergétique. Une solution prometteuse est la récupération d'énergie, caractérisée par des sources d'énergie propres et autonomes.

L'expression « récupération d'énergie » (energy harvesting) désigne la capacité des dispositifs électroniques à capter directement l'énergie perdue présente dans leur environnement. Grâce à ces dispositifs, il est possible de récupérer une quantité importante d'énergie qui serait autrement dissipée, comme illustré à la Fig. 2.6. Le champ d'application est très vaste : il est par exemple possible de surveiller l'état de santé des bâtiments et des machines tout en récupérant de l'énergie à partir de champs électromagnétiques, d'ondes radio, de vibrations ou encore de chaleur. Lorsqu'ils sont correctement gérés et surveillés, ces systèmes permettent de réduire la consommation d'énergie et la pollution.

En particulier, la récupération d'énergie mécanique constitue le sujet principal de ce projet. En effet, il existe de nombreuses sources d'énergie cinétique, telles que les vibrations, le vent, les vagues, les mouvements humains ou encore les mouvements des véhicules, qui ne sont pas efficacement exploitées par les méthodes conventionnelles et sont donc perdues. Cela s'explique par le fait que ces sources sont généralement caractérisées par de faibles fréquences, ce qui nécessite le développement de nouvelles technologies pour stocker l'énergie produite.

Cette énergie peut être utilisée pour alimenter des capteurs, supprimant ainsi le besoin d'une source d'alimentation externe ou de batteries, tout en réduisant la quantité et la longueur des câbles. Dans ce cas, on parle de capteurs autonomes (self-powered sensors). De plus, les mesures obtenues sont plus précises.

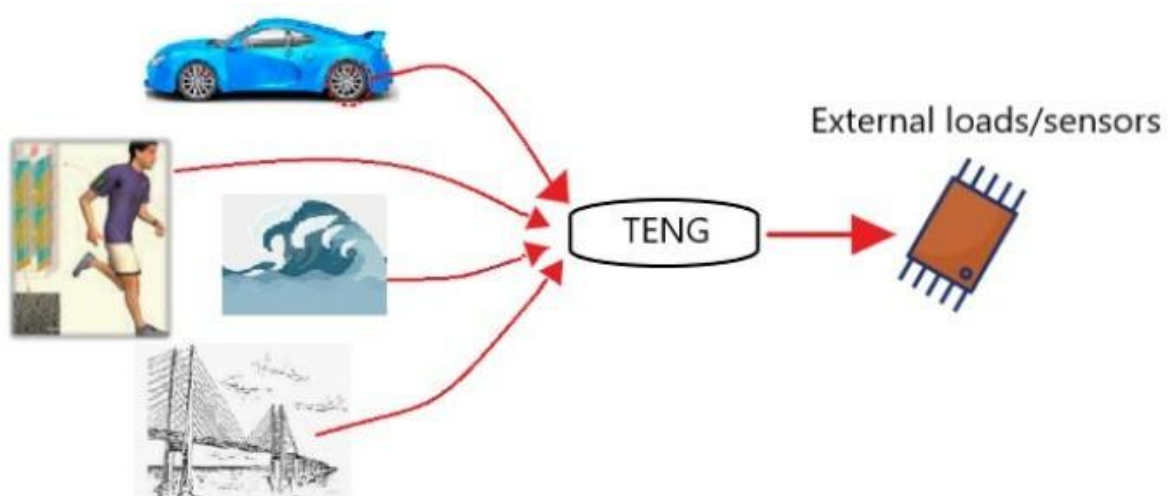


Figure 2.6: Illustration de la récupération d'énergie mécanique à partir de différentes sources

Parmi les différentes technologies développées pour la récupération d'énergie mécanique, les nanogénérateurs triboélectriques occupent une place particulière grâce à leur simplicité de conception, leur faible coût et leur capacité à exploiter des mouvements de faible amplitude. Afin d'optimiser la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, plusieurs architectures de fonctionnement ont été proposées.

2.4 Modes de fonctionnement des TENG

Un aspect essentiel dans le développement d'un nanogénérateur triboélectrique (TENG) est l'exploitation correcte du phénomène de triboélectrification. Afin de permettre une triboélectrification adaptée à une structure spécifique de TENG, il est nécessaire de choisir un mode de fonctionnement approprié garantissant une utilisation efficace de l'énergie mécanique externe disponible dans l'environnement. Il existe quatre modes de fonctionnement principaux, illustrés à la Fig. 2.7 : le mode contact-séparation (ou contact vertical), le mode de glissement linéaire, ainsi que le mode à électrode libre (freestanding). Le mode contact-séparation repose sur le processus de mise en contact puis de séparation de deux matériaux différents. . .

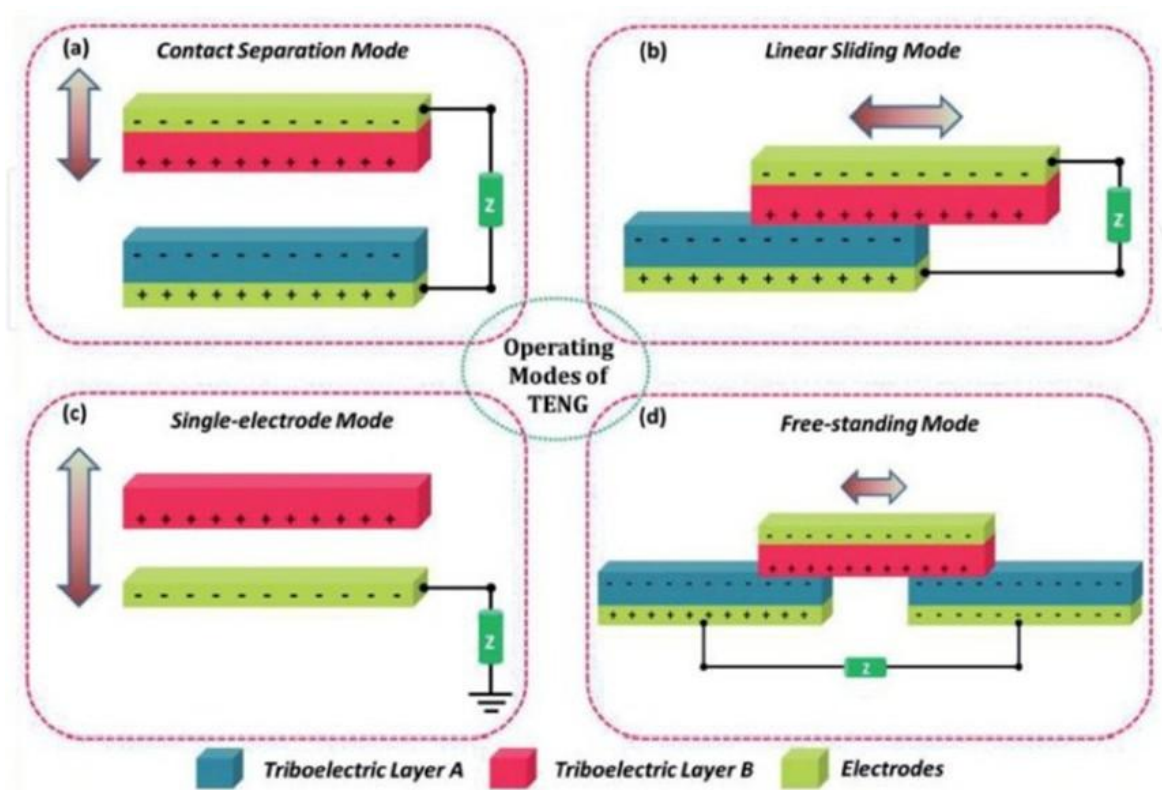


Figure 2.7: Illustration des quatre principaux modes de fonctionnement des TENG [26]

des matériaux triboélectriques, comme l'indique leur appellation. Lors du premier contact, les deux couches sont initialement séparées et électriquement neutres ; néanmoins, lorsque les deux matériaux sont mis en contact, le système global reste neutre, bien que les électrons des matériaux les plus triboélectriquement positifs aient tendance à être transférés vers ceux qui sont plus négatifs [26].

Lorsque les deux surfaces sont à nouveau séparées, chaque couche présente des charges de surface égales et opposées. Afin de maintenir l'équilibre électrique, des charges équivalentes et opposées apparaissent au niveau des électrodes correspondantes, ce qui engendre une différence de potentiel entre celles-ci. Ce même processus peut également se produire entre un diélectrique et une électrode, comme dans la configuration étudiée dans ce travail. La différence de potentiel maximale est obtenue lorsque le déplacement est maximal.

Dans le mode de glissement linéaire, un mouvement relatif de glissement parallèle entre les deux surfaces génère des charges à leurs interfaces. Il convient de noter que ce mouvement de glissement peut également correspondre à une rotation cylindrique ou d'un disque, et pas uniquement à un mouvement plan.

Dans les deux modes précédents, les deux diélectriques sont connectés à des électrodes, tandis que dans le mode à électrode unique, un seul diélectrique est relié à une électrode, l'autre étant libre [16].

Le mode à électrode libre (freestanding) utilise une feuille triboélectrique mobile qui interagit avec deux autres matériaux triboélectriques, chacun relié à une électrode. En raison de leur proximité et de la répulsion entre charges de même signe, chaque surface développe une distribution de charges asymétrique lors de la polarisation [16].

Chacune de ces configurations produit des caractéristiques de sortie différentes, et certaines sont plus adaptées que d'autres selon l'application envisagée.

Après avoir présenté les principales configurations utilisées dans les nanogénérateurs triboélectriques, il convient d'examiner plus en détail le mécanisme physique responsable de la production d'électricité. Le mode contact-séparation vertical, largement utilisé dans les applications de récupération d'énergie, sera retenu comme exemple pour illustrer le principe général de fonctionnement des TENG.

2.5 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un TENG en mode contact-séparation vertical repose sur le couplage entre la triboélectrification et l'induction électrostatique.

À l'état initial, les deux couches ne sont pas en contact et aucune charge n'est générée ; il n'existe donc pas de différence de potentiel entre les électrodes. Sous l'effet d'un déplacement externe, le film de Kapton et l'électrode entrent en contact. Le phénomène de triboélectrification entraîne alors un transfert de charges à la surface de contact.

Il est important de noter que la nature isolante du polymère permet la conservation des charges triboélectriques pendant de longues durées, pouvant aller de plusieurs heures à plusieurs jours [27]. Les charges de signes opposés étant localisées sur des surfaces très proches, elles ne créent pratiquement pas de différence de potentiel entre les électrodes.

Après séparation des deux matériaux, une différence de potentiel apparaît entre

les électrodes en circuit ouvert, car les charges opposées ne sont plus en contact. La Fig. 2.8 illustre la configuration de base d'un TENG en mode contact-séparation. Ce système se compose généralement de deux films diélectriques caractérisés par leurs permittivités relatives de permittivités relatives (ϵ_1 , ϵ_2) et d'épaisseurs (d_1 , d_2),

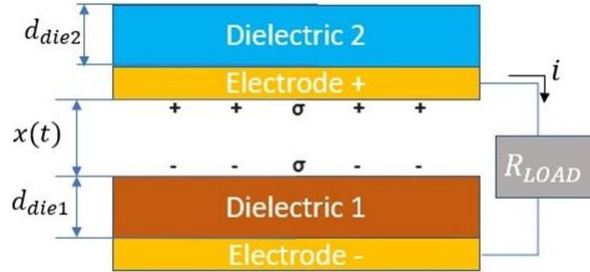


Figure 2.8: Schéma du circuit du TENG

chacun étant associé à une électrode en cuivre. Le choix des matériaux diélectriques est essentiel, car chaque matériau se caractérise par une densité de charge de surface σ différente. Quelques exemples de polymères couramment utilisés comme films diélectriques dans la fabrication des TENG sont présentés à la Fig. 2.9.

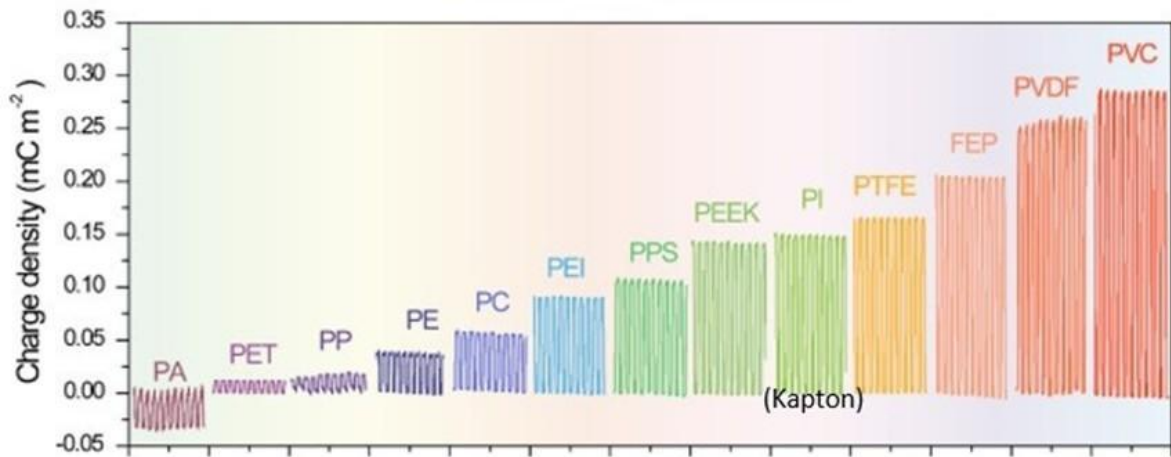


Figure 2.9: Liste de polymères avec leur densité de charge de surface triboélectrique [18]

2.6 Modélisation électrique du TENG

Le fonctionnement électrique du nanogénérateur triboélectrique repose sur la combinaison de l'effet triboélectrique et de l'induction électrostatique. Pour un TENG opérant en mode contact-séparation, activé par les vibrations du vent, le comportement électrique peut être décrit par le modèle de circuit équivalent (ECM), dans lequel le générateur est représenté par une source de tension en circuit ouvert V_{OC} en série avec une capacité interne C_{TENG} .

La tension en circuit ouvert générée par le TENG est donnée par :

$$V_{OC}(t) = (\sigma \cdot x(t)) / \varepsilon_0 \quad (2.1)$$

où σ représente la densité de charge triboélectrique surfacique (C/m²), caractérisant la quantité de charges électriques générées par unité de surface à la suite du phénomène de triboélectrification. Le terme $x(t)$ désigne la distance de séparation entre les deux matériaux triboélectriques à l'instant t . Cette distance varie en fonction des vibrations mécaniques appliquées au système et influence directement la tension produite. Enfin, ε_0 correspond à la permittivité du vide, égale à $(8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m})$ qui intervient dans la relation électrostatique reliant les charges électriques au champ électrique.

La capacité interne du TENG, qui varie avec la distance de séparation $x(t)$, est exprimée par :

$$C_{TENG}(t) = (\varepsilon_0 \cdot S) / (d_0 + x(t)) \quad (2.2)$$

Où S représente la surface active des électrodes (m²), c'est-à-dire la zone effective sur laquelle s'effectuent les échanges de charges électriques. Le paramètre d_0 désigne l'épaisseur effective du diélectrique ramenée au vide. Lorsque la distance $x(t)$ augmente, la capacité diminue, tandis qu'une réduction de cette distance entraîne une augmentation de la capacité interne du générateur. Cette variation constitue une caractéristique essentielle du fonctionnement des générateurs triboélectriques et influence directement leur comportement électrique.

La charge électrique Q transférée entre les électrodes vérifie la relation suivante :

$$Q = C_{TENG}(t) \cdot V + \sigma \cdot S \quad (2.3)$$

où V est la tension aux bornes de la charge externe. Cette équation traduit l'équilibre entre la charge induite par l'effet triboélectrique et la charge accumulée sur les électrodes.

La puissance instantanée délivrée à une charge résistive R_L est :

$$P(t) = V^2(t) / R_L = (Q(t) / C_{TENG}(t))^2 / R_L \quad (2.4)$$

Dans le cadre de cette étude, l'ensemble de ces équations est implémenté dans le modèle **ECM (Equivalent Circuit Model)** développé sous **MATLAB/Simulink** afin de reproduire fidèlement le comportement électrique du générateur triboélectrique. Pour les besoins de la simulation, les paramètres du modèle sont fixés à des valeurs représentatives des conditions de fonctionnement considérées. Ainsi, la tension en circuit ouvert est prise égale à **97 V**, la capacité interne du TENG est fixée à **10 μ F**, tandis que la fréquence des vibrations mécaniques est de **10 Hz**, correspondant aux vibrations d'origine éolienne appliquées au générateur. Ces valeurs permettent d'obtenir un modèle réaliste et cohérent avec les caractéristiques du système étudié, tout en s'appuyant sur les données rapportées dans la littérature [20].

2.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière détaillée les nanogénérateurs triboélectriques, depuis les fondements physiques de l'effet triboélectrique jusqu'aux différents modes de fonctionnement qui en découlent. L'analyse des quatre configurations — contact-séparation, glissement, électrode unique et mode autonome — a mis en évidence la polyvalence de cette technologie et sa capacité à s'adapter à une grande variété de sources d'énergie mécanique ambiante.

Les TENG se positionnent ainsi comme une solution de récupération d'énergie particulièrement adaptée aux applications à faible consommation, telles que les capteurs autonomes, les systèmes de surveillance sans fil et les dispositifs de l'Internet des objets (IoT). Leur capacité à produire une puissance suffisante à partir de sources mécaniques diffuses et intermittentes, sans nécessiter de source d'alimentation externe, en fait une technologie complémentaire idéale aux sources d'énergie renouvelables conventionnelles comme le photovoltaïque.

C'est précisément dans cette optique que le TENG est intégré dans le système hybride présenté dans ce mémoire, où il assure l'alimentation autonome d'un capteur de faible puissance (0,16 W).

Afin de valider cette intégration et d'étudier le comportement global du système, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation sous MATLAB/Simulink de l'ensemble des composants — panneau photovoltaïque, batterie et nanogénérateur triboélectrique — ainsi qu'à la conception de la stratégie de commande et du système de gestion d'énergie assurant la coordination entre ces différentes sources.

simulation et commande

3.1 Introduction

La simulation numérique constitue une étape essentielle dans la conception et l'analyse des systèmes dynamiques modernes. Elle permet d'étudier le comportement d'un système avant sa réalisation pratique, de vérifier ses performances et d'optimiser son fonctionnement dans différentes conditions de fonctionnement.

Dans ce travail, l'environnement MATLAB/Simulink a été utilisé pour modéliser et simuler le système hybride proposé. MATLAB est une plateforme de calcul numérique et de programmation largement utilisée dans les domaines scientifiques et industriels, tandis que Simulink est un environnement graphique basé sur des diagrammes en blocs permettant la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques multidomaines. Simulink offre plusieurs avantages, notamment :

- la représentation graphique intuitive des systèmes ;
- la disponibilité de bibliothèques de blocs prédéfinis ;
- la simulation des systèmes continus et discrets ;
- l'analyse des signaux et des performances en temps réel ;
- l'intégration facile avec les algorithmes MATLAB.

Grâce à cet outil, il est possible de tester différentes stratégies de commande, d'évaluer les échanges énergétiques entre les différentes sources, ainsi que d'analyser la stabilité et les performances globales du système hybride dans diverses conditions d'irradiation et de charge.

Dans cette partie, la modélisation des différents sous-systèmes ainsi que les résultats de simulation obtenus seront présentés et analysés afin de valider le fonctionnement du système proposé.

3.2 Architecture globale du système

Le système proposé est une architecture hybride de gestion d'énergie basée sur une source photovoltaïque, un générateur triboélectrique et un système de stockage par batterie. Le panneau photovoltaïque (PV) constitue la source principale de production d'énergie. L'énergie produite est adaptée à travers un convertisseur Boost DC-DC afin d'élever et stabiliser la tension avant son injection dans le bus continu (DC Bus), qui alimente la charge principale.

La batterie est connectée au bus DC via un convertisseur bidirectionnel Boost-Buck DC-DC permettant les échanges d'énergie dans les deux sens. Ainsi, lorsque

la production photovoltaïque est excédentaire, la batterie se charge, tandis qu'en cas d'insuffisance énergétique, elle fournit l'énergie nécessaire à la charge principale.

Pour l'alimentation des capteurs, le générateur triboélectrique (TENG), alimenté par les vibrations du vent, constitue la source prioritaire. L'énergie alternative produite par le TENG est récupérée par un étage de redressement suivi d'un convertisseur Buck afin d'obtenir une tension régulée adaptée aux dispositifs de mesure. En cas d'insuffisance de l'énergie fournie par le TENG, la batterie intervient à travers un convertisseur Buck DC-DC pour assurer une alimentation stable et continue des capteurs.

Cette architecture permet d'améliorer la continuité d'alimentation, d'optimiser l'exploitation des sources disponibles et de réduire la dépendance énergétique du système de capteurs.

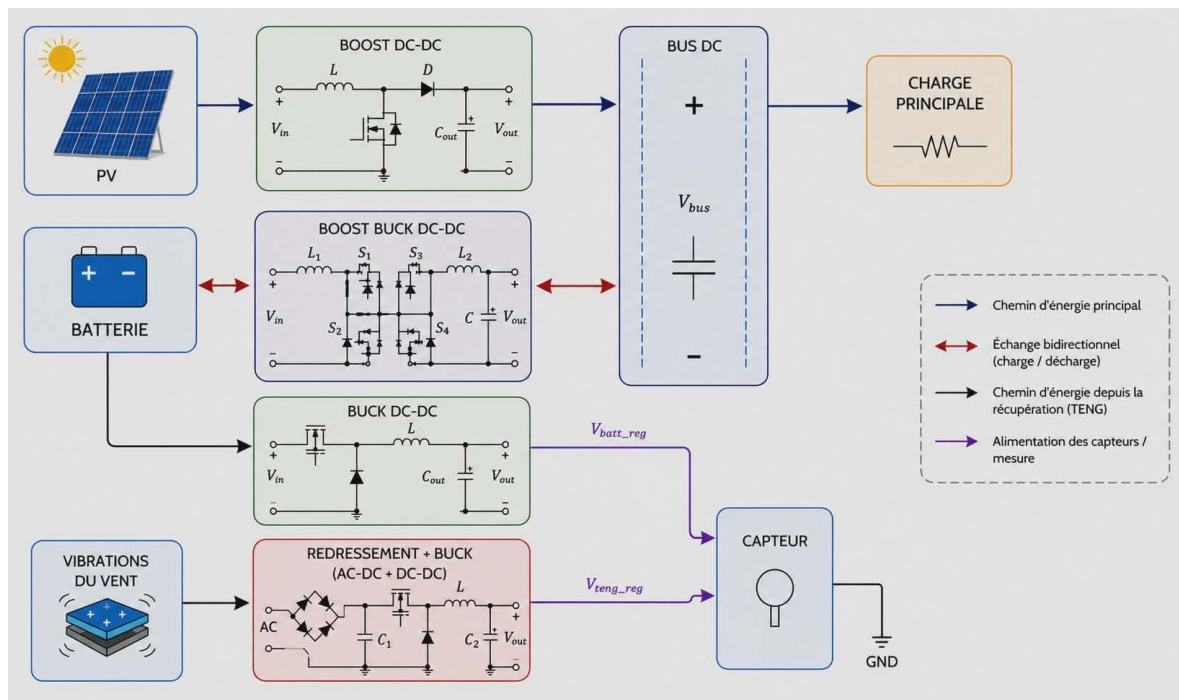


Figure 3.1: Architecture globale du système

3.3 La source photovoltaïque

Dans notre système, le générateur photovoltaïque est modélisé sous la forme d'un unique module solaire (configuration d'une seule chaîne en parallèle composée d'un seul module en série). Il s'agit d'un panneau aux paramètres personnalisés constitué de 96 cellules, conçu pour délivrer une puissance maximale de 211,992 W. Sur le plan de ses caractéristiques électriques, le module présente une tension en circuit ouvert (V_{oc}) de 37,4 V et un courant de court-circuit (I_{sc}) de 8,63 A. À son point de fonctionnement optimal (Maximum Power Point), il génère une tension de 26,4 V pour un courant de 8,03 A. Enfin, la simulation de son comportement interne repose sur un modèle à une diode, intégrant une résistance série de 0,267 ohms et une résistance shunt d'environ 311,9 ohms pour tenir compte des pertes internes du composant.

Dans la simulation du système photovoltaïque sous MATLAB/Simulink, les conditions environnementales telles que l'irradiation solaire et la température jouent un rôle essentiel dans la variation de la puissance produite par le panneau.

Afin de reproduire ces variations de manière réaliste, un bloc Ramp est utilisé pour générer des signaux dynamiques représentant l'évolution de l'irradiation et de la température au cours du temps.

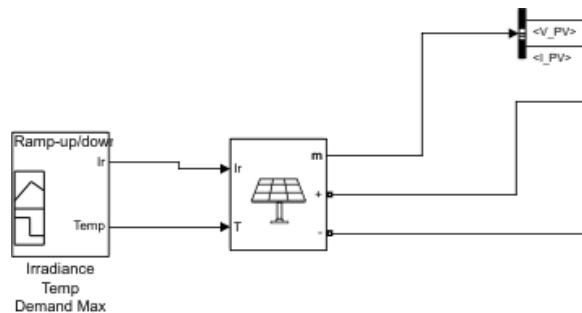


Figure 3.2: PV array bloc

Les caractéristiques	Panneau (96 cellules)	Cellule (calculée)
Température	25 °C	25 °C
Tension de circuit ouvert	37.4 V	0.389 V
Courant de court-circuit	8.63 A	8.63 A
Tension à puissance maximale	26.4 V	0.275 V
Courant à puissance maximale	8.03 A	8.03 A
Puissance maximale	211.992 W	2.175 W

Table 3.1: Caractéristiques du panneau et estimation d'une cellule photovoltaïque

3.4 Générateur triboélectrique (TENG)

Le générateur triboélectrique (TENG) présente un comportement électromécanique complexe et fortement non linéaire, ce qui rend son analyse difficile à l'aide des approches analytiques classiques. Afin de simplifier l'étude et la simulation de ce système, une méthode basée sur le modèle de circuit équivalent (Equivalent Circuit Model – ECM) est adoptée. Cette approche représente le comportement électrique global du TENG par un circuit composé d'une source de tension en circuit ouvert V_{oc} , d'une capacité interne C_{TENG} , ainsi qu'une impédance de charge intégrant les pertes internes du générateur. Le modèle équivalent permet ainsi de traduire les phénomènes électromécaniques du générateur en grandeurs électriques exploitables dans les outils de simulation comme MATLAB/Simulink.

3.4.1 Modèle de circuit équivalent et paramètres

Le TENG produit une tension alternative variable dépendant principalement des vibrations mécaniques, modélisée dans la simulation par un signal sinusoïdal d'amplitude $V_{oc} = 97 \text{ V}$ à une fréquence de 10 Hz. Les paramètres du modèle ECM retenus pour la simulation sont récapitulés dans le tableau 3.2.

Table 3.2: Paramètres du modèle ECM du TENG

Paramètre	Symbole	Valeur
Tension en circuit ouvert	V_{oc}	97 V
Capacité interne	C_{TENG}	10 μF
Fréquence	f	10 Hz

Il convient de préciser que ces valeurs ont été choisies dans le cadre de la simulation afin d'adapter la tension de sortie du TENG à la valeur requise par le capteur (5 V / 0,16 W). Elles ne reflètent pas nécessairement les caractéristiques d'un TENG physique réel, mais permettent de valider le comportement fonctionnel du système de récupération d'énergie dans l'environnement MATLAB/Simulink.

3.4.2 Architecture du système de conditionnement

Comme la tension générée par le TENG n'est pas directement exploitable pour alimenter une charge continue, elle est traitée par une chaîne de conditionnement composée de trois étages successifs : un redresseur, un étage de filtrage, et un convertisseur abaisseur de type Buck. L'architecture complète du système est illustrée dans la figure 3.3.

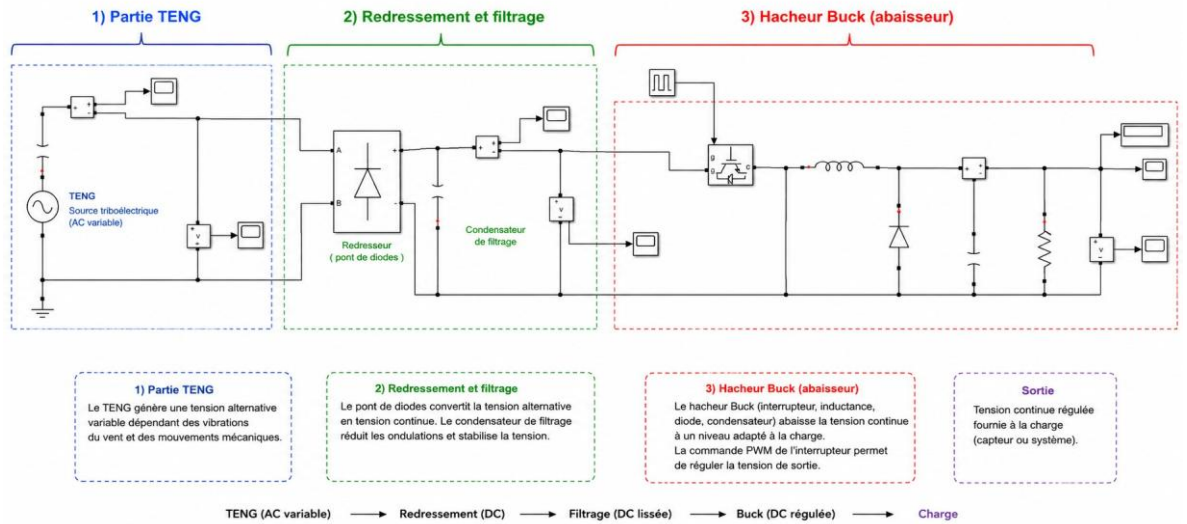


Figure 3.3: Schéma Simulink complet du système TENG – Redresseur – Buck – Capteur

Après redressement, un condensateur de filtrage ($C_f = 1 \text{ mF}$) est utilisé afin de réduire les ondulations et de stabiliser la tension continue avant son adaptation par l'étage de conversion DC/DC. Le convertisseur Buck fonctionne grâce à une commande PWM de rapport cyclique $D = 10 \%$, appliquée à l'interrupteur électronique,

permettant d'abaisser la tension à la valeur souhaitée. L'inductance et le condensateur ($C_{buck} = 1 \mu\text{F}$) intégrés dans le circuit Buck assurent le stockage temporaire de l'énergie et la réduction des fluctuations de tension et de courant en sortie. Les paramètres des composants de conditionnement sont résumés dans le tableau 3.3.

Table 3.3: Paramètres des étages de conditionnement

Composant	Symbole	Valeur
Condensateur de filtrage	C_f	1 mF
Rapport cyclique PWM	D	10 %
Condensateur Buck	C_{buck}	1 μF
Tension de sortie visée	V_{out}	5 V

3.4.3 Comportement du TENG à vide

Avant de connecter la charge, le TENG est simulé en circuit ouvert afin d'observer son comportement intrinsèque. La figure 3.4 présente la tension générée avant redressement, et la figure 3.5 illustre la tension après redressement et filtrage.

La tension générée avant redressement est un signal alternatif sinusoïdal dont l'amplitude croît progressivement de zéro jusqu'à atteindre sa valeur nominale de $\pm 95 \text{ V}$ à partir de $t \approx 6 \text{ s}$. Cette montée en régime est caractéristique du comportement transitoire du modèle ECM : la capacité interne C_{TENG} se charge progressivement au fil des cycles de vibration avant d'atteindre le régime permanent.

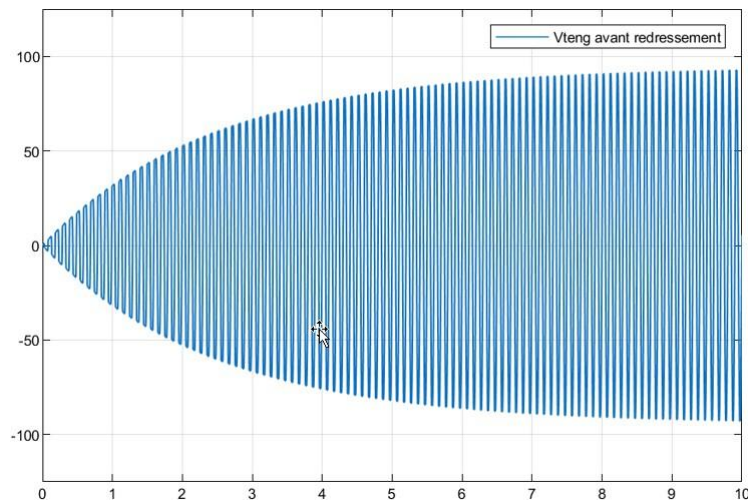


Figure 3.4: Tension du TENG avant redressement – Circuit ouvert

Après passage par le pont de diodes et le condensateur de filtrage, le signal alternatif est converti en une tension continue qui se stabilise à environ 93 V en régime permanent, légèrement inférieure à $V_{oc} = 97 \text{ V}$ en raison des chutes de tension aux bornes des diodes du pont redresseur.

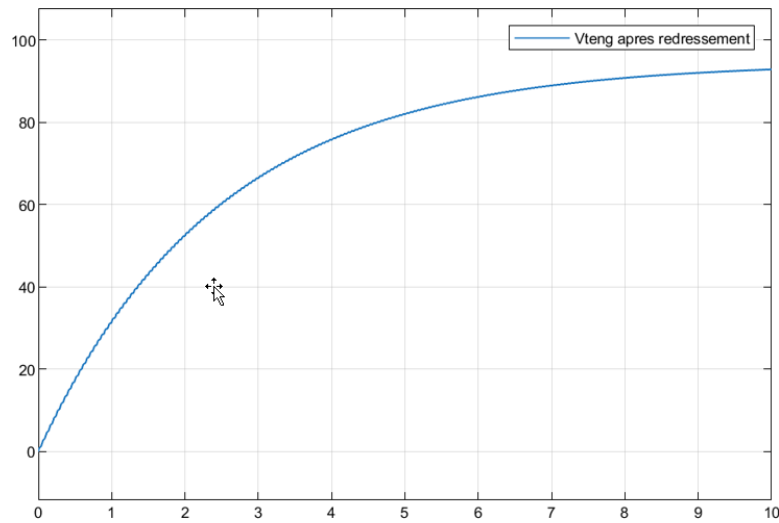


Figure 3.5: Tension du TENG après redressement et filtrage – Circuit ouvert

3.4.4 Comportement du TENG en charge

Lorsque le convertisseur Buck et la charge représentant le capteur sont connectés, le comportement du TENG est modifié par rapport au régime à vide. La figure 3.6 montre la tension avant redressement en présence de la charge, et la figure 3.7 présente la tension après redressement.

En présence de la charge, l'amplitude de la tension alternative est réduite à environ ± 60 V en régime permanent, contre ± 95 V à vide. Cette chute de tension est inhérente au fonctionnement de toute source réelle : le courant débité dans la charge entraîne une réduction de la tension disponible aux bornes de sortie du générateur, phénomène qui est ici intégré dans le comportement global de la charge.

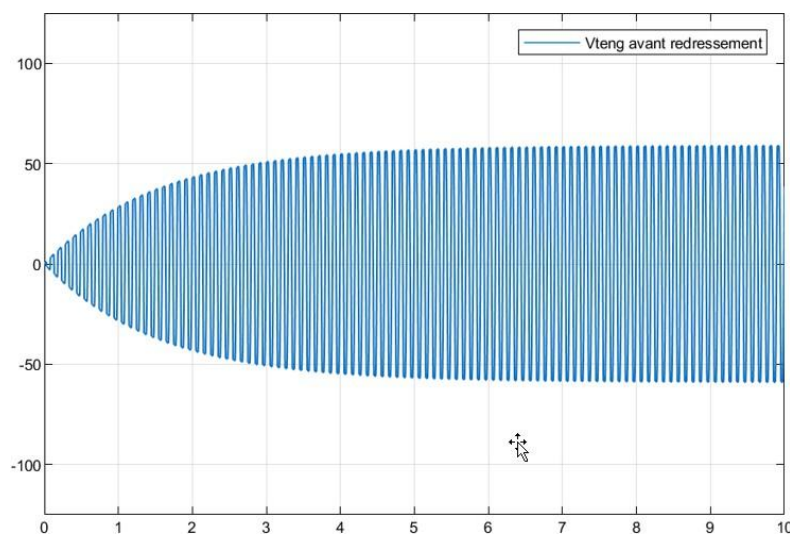


Figure 3.6: Tension du TENG avant redressement – En charge

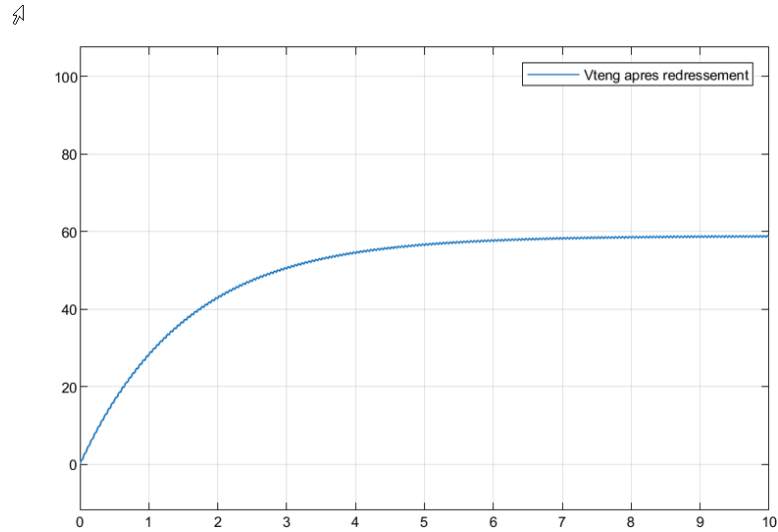


Figure 3.7: Tension du TENG après redressement et filtrage – En charge

3.4.5 Tension et courant de sortie après le convertisseur Buck

La tension continue obtenue en sortie du redresseur, d'une valeur de 60 V, est appliquée à l'entrée du convertisseur Buck. Ce convertisseur abaisseur joue un rôle central dans la chaîne de conditionnement : il est chargé d'adapter la tension issue du redressement à un niveau compatible avec l'alimentation du capteur. Grâce au rapport cyclique fixé à 10 %, le convertisseur Buck réduit efficacement cette tension d'entrée à la valeur souhaitée. La figure 3.8 présente les formes d'onde de la tension et du courant de sortie obtenus en simulation, permettant d'observer le comportement du convertisseur aussi bien en régime transitoire qu'en régime permanent.

En régime permanent, les résultats de simulation montrent que la tension de sortie V_{teng} se stabilise à une valeur de 5 V, tandis que le courant de sortie I_{teng} atteint 0,032 A. Ces deux grandeurs permettent de calculer la puissance effectivement délivrée au capteur :

$$P_{teng} = V_{teng} \times I_{teng} = 5 \times 0,032 = 0,16 \text{ W} \quad (3.1)$$

Cette valeur correspond exactement à la puissance nominale requise par le capteur, définie lors de la phase de dimensionnement du système. Ce résultat confirme la pertinence du choix du rapport cyclique de 10 % et valide le dimensionnement du convertisseur Buck retenu pour cette application. Il démontre également que la chaîne de conditionnement complète — redressement, filtrage et conversion DC/DC — remplit pleinement sa fonction en délivrant une alimentation stable, continue et conforme aux spécifications du capteur à partir d'une source triboélectrique variable et intermittente.

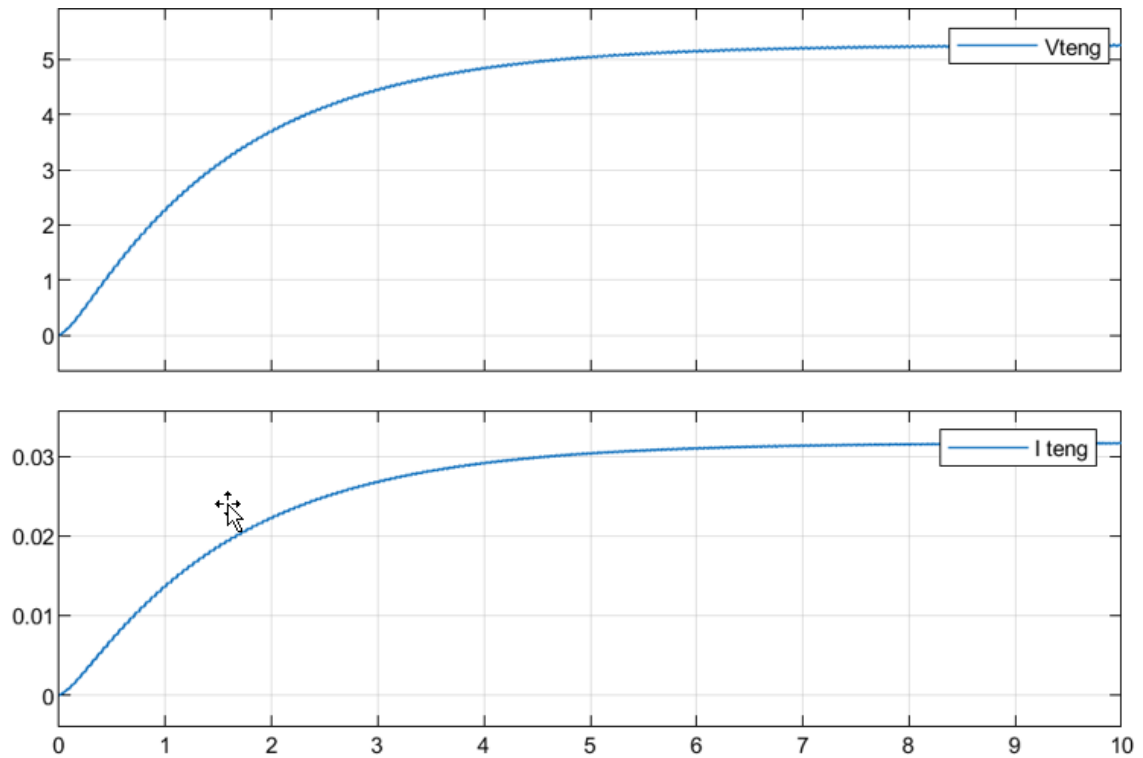


Figure 3.8: Tension V_{teng} et courant I_{teng} en sortie du convertisseur Buck

Le tableau 3.4 récapitule les grandeurs caractéristiques du TENG dans les deux régimes de fonctionnement.

Table 3.4: Grandeurs caractéristiques du TENG – Comparaison à vide et en charge

Grandeur	Symbole	À vide	En charge
Amplitude tension AC	V_{ac}	± 95 V	± 60 V
Tension après redressement	V_{rect}	93 V	60 V
Tension sortie Buck	V_{teng}	–	5 V
Courant de sortie	I_{teng}	presque 0 A	0.032 A
Puissance délivrée	P_{teng}	presque 0 W	0.16 W

Cette architecture de conditionnement, combinant redressement, filtrage et conversion Buck, permet d'obtenir une alimentation continue stable de 5 V / 0,16 W à partir d'une source triboélectrique variable et intermittente, validant ainsi la viabilité de la solution proposée pour l'alimentation autonome du capteur.

3.5 la batterie :

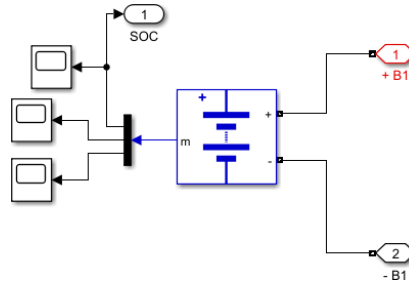


Figure 3.9: battery bloc

Dans ce système hybride, une batterie Lithium-Ion de 24 V et 50 Ah a été utilisée afin d'assurer le stockage de l'énergie et l'alimentation continue de la charge. La charge principale consomme une puissance de 122 W, tandis qu'un capteur de faible consommation nécessite environ 0,16 W. La puissance totale demandée par le système est donc d'environ 122,16 W. Le choix d'une batterie de 50 Ah permet d'obtenir une bonne autonomie ainsi qu'une meilleure stabilité énergétique du système, notamment lors des variations de l'irradiation solaire ou des fluctuations de la production.

L'énergie totale stockée par la batterie est donnée par la relation :

$$E = V \times Ah$$

ce qui correspond à une capacité énergétique d'environ :

$$E = 24 \times 50 = 1200 \text{ Wh}$$

L'état de charge de la batterie a été configuré de manière adaptée à chaque scénario de simulation, afin de reproduire des conditions de fonctionnement représentatives et variées du système hybride. Cette approche permet d'analyser en détail le comportement dynamique de la batterie lors des transitions entre les phases de charge et de décharge, en fonction de l'évolution de la production photovoltaïque et des besoins énergétiques de la charge. Elle offre également la possibilité d'évaluer l'impact des variations de l'état de charge sur les performances globales du système, notamment en termes de stabilité du bus continu, de continuité d'alimentation et d'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie adoptée.

exemple:

$$E_{\text{disponible}} = 0,7 \times 1200 = 840 \text{ Wh}$$

permettant d'alimenter la charge pendant plusieurs heures. Ce dimensionnement est adapté au panneau photovoltaïque de 211.992 W utilisé dans le système et garantit un fonctionnement plus fiable et plus stable de l'installation.

Paramètre	Valeur
Type	Lithium-Ion
Voltage nominale (V)	24
Capacité (Ah)	50
SOC initial (%)	selon le scénario
temps de réponse (s)	1
socmax (%)	80
socmin (%)	20

Table 3.5: Les paramètres de la batterie

3.6 Convertisseur Boost DC-DC avec commande MPPT

Le convertisseur Boost DC-DC est utilisé pour adapter la tension délivrée par le panneau photovoltaïque au niveau requis par le bus continu du système. En raison de la variation de la tension photovoltaïque selon les conditions climatiques, notamment l'irradiation solaire et la température, l'utilisation d'un convertisseur élévateur devient nécessaire afin d'assurer une alimentation stable et efficace de la charge.

Le convertisseur est constitué principalement d'une inductance L , d'un interrupteur électronique commandé (IGBT), d'une diode et de deux condensateurs : un condensateur d'entrée $C1$ côté panneau photovoltaïque et un condensateur de sortie $C2$ côté bus DC. Son principe de fonctionnement repose sur le stockage temporaire de l'énergie dans l'inductance lorsque l'interrupteur est fermé, puis sur le transfert de cette énergie vers la charge lorsque l'interrupteur est ouvert. Ce mécanisme permet d'obtenir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée.

La relation idéale reliant la tension d'entrée et la tension de sortie du convertisseur Boost est donnée par :

$$V_{out} = V_{in} / (1-D) \quad (3.2)$$

où V_{in} représente la tension d'entrée du panneau photovoltaïque, V_{out} la tension de sortie appliquée au bus DC, et D le rapport cyclique de commande.

Le dimensionnement des composants du convertisseur est effectué à partir des paramètres nominaux du système. Le rapport cyclique est calculé à partir des tensions nominales de fonctionnement :

$$D = 1 - (V_{in}/V_{out}) = 1 - (26/27) = 3,7\% \quad (3.3)$$

L'inductance minimale nécessaire pour limiter l'ondulation du courant à 10 % du courant nominal est donnée par :

$$L_{min} = (V_{in} \cdot D) / (f_s \cdot \Delta I) = 0.107 \text{ mH} \quad (3.4)$$

La valeur retenue dans la simulation est $L = 13 \text{ mH}$, largement supérieure à la valeur minimale théorique, ce qui garantit un fonctionnement en mode de conduction continue et une ondulation de courant négligeable.

Le condensateur d'entrée $C1$ assure le filtrage des ondulations côté panneau photovoltaïque :

$$C1_{min} = (I_{pv} \cdot D) / (f_s \cdot \Delta V_{in}) = 32 \mu\text{F} \quad (3.5)$$

$$C2_{min} = (I_{load} \cdot D) / (f_s \cdot \Delta V_{in}) = 30.8 \mu\text{F} \quad (3.6)$$

Les valeurs retenues dans la simulation sont $C1 = 2200 \mu F$ et $C2 = 100 \mu F$, toutes deux largement supérieures aux valeurs minimales théoriques. Ce surdimensionnement explique la stabilité remarquable de la tension du bus DC observée dans les résultats de simulation, où V_{load} se maintient à 27 V sans perturbation significative. Afin d'extraire la puissance maximale du panneau photovoltaïque, le convertisseur est associé à une commande MPPT basée sur la méthode de la Conductance incrémentale. Au point de puissance maximale, la condition suivante est vérifiée :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (3.7)$$

L'algorithme compare la conductance instantanée et la conductance incrémentale afin d'ajuster automatiquement le rapport cyclique et optimiser le transfert de puissance entre le panneau photovoltaïque et le bus DC.

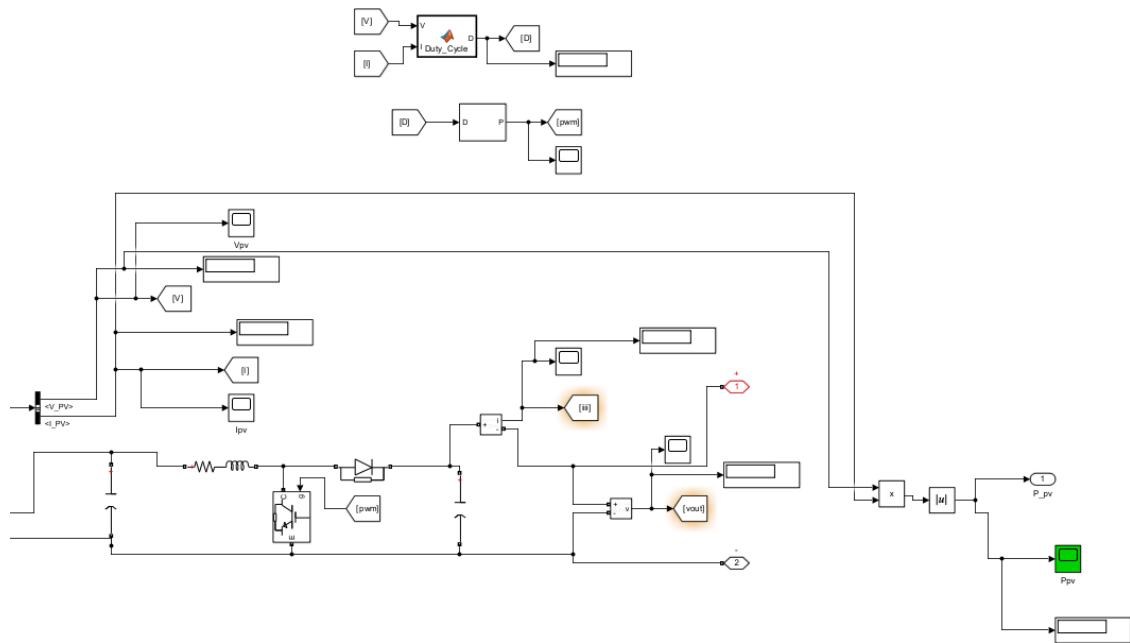


Figure 3.10: convertisseur boost

3.7 Convertisseur bidirectionnel Buck–Boost

Le convertisseur bidirectionnel Buck–Boost est un convertisseur DC–DC utilisé pour assurer le transfert d'énergie entre le bus continu (DC Bus) et la batterie dans les deux sens. Il joue un rôle essentiel dans les systèmes hybrides de gestion d'énergie, car il permet soit de charger la batterie lorsque la puissance produite est suffisante, soit d'alimenter le bus DC à partir de la batterie lorsque la puissance des sources devient insuffisante.

Le convertisseur Buck-Boost bidirectionnel est principalement constitué de deux interrupteurs commandés, d'une inductance, d'un condensateur de filtrage et d'un

circuit de commande PWM. Cette structure permet d'assurer le transfert bidirectionnel de l'énergie entre la batterie et le bus continu selon les besoins énergétiques du système.

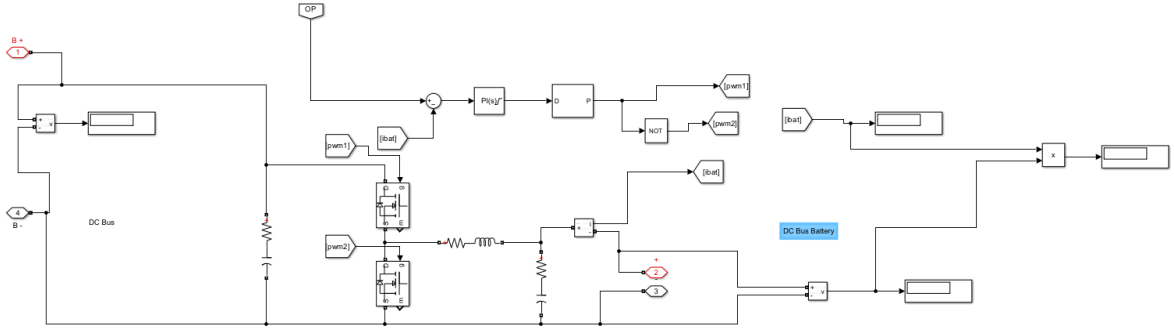


Figure 3.11: convertisseur buck boost

3.7.1 Mode Boost (décharge de la batterie)

La partie Boost correspond au fonctionnement dans lequel l'énergie circule de la batterie vers le bus continu. Dans ce mode, le convertisseur augmente la tension de la batterie afin d'alimenter la charge principale lorsque la puissance produite par le panneau photovoltaïque devient insuffisante. Le rapport cyclique en mode Boost est donné par :

$$D_{\text{boost}} = 1 - (V_{\text{bat}}/V_{\text{bus}}) = 1 - (24/27) = 11,1\% \quad (3.8)$$

3.7.2 Mode Buck (charge de la batterie)

Dans ce mode, le convertisseur réduit la tension provenant du bus DC pour l'adapter à la tension de charge de la batterie, lorsque la puissance produite par le panneau photovoltaïque est supérieure à la demande de la charge. Le rapport cyclique en mode Buck est :

$$D_{\text{buck}} = V_{\text{bat}}/V_{\text{bus}} = 24/27 = 88,9\% \quad (3.9)$$

3.7.3 Rôle des composants principaux

Les interrupteurs électroniques (MOSFET/IGBT) contrôlent le transfert d'énergie selon les signaux PWM générés par le système de commande. L'inductance assure le stockage temporaire de l'énergie magnétique et limite les variations brusques du courant. Sa valeur minimale théorique est calculée comme suit :

$$L_{\text{min}} = (V_{\text{bat}} \cdot D_{\text{boost}}) / (f_s \cdot \Delta I) \approx 0,296 \text{ mH}$$

La valeur retenue dans la simulation est $L = 13 \text{ mH}$, largement supérieure à la valeur minimale théorique, garantissant un fonctionnement en mode de conduction continue dans les deux sens de transfert d'énergie. Le condensateur assure le filtrage des ondulations de tension. Sa valeur minimale est :

$$C_{1\text{min}} = (I_{\text{bat}} \cdot D_{\text{boost}}) / (f_s \cdot \Delta V) \approx 92 \mu\text{F} \quad (3.10)$$

$$C_{2\text{min}} = (I_{\text{bat}} \cdot D_{\text{buck}}) / (f_s \cdot \Delta V) \approx 833 \mu\text{F} \quad (3.11)$$

Les valeurs retenues dans la simulation sont $C1 = 100 \mu F$ et $C2 = 1000 \mu F$, toutes deux supérieures aux valeurs minimales théoriques, garantissant un filtrage efficace et une tension stable de part et d'autre du convertisseur Buck-Boost.

La commande PWM (Pulse Width Modulation) contrôle le rapport cyclique des interrupteurs électroniques afin de réguler efficacement le transfert d'énergie et les niveaux de tension du convertisseur.

3.8 Chaîne de conversion et de conditionnement de l'énergie de la batterie vers le capteur

Le capteur est principalement alimenté par le TENG. Cependant, dans le cas où la puissance produite par le TENG devient insuffisante ou indisponible, la batterie intervient automatiquement pour assurer l'alimentation continue du capteur et garantir le bon fonctionnement du système de surveillance.

Ainsi, la batterie améliore la stabilité et la continuité énergétique du micro-réseau DC en servant comme source de secours pour la charge principale ainsi que pour le capteur.

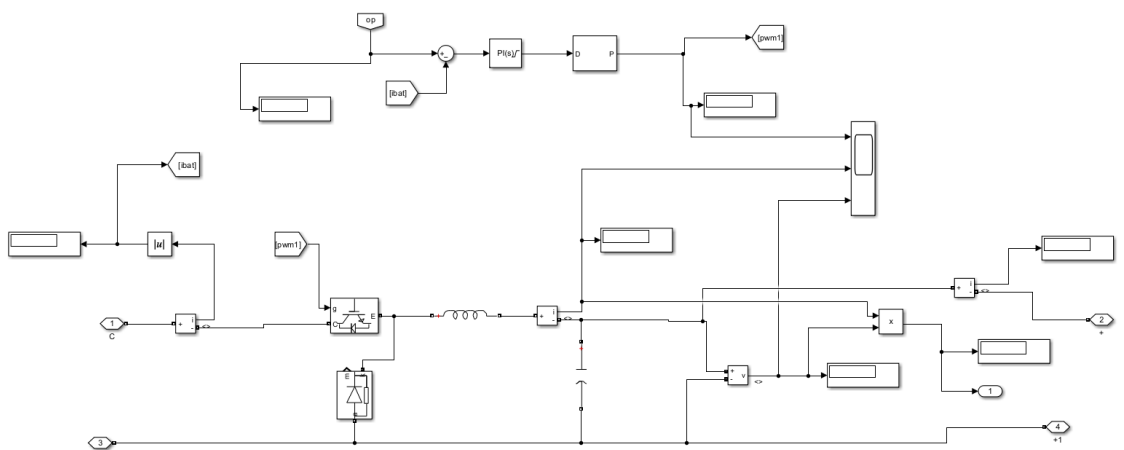


Figure 3.12: Chaîne de conversion et de conditionnement de l'énergie de la batterie vers le capteur

La figure représente la chaîne d'alimentation d'un convertisseur Buck utilisé pour adapter la tension vers le capteur.

3.9 charge et capteur:

Dans le système proposé, une charge principale de 122 W est alimentée par la batterie et le PV afin de représenter la consommation énergétique principale de l'installation. En parallèle, un capteur de faible puissance consommant environ 0,16 W est intégré au système. Malgré sa faible consommation énergétique, ce capteur joue un rôle important dans le suivi des paramètres de fonctionnement du système hybride. L'association de ces deux charges permet de simuler un fonctionnement réaliste de l'installation tout en analysant la capacité de la batterie et du générateur photovoltaïque à répondre aux besoins énergétiques du système.

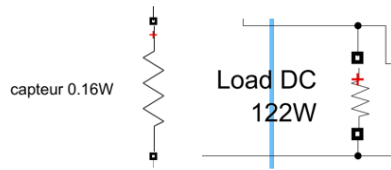


Figure 3.13: charge et capteur

3.10 Stratégie de commande du système

Dans les systèmes hybrides de production d'énergie, la stratégie de commande joue un rôle fondamental dans l'équilibre énergétique, la stabilité du bus continu et la continuité de l'alimentation des charges. Dans notre système, plusieurs sources d'énergie renouvelable sont utilisées simultanément : un générateur photovoltaïque (PV), une batterie de stockage et un générateur triboélectrique (TENG) destiné à l'alimentation d'un capteur de faible puissance.

L'objectif principal de cette commande est d'assurer une alimentation stable des charges malgré les variations de l'irradiance solaire, des conditions climatiques et de la disponibilité énergétique des différentes sources.

Le système proposé est composé des éléments suivants :

Un panneau photovoltaïque associé à un convertisseur Boost. Une batterie connectée au bus continu via un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel. Un générateur triboélectrique (TENG) associé à un convertisseur Buck. Une charge principale de 122 W alimentée par le bus DC. Un capteur de faible puissance alimenté par le TENG et assisté par la batterie. Une stratégie EMS (Energy Management System) permettant la gestion énergétique globale.

La tension nominale du bus DC est fixée à environ 27 V, tandis que le panneau photovoltaïque possède une puissance maximale de 211,9 W.

3.10.1 Commande MPPT du générateur photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques possèdent une caractéristique non linéaire dépendante principalement de l'irradiance solaire et de la température. Pour chaque condition climatique, il existe un point particulier appelé point de puissance maximale (Maximum Power Point – MPP) dans lequel le panneau délivre sa puissance maximale.

La technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisée afin d'extraire en permanence la puissance maximale disponible du panneau photovoltaïque.

Sans MPPT, la puissance produite par le panneau dépend directement de la charge connectée au système, ce qui entraîne des pertes énergétiques importantes et une mauvaise exploitation de la source photovoltaïque.

Dans notre système, le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur Boost commandé par une stratégie MPPT.

Principe de fonctionnement du MPPT

Le principe du MPPT consiste à ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur Boost afin de maintenir le panneau photovoltaïque autour du point de puissance maximale.

La puissance photovoltaïque est calculée par :

$$P_{pv} = V_{pv} \times I_{pv}$$

avec :

V_{pv} : tension du panneau photovoltaïque.

I_{pv} : courant du panneau photovoltaïque.

P_{pv} : puissance délivrée.

Le contrôleur MPPT mesure continuellement la tension et le courant du panneau afin de calculer la puissance instantanée.

Dans le système proposé, le point de fonctionnement optimal du panneau se situe autour de :

Tension optimale : environ 26 V. Puissance maximale : environ 211,9 W.

Le convertisseur Boost permet alors d'élever cette tension afin d'alimenter le bus DC.

Convertisseur Boost associé au PV

Le convertisseur Boost joue un rôle essentiel dans l'adaptation énergétique entre le panneau photovoltaïque et le bus DC.

Ses fonctions principales sont :

L'élévation de la tension photovoltaïque. L'adaptation d'impédance. Le suivi du point de puissance maximale. La stabilisation de la puissance injectée dans le bus DC.

Le principe du convertisseur Boost repose sur deux phases :

a) Phase ON

Lorsque le MOSFET est fermé :

L'inductance stocke l'énergie. La diode est bloquée. Le condensateur alimente la charge.

b) Phase OFF

Lorsque le MOSFET est ouvert :

L'énergie stockée dans l'inductance est transférée vers la charge. La tension de sortie devient supérieure à la tension d'entrée.

La relation idéale du Boost est donnée par :

$$V_{out} = V_{in} / (1 - D)$$

avec :

D : rapport cyclique.

Le MPPT agit directement sur ce rapport cyclique afin de maintenir le panneau proche du point MPP.

Influence des variations d'irradiance

Lorsque l'irradiance diminue :

La puissance photovoltaïque diminue. Le courant produit par le panneau diminue. Le système EMS demande davantage de puissance à la batterie.

Inversement, lorsque l'irradiance augmente :

La puissance photovoltaïque augmente. Le surplus énergétique est utilisé pour charger la batterie.

Le MPPT garantit ainsi une exploitation optimale du panneau quelles que soient les conditions climatiques.

3.10.2 Système de Gestion d'Énergie (EMS)

Le système EMS (Energy Management System) représente l'unité de décision principale du système hybride.

Son rôle est de gérer les échanges énergétiques entre :

Le panneau photovoltaïque.

La batterie.

Le générateur TENG.

Les charges.

L'objectif principal du EMS est d'assurer :

La continuité d'alimentation. La stabilité énergétique. La protection de la batterie. L'optimisation des flux de puissance.

Le EMS calcule continuellement les besoins énergétiques du système afin de déterminer si la batterie doit se charger ou se décharger.

Principe général de gestion énergétique

Le fonctionnement du EMS repose principalement sur l'équilibre de puissance entre la production photovoltaïque et la charge principale.

La différence de puissance est donnée par :

$$P_{diff} = P_{pv} - P_{load}$$

avec :

P_{pv} : puissance produite par le panneau.

P_{load} : puissance consommée par la charge.

Deux cas principaux apparaissent :

a) Cas de surplus énergétique

Lorsque :

$$P_{pv} > P_{load}$$

Le système dispose d'un surplus énergétique.

Dans ce cas :

La charge est alimentée par le panneau photovoltaïque. La batterie est chargée.

Le courant de référence devient positif.

Le courant de référence de la batterie est calculé par :

$$I_{bat-ref} = (P_{pv} - P_{load}) / V_{bat}$$

b) Cas de déficit énergétique

Lorsque :

$$P_{pv} < P_{load}$$

Le panneau photovoltaïque devient insuffisant.

Dans ce cas :

La batterie fournit la puissance manquante. La batterie se décharge. Le courant de référence devient négatif.

Le EMS commande automatiquement le convertisseur bidirectionnel afin de maintenir l'alimentation de la charge.

Gestion de l'état de charge SOC

Le EMS assure également la protection de la batterie à travers la surveillance du SOC (State Of Charge).

Deux limites principales sont imposées :

SOC min=20

SOC max=80

a) Protection contre la décharge profonde

Lorsque :

$SOC < SOC_{min}$

Le EMS interdit la décharge de la batterie afin de protéger sa durée de vie.

b) Protection contre la surcharge

Lorsque :

$SOC > SOC_{max}$

Le EMS réduit la charge de la batterie.

Dans ce cas, le système peut également réduire la puissance photovoltaïque en éloignant le panneau du point MPP ou dissiper le surplus d'énergie vers une charge décharge.

Stabilisation du bus continu

Le EMS participe également à la stabilisation du bus DC.

Les variations rapides d'irradiance peuvent provoquer :

Des chutes de tension. Des variations de puissance. Des oscillations transitoires.

Afin d'améliorer la stabilité du système :

La batterie réagit rapidement grâce au convertisseur Buck-Boost. Un filtrage des mesures de puissance est appliqué. Un condensateur de bus DC permet d'atténuer les transitoires.

Cette stratégie améliore fortement la qualité énergétique du système.

Gestion énergétique du capteur alimenté par le TENG

Le système intègre également un capteur de faible puissance (0,16 W) alimenté prioritairement par le TENG. Lorsque la puissance du TENG devient insuffisante, la batterie complète automatiquement le déficit via la relation :

$$P_{missing} = P_{sensor} - P_{teng}$$

Le courant de référence associé devient :

$$I_{sensor-ref} = P_{missing} / V_{bat}$$

Ainsi, la continuité d'alimentation du capteur est garantie quelle que soit la disponibilité des vibrations mécaniques.

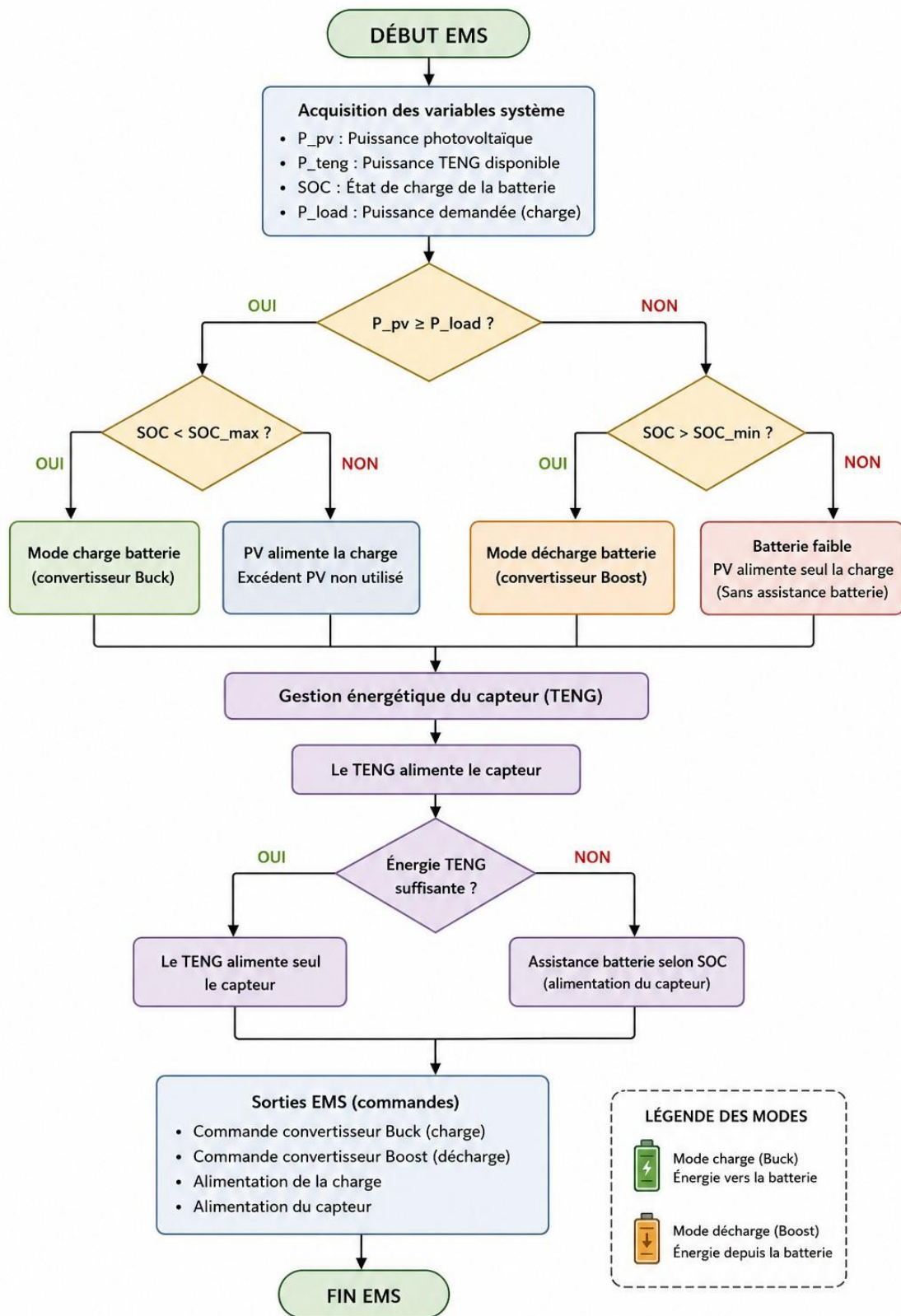


Figure 3.14: Architecture décisionnelle du système EMS hybride

3.10.3 Commande du convertisseur Buck-Boost bidirectionnel

Rôle du convertisseur Buck-Boost bidirectionnel

Le convertisseur Buck-Boost bidirectionnel représente l'élément principal de la stratégie de commande du système hybride.

Il assure les échanges énergétiques entre :

La batterie et le bus continu.

Ce convertisseur possède deux modes de fonctionnement :

a) Mode Buck

Dans ce mode :

L'énergie circule du bus DC vers la batterie. La batterie se charge. La tension est abaissée.

Ce mode apparaît lorsque la puissance photovoltaïque devient supérieure à la puissance consommée.

b) Mode Boost

Dans ce mode :

L'énergie circule de la batterie vers le bus DC. La batterie se décharge. La tension est élevée.

Ce mode est utilisé lorsque la puissance photovoltaïque devient insuffisante.

Commande en courant du convertisseur

La commande choisie dans ce travail est une commande en courant.

Cette stratégie permet :

Une meilleure stabilité. Une réponse dynamique rapide. Une gestion précise des échanges énergétiques. Une réduction des oscillations du bus DC.

Le EMS fournit un courant de référence $I_{bat-ref}$.

Le courant réel de la batterie est mesuré puis comparé à cette référence.

L'erreur obtenue est donnée par :

$$e = I_{bat-ref} - I_{bat}$$

Cette erreur est injectée dans un régulateur PI.

Choix des paramètres du correcteur PI

Plusieurs essais et ajustements successifs ont été réalisés afin d'évaluer l'influence des gains proportionnel et intégral sur les performances du système.

Après différentes simulations et comparaisons des résultats obtenus, les valeurs offrant le meilleur compromis entre rapidité de réponse, stabilité et faible dépassement ont été retenues.

Les paramètres finaux adoptés pour le régulateur sont $K_i=25$, $K_p=0.5$ pour le Buckboost, et $k_i=200$, $K_p=0.1$ pour le buck de la batterie vers le capteur.

3.10.4 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation complète du système hybride photovoltaïque-batterie-nanogénérateur triboélectrique sous MATLAB/Simulink, ainsi qu'à la conception de la stratégie de commande et du système de gestion d'énergie (EMS) assurant la coordination entre les différentes sources et charges du micro-réseau.

La modélisation du panneau photovoltaïque avec son algorithme MPPT, du convertisseur Buck-Boost bidirectionnel associé à la batterie, et du nanogénérateur triboélectrique avec sa chaîne de conditionnement a permis de construire un envi-

ronnement de simulation fidèle au comportement réel du système.

Le système de gestion d'énergie (EMS) constitue le cœur de la stratégie de contrôle adoptée. Il permet de gérer efficacement les flux d'énergie entre le panneau photovoltaïque, la batterie et le capteur alimenté par le TENG, en assurant une coordination dynamique entre les différentes sources selon les conditions d'ensoleillement. L'EMS protège la batterie contre les surcharges et les décharges profondes, optimise l'utilisation de l'énergie solaire disponible et garantit le fonctionnement continu du système quelles que soient les conditions de production.

L'ensemble des modèles et des stratégies de commande développés dans ce chapitre constitue la base nécessaire à la validation par simulation du système complet. Afin d'évaluer les performances réelles de cette architecture et de vérifier l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie adoptée, le chapitre suivant sera consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats de simulation obtenus selon deux scénarios d'irradiation complémentaires.

Interprétation des résultats

4.1 Introduction

Ce chapitre présente et interprète les résultats des simulations réalisées sous MATLAB/Simulink afin de valider le comportement du système hybride photovoltaïque-batterie-nanogénérateur triboélectrique. Deux scénarios de simulation ont été élaborés pour couvrir les cas les plus représentatifs des conditions d'ensoleillement réelles : une irradiation croissante simulant une montée en puissance progressive (matin vers midi), et une irradiation décroissante simulant un déclin de la production solaire (midi vers fin d'après-midi). Pour chaque scénario, les grandeurs électriques clés sont analysées et commentées, notamment les tensions et courants du panneau photovoltaïque, de la batterie et du capteur triboélectrique, ainsi que l'état de charge de la batterie.

4.2 Conditions et Paramètres de Simulation

Les deux simulations ont été effectuées dans des conditions identiques, à l'exception du profil d'irradiation. Les paramètres communs sont regroupés dans le tableau 4.1.

Table 4.1: Paramètres communs des deux simulations	
Paramètre	Valeur
Durée de simulation	20 s
Pas de changement d'irradiation	2 s
Température	25 °C (constante)
Puissance de la charge	122 W
Tension du bus DC principal	27 V
Tension du bus capteur	5 V
Puissance du capteur triboélectrique	0,16 W
SOC initial de la batterie	70 %
Fréquence de découpage	20 000 Hz

4.3 Simulation 1 : Irradiation Croissante (200 → 1000 W/m²)

La première simulation modélise une augmentation progressive de l'irradiation solaire de 200 W/m² à 1000 W/m², par paliers de 200 W/m² toutes les 2 secondes. Ce scénario représente la montée en puissance du système en cours de matinée.

4.3.1 Profil d'irradiation et température

L'irradiation solaire évolue par paliers successifs de 200 W/m², 400 W/m², 600 W/m², 800 W/m² et 1000 W/m², tandis que la température du panneau reste fixée à 25 °C tout au long de la simulation. Ce profil en échelons permet d'observer la réponse du système à des variations répétées de la ressource solaire, constituant ainsi un test de robustesse pour la stratégie de commande.

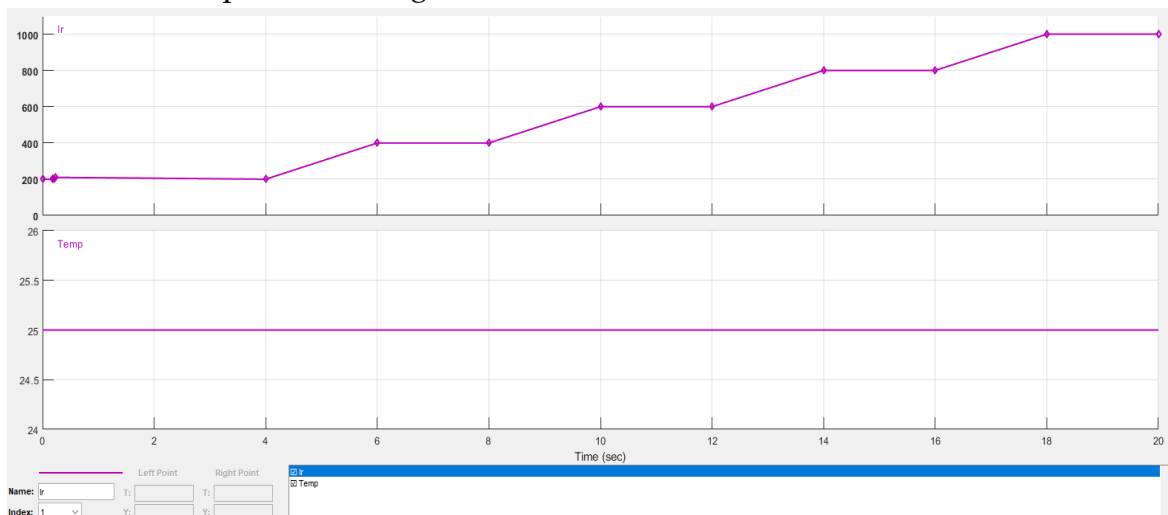


Figure 4.1: Profil d'irradiation et température – Simulation 1

4.3.2 Tension et courant du panneau photovoltaïque

La tension du panneau photovoltaïque (V_{PV}) se maintient de manière remarquablement stable autour de 26V tout au long de la simulation, quelle que soit la valeur de l'irradiation. Cette stabilité témoigne de l'efficacité de l'algorithme MPPT qui maintient le panneau à sa tension de puissance maximale (V_{mpp}).

En revanche, le courant du panneau (I_{PV}) augmente proportionnellement à l'irradiation, passant par paliers successifs de 1,8 A à 3,4 A, puis 5,1 A, 6,8 A et enfin 8,03 A. Cette évolution est parfaitement cohérente avec le comportement théorique d'un panneau photovoltaïque, pour lequel le courant au point de puissance maximale est directement proportionnel à l'irradiation incidente.

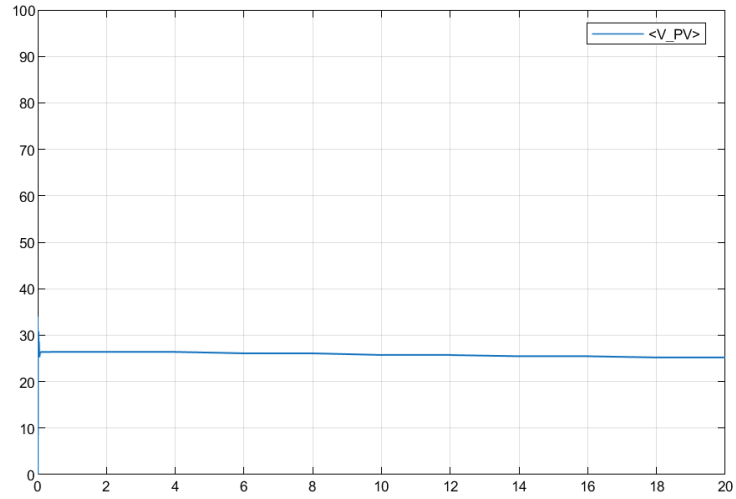


Figure 4.2: Tension V_{PV} – Simulation 1

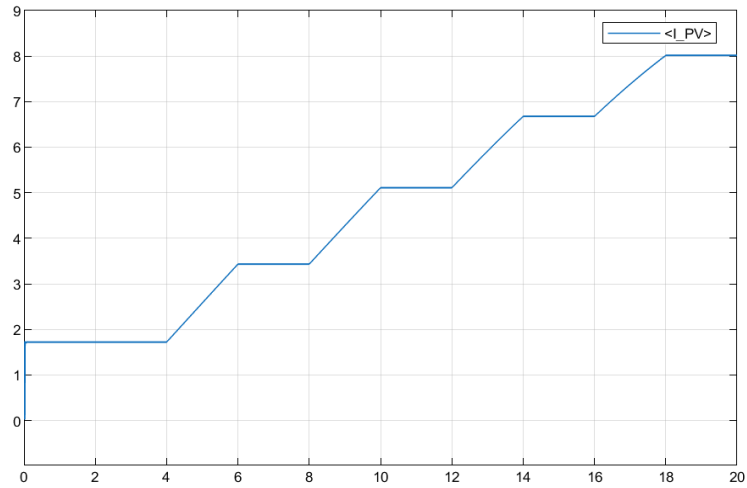


Figure 4.3: Courant I_{PV} – Simulation 1

Table 4.2: Évolution de I_{PV} et V_{PV} en fonction de l'irradiation – Simulation 1

Intervalle (s)	Irradiation (W/m^2)	I_{PV} (A)	V_{PV} (V)
0 → 4	200	1,8	≈ 25,1
4 → 8	400	3,4	≈ 25,5
8 → 12	600	5,1	≈ 25,7
12 → 16	800	6,8	≈ 26,0
16 → 20	1000	8,03	≈ 26,0

4.3.3 Bilan de puissance (P_{PV} , P_{load} , P_{bat})

L'analyse du bilan de puissance constitue l'élément central de la validation du système. La puissance de la charge (P_{load}) reste constante à 122 W tout au long de la

simulation, ce qui confirme que l'alimentation de la charge est assurée en permanence, indépendamment des variations d'irradiation.

La puissance de la batterie (P_{bat}) évolue en miroir par rapport à l'écart entre la production photovoltaïque et la consommation de la charge, conformément à la relation :

$$P_{bat} = P_{PV} - P_{charge} \quad (4.1)$$

Durant les deux premiers paliers (0 à 8 s), la puissance photovoltaïque est insuffisante pour couvrir la demande de la charge ($P_{PV} = 48 \text{ W}$ puis $90 \text{ W} < P_{load} = 122 \text{ W}$). La batterie fonctionne alors en mode décharge et compense le déficit énergétique, avec une puissance de décharge d'environ -75 W puis -37 W . À $t = 8 \text{ s}$, l'irradiation atteint 600 W/m^2 , produisant une puissance photovoltaïque proche de 122 W , plaçant le système dans un état d'équilibre quasi-parfait ($P_{bat} \approx 0 \text{ W}$). Pour les paliers suivants (12 s à 20 s), la production PV dépasse la demande et l'excédent est stocké dans la batterie, avec une puissance de charge d'environ $+45 \text{ W}$ puis $+83 \text{ W}$.

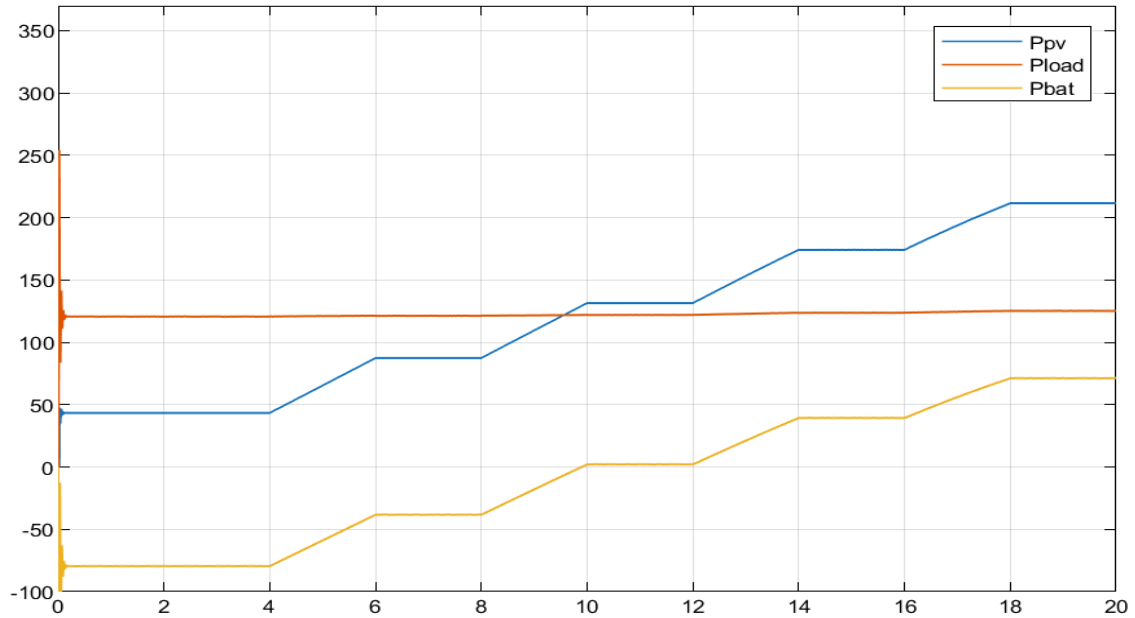


Figure 4.4: Bilan de puissance P_{PV} , P_{load} et P_{bat} – Simulation 1

4.3.4 Courant et tension de la batterie

Le courant de la batterie (I_{bat}) reflète fidèlement le comportement de la puissance de batterie. Il évolue de $-3,3 \text{ A}$ en mode décharge (irradiation faible) vers $+2,8 \text{ A}$ en mode charge (fort ensoleillement), en passant par une valeur presque nulle au point d'équilibre énergétique ($t \approx 8 \text{ s}$). Les transitions entre les différents paliers s'effectuent avec de brèves perturbations transitoires rapidement amorties par le correcteur PI, confirmant l'efficacité de la régulation du courant.

La tension de la batterie (V_{bat}) demeure parfaitement stable à 26 V tout au long de la simulation, sans aucune oscillation notable. Cette stabilité est la conséquence

directe de la régulation du courant par le correcteur PI : en contrôlant précisément le courant de charge et de décharge, le correcteur préserve la tension terminale de la batterie de toute perturbation significative.

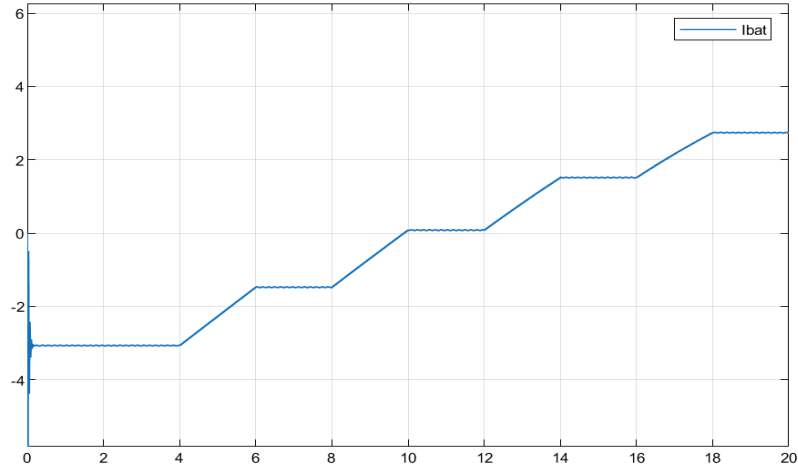


Figure 4.5: Courant de batterie I_{bat} – Simulation 1

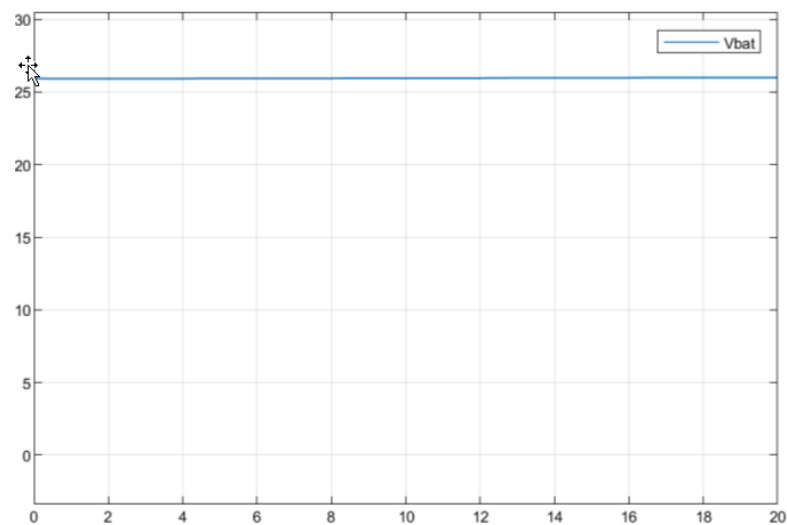


Figure 4.6: Tension de batterie V_{bat} – Simulation 1

4.3.5 État de charge de la batterie (SOC)

L'état de charge de la batterie démarre à 70,986 % et suit une évolution cohérente avec le bilan de puissance. Durant la phase de déficit énergétique (0 à 8 s), le SOC diminue légèrement jusqu'à atteindre un minimum de 70,975 %, témoignant de la décharge partielle de la batterie pour compenser l'insuffisance de la production photovoltaïque. À partir de $t = 12$ s, avec l'augmentation de l'irradiation au-delà du

seuil d'équilibre, le SOC remonte progressivement pour trouver sa valeur finale de 70,982 % à $t = 20$ s.

La variation totale du SOC, de l'ordre de 0,01 %, est faible en raison de la courte durée de simulation et de la capacité importante de la batterie. Elle illustre néanmoins clairement la dynamique charge/décharge commandée par le correcteur PI.

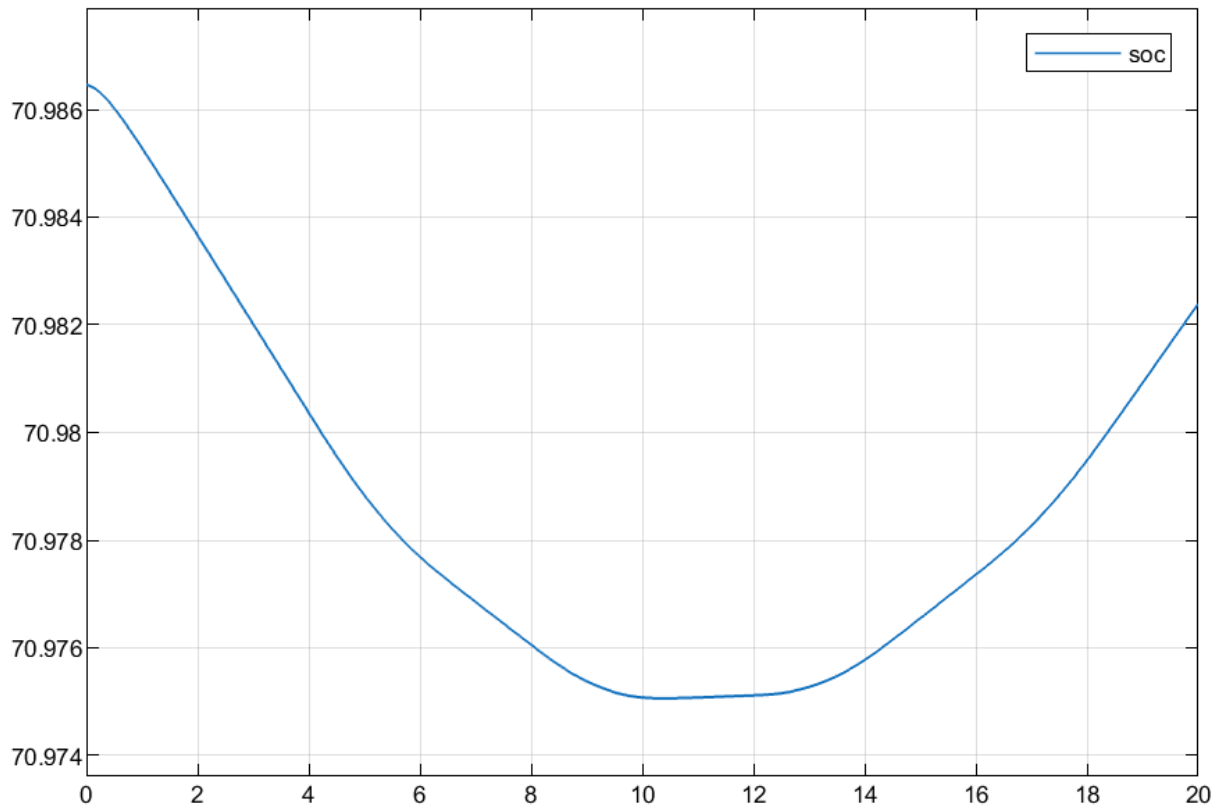


Figure 4.7: État de charge SOC – Simulation 1

4.3.6 Tension de la charge (Vload) — Simulation 1

La tension de la charge (Vload) se maintient à une valeur parfaitement stable d'environ 27 V tout au long de la simulation 1, indépendamment des variations d'irradiation croissante ($200 \rightarrow 1000$ W/m²) et du mode de fonctionnement de la batterie. Cette stabilité confirme que le système assure en permanence une alimentation continue et de qualité à la charge, sans aucune perturbation significative liée aux transitions entre les différents paliers d'irradiation. Ce résultat valide l'efficacité de l'architecture de conversion adoptée et la robustesse de la régulation mise en place.

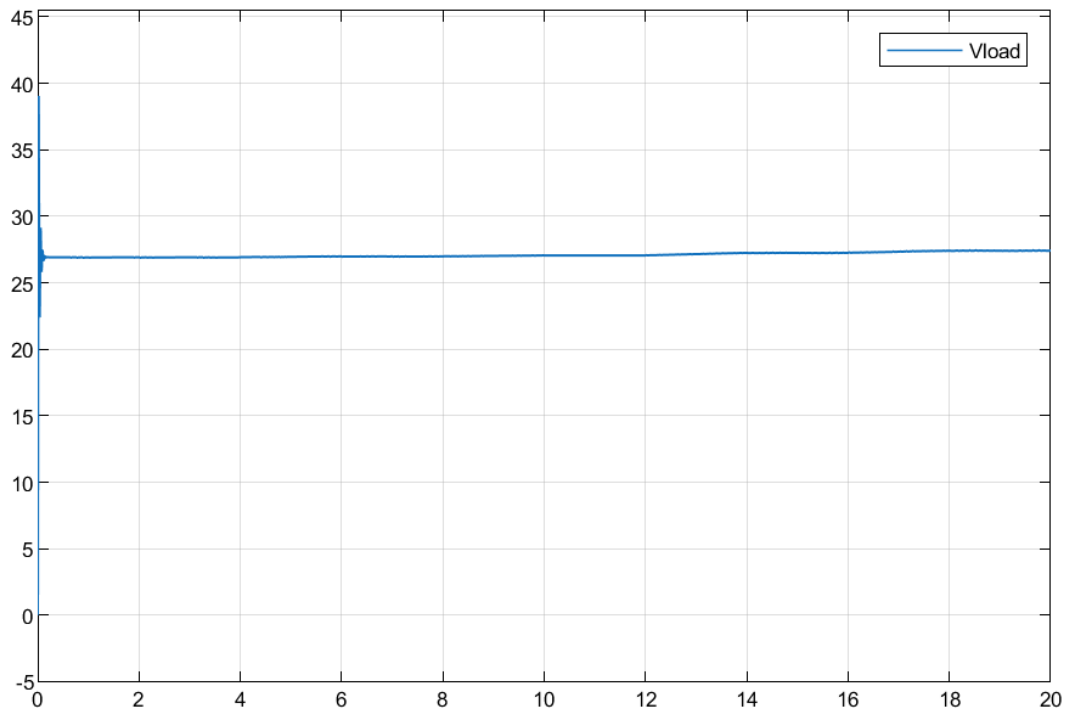


Figure 4.8: Tension de la charge Vload – Simulation 1

4.4 Simulation 2 : Irradiation Décroissante ($1000 \rightarrow 200 \text{ W/m}^2$)

La deuxième simulation constitue le scénario inverse du premier : l'irradiation solaire diminue progressivement de 1000 W/m^2 à 200 W/m^2 , par paliers de 200 W/m^2 toutes les 2 secondes. Ce scénario représente le déclin de la production solaire en fin de journée et permet de vérifier la symétrie du comportement du système ainsi que sa capacité à gérer une transition du mode charge vers le mode décharge de la batterie.

4.4.1 Profil d'irradiation et température

L'irradiation évolue de 1000 W/m^2 à $t = 0 \text{ s}$ vers 800, 600, 400 et enfin 200 W/m^2 , avec une température maintenue constante à 25°C . La comparaison avec la simulation 1 permettra de mettre en évidence la symétrie des réponses du système et de valider la robustesse de la commande dans les deux sens de variation de l'irradiation.

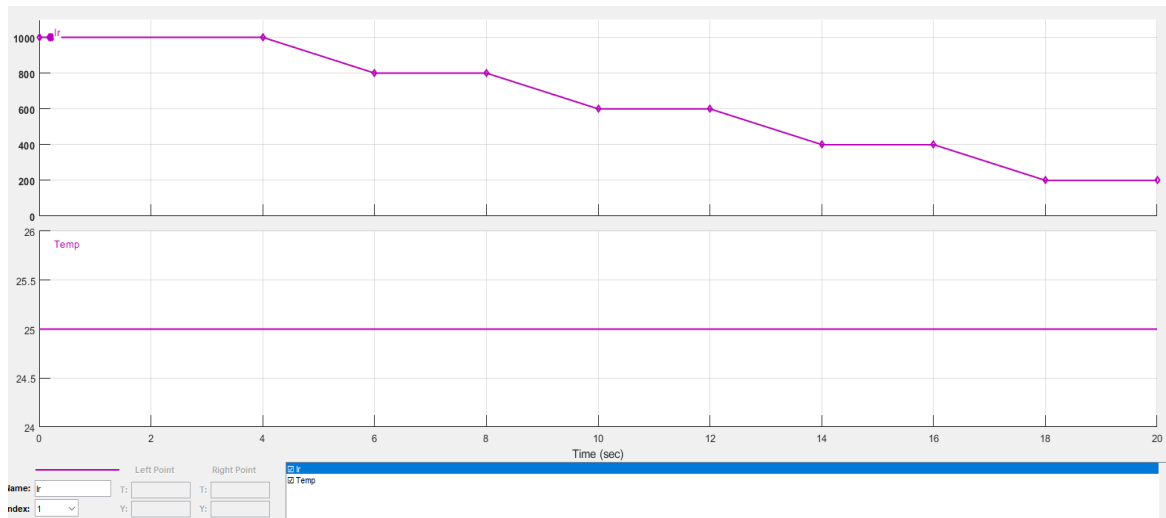


Figure 4.9: Profil d'irradiation et température – Simulation 2

4.4.2 Tension et courant du panneau photovoltaïque

La tension du panneau photovoltaïque (VPV) conserve sa stabilité autour de 26 V tout au long de la simulation, avec une légère décroissance progressive au fil des paliers d'irradiation, témoignant du maintien efficace du point de puissance maximale par l'algorithme MPPT. Contrairement à la simulation 1, aucune perturbation transitoire notable n'est observée lors des changements de palier dans la simulation 2. Ce comportement s'explique par le fait que le système démarre dans un état déjà pleinement stabilisé, correspondant à un fort ensoleillement initial de 1000 W/m², ce qui élimine la phase de mise en régime observée au démarrage du premier scénario.

Le courant du panneau (IPV) suit quant à lui une évolution décroissante par paliers successifs, passant de 8,03 A à 6,8 A, puis 5,1 A, 3,4 A et enfin 1,8 A, conformément à la diminution progressive de l'irradiation solaire. Cette progression est parfaitement symétrique à celle observée dans la simulation 1, ce qui confirme la linéarité de la réponse du panneau photovoltaïque à l'irradiation incidente et valide la cohérence du comportement du système dans les deux directions de variation de la ressource solaire.

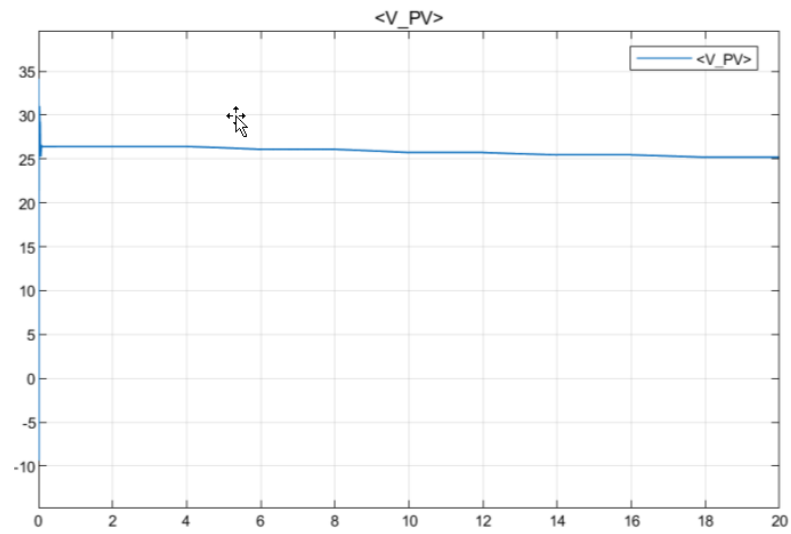


Figure 4.10: Tension V_{PV} – Simulation 2

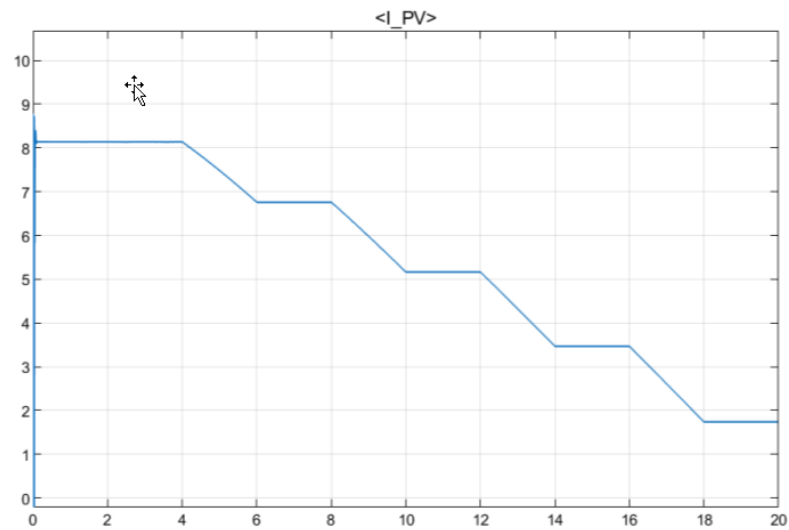


Figure 4.11: Courant I_{PV} – Simulation 2

Table 4.3: Évolution de I_{PV} et V_{PV} en fonction de l'irradiation – Simulation 2

Intervalle (s)	Irradiation (W/m^2)	I_{PV} (A)	V_{PV} (V)
0 → 4	1000	8,03	≈ 26
4 → 8	800	6,8	≈ 26
8 → 12	600	5,1	≈ 25,7
12 → 16	400	3,4	≈ 25,5
16 → 20	200	1,8	≈ 25,1

4.4.3 Bilan de puissance (P_{PV} , P_{load} , P_{bat})

Le comportement de la puissance est l'inverse exact de la simulation 1. La puissance de la charge (P_{load}) reste parfaitement stable à 122 W, confirmant la continuité

d'alimentation quelle que soit la direction de variation de l'irradiation. La puissance photovoltaïque part de sa valeur maximale ($\approx 212 \text{ W}$ à 1000 W/m^2) et décroît progressivement jusqu'à 48 W au dernier palier.

La puissance de la batterie commence en mode charge ($P_{bat} \approx +83 \text{ W}$) lorsque la production PV est excédentaire, passe par zéro à $t \approx 10 \text{ s}$ lors de l'équilibre énergétique (irradiation $\approx 600 \text{ W/m}^2$), puis bascule en mode décharge lorsque la production photovoltaïque devient insuffisante. Cette transition fluide démontre la capacité du système à changer de mode de fonctionnement sans interruption de l'alimentation de la charge.

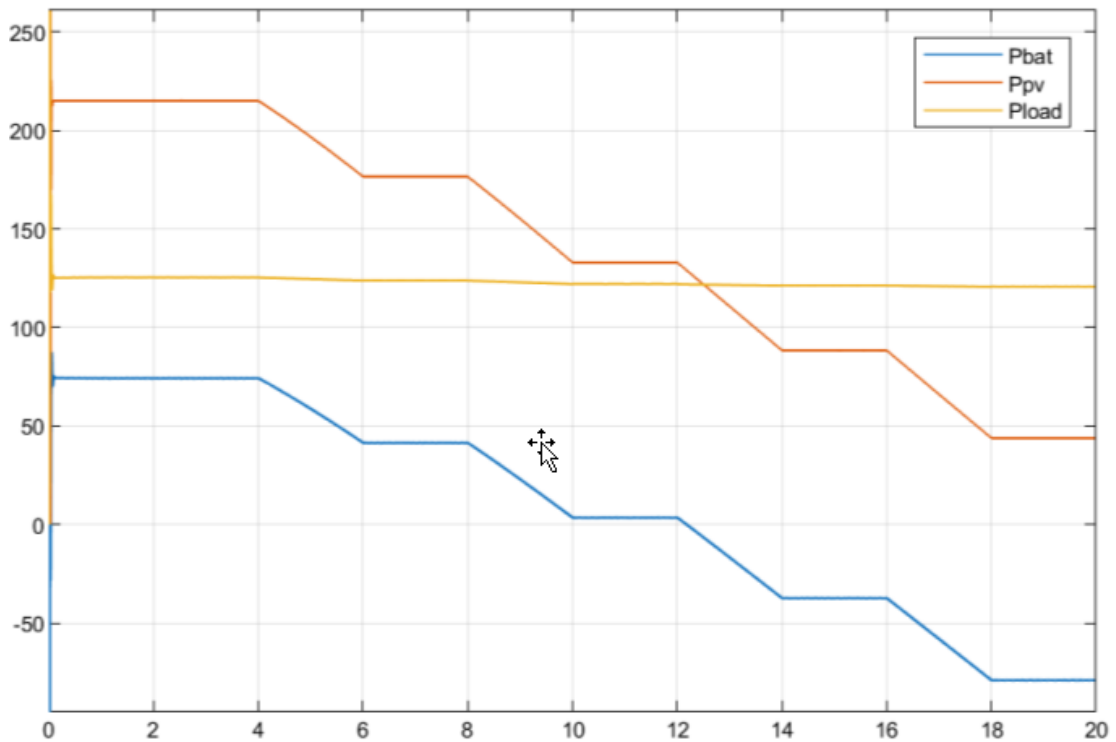


Figure 4.12: Bilan de puissance P_{PV} , P_{load} et P_{bat} – Simulation 2

4.4.4 Courant et tension de la batterie

Le courant de la batterie (I_{bat}) évolue symétriquement par rapport à la simulation 1 : il débute à $+2,8 \text{ A}$ (mode charge intense), diminue progressivement au fil des paliers et passe en valeur négative à partir de $t \approx 10 \text{ s}$ (mode décharge), atteignant $-3,3 \text{ A}$ au dernier palier. Le correcteur PI assure une régulation précise et continue du courant, avec des transitoires courts et bien amortis à chaque changement de palier.

La tension de la batterie (V_{bat}) présente la même stabilité remarquable que dans la simulation 1, se maintenant à 26 V tout au long de la simulation sans perturbation significative.

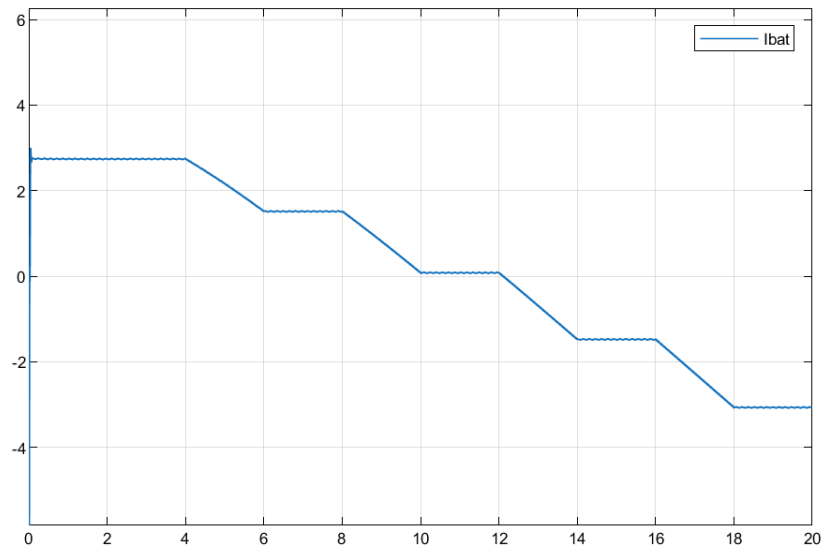


Figure 4.13: courant de batterie I_{bat} – Simulation 2

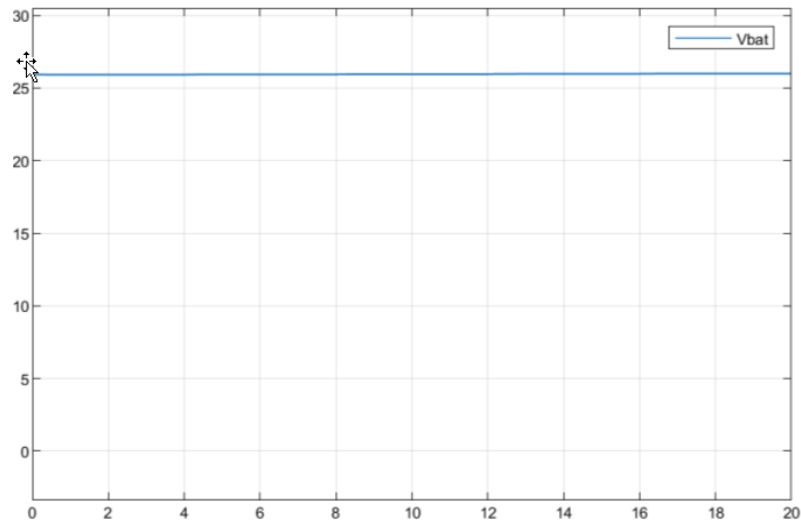


Figure 4.14: Tension de batterie V_{bat} – Simulation 2

4.4.5 État de charge de la batterie (SOC)

L'évolution du SOC dans la simulation 2 est inverse à celle de la simulation 1 : il augmente d'abord de 70 % à 70,012 % pendant la phase de charge (forte irradiation), atteint son maximum à $t \approx 12$ s correspondant au point d'équilibre énergétique, puis redescend progressivement à 70,004 % à la fin de la simulation lors de la phase de décharge. Cette évolution en cloche est parfaitement cohérente avec la dynamique du bilan de puissance et confirme la bidirectionnalité effective du système de stockage.

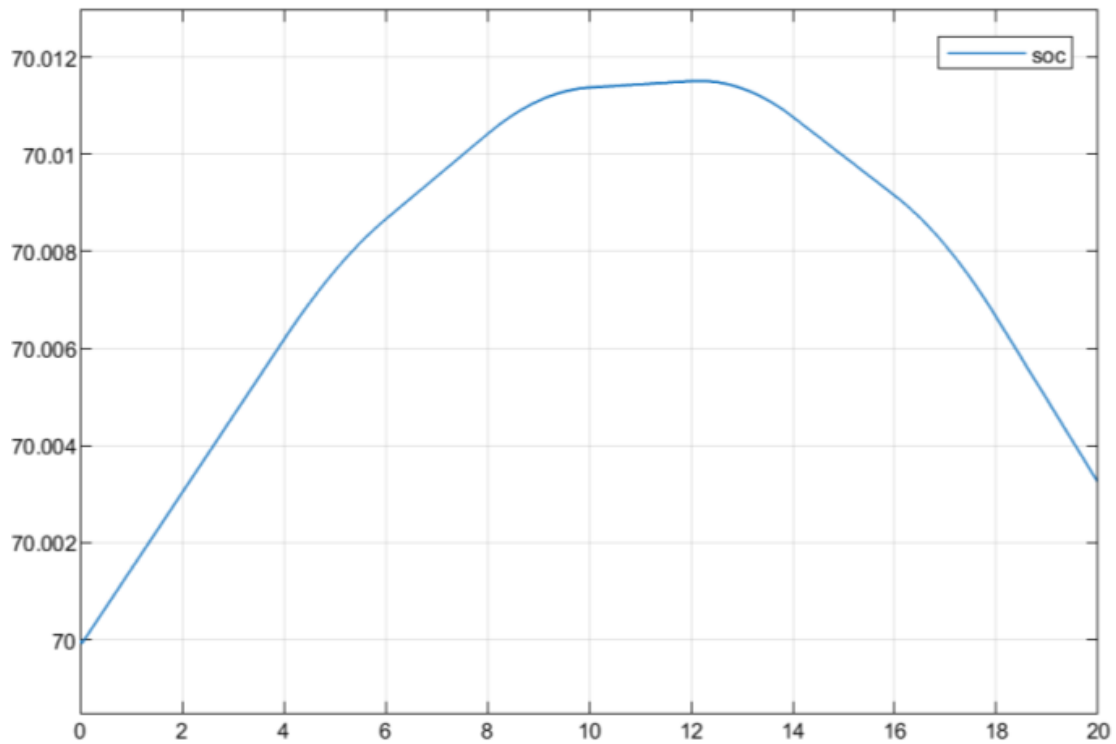


Figure 4.15: État de charge SOC – Simulation 2

4.4.6 Tension de la charge (Vload) — Simulation 2

De même, dans la simulation 2 (irradiation décroissante $1000 \rightarrow 200 \text{ W/m}^2$), la tension de la charge (Vload) demeure parfaitement stable à environ 27 V durant toute la durée de simulation, indépendamment de la direction de variation de l'irradiation et du mode de fonctionnement de la batterie. Malgré la transition progressive du mode charge vers le mode décharge de la batterie, aucune perturbation significative n'est observée sur la tension de la charge. Cette stabilité remarquable est le résultat direct de la régulation précise assurée par le correcteur PI, qui maintient en permanence l'équilibre énergétique entre les sources disponibles et la demande de la charge, quelle que soit la condition d'ensoleillement. Ce comportement symétrique par rapport à la simulation 1 constitue un résultat particulièrement significatif : il démontre que le système réagit de manière cohérente et robuste dans les deux directions de variation de l'irradiation solaire. La continuité d'alimentation de la charge à 122 W est ainsi garantie en toutes circonstances, validant à la fois l'architecture de conversion adoptée et l'efficacité de la stratégie de gestion d'énergie mise en place.

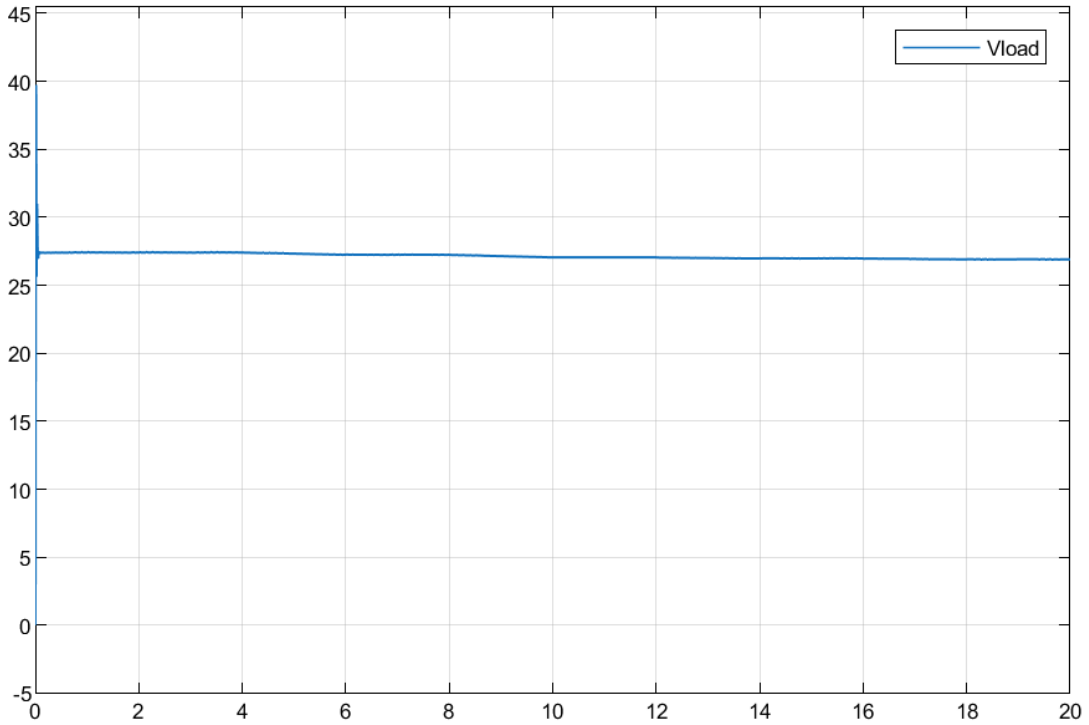


Figure 4.16: Tension de la charge Vload – Simulation 2

4.5 Alimentation du Capteur

L'alimentation du capteur constitue une fonctionnalité distinctive du système développé. Contrairement à la charge principale de 121 W gérée par le convertisseur Buck-Boost, le capteur de 0,16 W est alimenté par un convertisseur Buck dédié, dont la source d'énergie alterne entre la batterie et le nanogénérateur triboélectrique selon la disponibilité de ce dernier. Cette section est commune aux deux simulations, le comportement du capteur étant identique dans les deux scénarios.

4.5.1 Phase transitoire : Batterie vers Nanogénérateur

Au démarrage de la simulation ($t = 0$), le nanogénérateur triboélectrique n'a pas encore atteint sa puissance nominale. La batterie prend en charge l'alimentation du capteur via le convertisseur Buck, fournissant une puissance initiale de 0,53 W (P_{batcap}). Durant cette phase transitoire (0 à 5 s), la puissance du nanogénérateur (P_{teng}) croît progressivement à mesure qu'il monte en régime, tandis que la contribution de la batterie diminue en conséquence.

À $t \approx 5$ s, le nanogénérateur atteint sa puissance nominale suffisante pour alimenter seul le capteur. Le système bascule automatiquement vers cette source, et la puissance fournie par la batterie au capteur (P_{batcap}) s'annule. Une brève perturbation est observable à l'instant de commutation, mais le capteur maintient son alimentation en permanence.

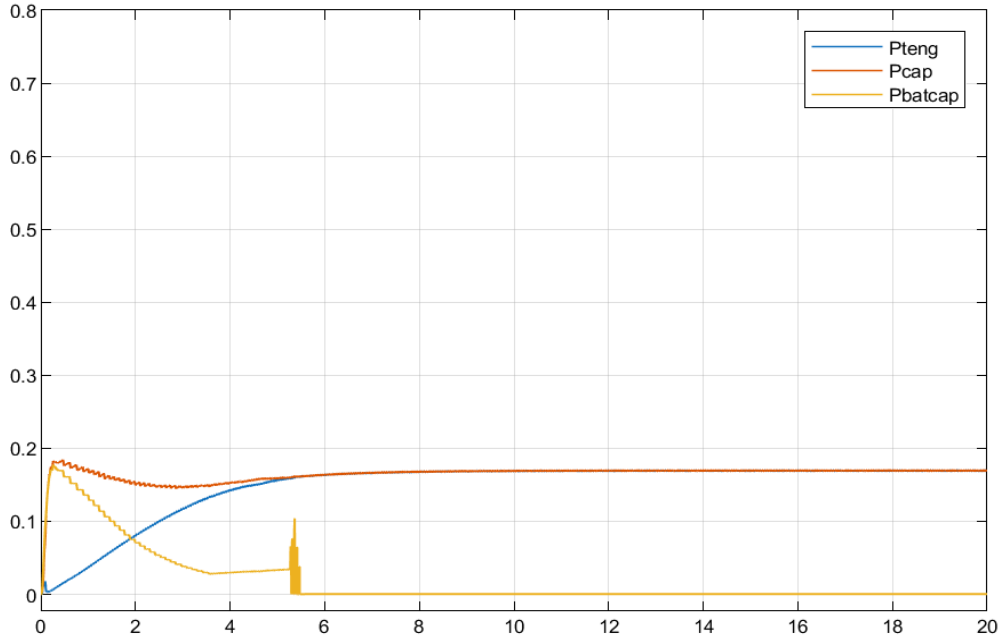


Figure 4.17: Puissances P_{cap} , P_{batcap} et P_{teng} – Transition batterie vers nanogénérateur

4.5.2 Puissance du capteur en régime permanent

Après la phase transitoire, la puissance reçue par le capteur (P_{cap}) se stabilise à 0,16 W, correspondant exactement à la puissance nominale requise. Le nanogénérateur triboélectrique fournit une puissance légèrement supérieure ($P_{teng} \approx 0,164$ W). La batterie ne contribue plus à l'alimentation du capteur ($P_{batcap} = 0$), ce qui préserve son état de charge pour les besoins de la charge principale.

Ce comportement valide la logique de gestion de l'énergie du capteur : tant que le nanogénérateur est opérationnel et fournit une puissance suffisante, il prend en charge seul l'alimentation du capteur, économisant ainsi l'énergie stockée dans la batterie.

4.5.3 Tension d'alimentation du capteur (V_{cap})

La tension d'alimentation du capteur (V_{cap}) présente des oscillations transitoires durant la phase de démarrage (0 à 4 s), inhérentes au régime transitoire du convertisseur Buck et à la montée en puissance progressive du nanogénérateur. Ces oscillations s'inscrivent dans une plage acceptable (4,9 V à 5,3 V) et n'affectent pas le fonctionnement du capteur.

À partir de $t \approx 4$ s, la tension se stabilise à environ 5 V et maintient cette valeur avec une précision remarquable jusqu'à la fin de la simulation, confirmant l'efficacité de la régulation du convertisseur Buck et la fiabilité de l'alimentation du capteur triboélectrique en régime permanent.

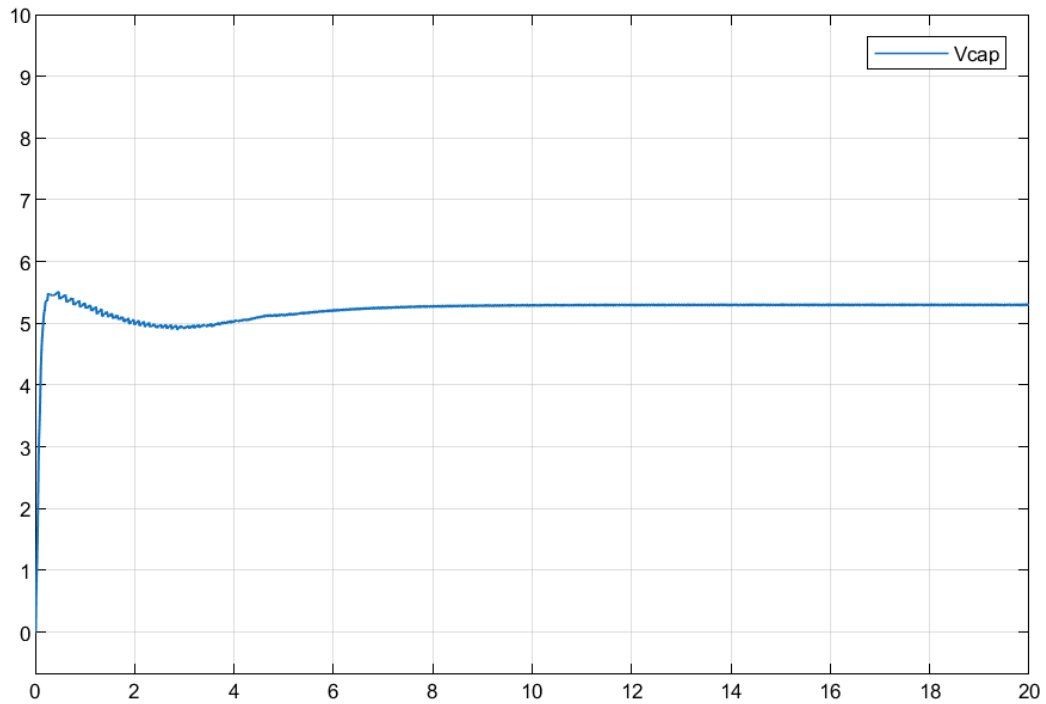


Figure 4.18: Tension d'alimentation du capteur V_{cap}

4.6 Analyse Comparative des Deux Simulations

La confrontation des résultats des deux simulations permet de dégager les conclusions suivantes sur les performances globales du système. Le tableau 4.4 résume les grandeurs clés des deux scénarios.

Table 4.4: Comparaison des résultats des deux simulations

Paramètre	Simulation 1	Simulation 2
Courant PV initial (A)	1.8	8.03
Courant PV final (A)	8.03	1.8
Tension moyenne PV (V)	26	26
Courant batterie initial (A)	-3.3	+2.8
Courant batterie final (A)	+2.8	-3.3
Tension batterie (V)	26	26
Évolution du SOC (%)	Décharge-charge	Charge-décharge
Puissance de charge (W)	122	122
Puissance du capteur (W)	0.16	0.16
Tension du capteur (V)	5	5
Perturbations transitoires	Très faibles	Très faibles

L'analyse comparative révèle une symétrie quasi-parfaite entre les deux simulations, ce qui démontre que le système et sa commande PI fonctionnent de manière cohérente et robuste dans les deux directions de variation de l'irradiation. Dans les

deux cas, la continuité d'alimentation de la charge principale (122 W) et du capteur triboélectrique (0,16 W) est assurée sans interruption, et la tension de la batterie reste parfaitement stable.

4.7 Conclusion

Les résultats de simulation présentés dans ce chapitre ont permis de valider de manière complète et rigoureuse les performances du système hybride photovoltaïque-batterie-nanogénérateur triboélectrique. Les deux scénarios de simulation ont démontré la capacité du système à :

- Assurer la continuité d'alimentation de la charge de 122 W en toutes circonstances ;
- Gérer automatiquement la transition entre les modes charge et décharge de la batterie ;
- Maintenir la tension de la batterie stable grâce à la régulation PI du courant ;
- Alimenter le capteur triboélectrique à 0,16 W / 5 V avec transition automatique nanogénérateur-batterie ;
- Présenter un comportement symétrique et robuste face aux variations croissantes et décroissantes de l'irradiation.

Ces résultats valident la pertinence de l'architecture système proposée et l'efficacité de la stratégie de commande adoptée. L'ensemble du système répond aux objectifs fixés et offre une solution fiable pour la gestion d'énergie dans des environnements à ressources solaires variables.

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à la modélisation, la commande et la gestion d'énergie d'un micro-réseau hybride combinant un panneau photovoltaïque, une batterie et un nanogénérateur triboélectrique. L'objectif principal était de concevoir un système capable d'assurer une alimentation continue et stable d'une charge de 122 W et d'un capteur de faible puissance (0,16 W), quelles que soient les conditions d'ensoleillement, en exploitant de manière complémentaire les trois sources d'énergie disponibles.

Le premier chapitre a établi le cadre énergétique général du travail, en présentant les différentes formes d'énergie disponibles et en soulignant la nécessité de la transition énergétique vers les sources renouvelables face aux limites des énergies fossiles. Le deuxième chapitre a introduit les nanogénérateurs triboélectriques, en décrivant leur principe de fonctionnement basé sur l'effet triboélectrique et leurs quatre modes d'opération, positionnant ainsi le TENG comme une solution de récupération d'énergie mécanique ambiante adaptée aux applications de faible puissance. Le troisième chapitre a été dédié à la modélisation complète du système sous MATLAB/Simulink, comprenant le panneau photovoltaïque avec son algorithme MPPT, la batterie avec sa gestion bidirectionnelle par convertisseur Buck-Boost, et le nanogénérateur triboélectrique avec sa chaîne de conditionnement (redressement, filtrage et convertisseur Buck). La stratégie de commande PI appliquée à la boucle de courant de la batterie a également été détaillée.

Le quatrième chapitre a présenté et interprété les résultats des simulations réalisées selon deux scénarios complémentaires : une irradiation croissante de 200 W/m² à 1000 W/m², et une irradiation décroissante de 1000 W/m² à 200 W/m². Les résultats obtenus ont démontré que le correcteur PI assure une régulation précise et robuste du courant de batterie dans les deux directions de variation de l'irradiation. La tension de la batterie est maintenue stable à 26 V tout au long des simulations, la charge principale de 122 W est alimentée en permanence sans interruption, et le capteur triboélectrique reçoit en régime permanent une alimentation stable de 5 V / 0,16 W grâce à la transition automatique entre le nanogénérateur et la batterie. L'évolution cohérente de l'état de charge de la batterie dans les deux scénarios confirme la bidirectionnalité effective du système de stockage et la pertinence de la stratégie de gestion d'énergie adoptée.

Les résultats de simulation valident ainsi la viabilité de l'architecture hybride proposée et l'efficacité de la commande PI pour la gestion des flux d'énergie au sein du micro-réseau. Le système développé illustre concrètement comment la complémentarité entre une source d'énergie solaire, un système de stockage par batterie et un nanogénérateur triboélectrique peut constituer une solution énergétique autonome,

flexible et adaptée aux exigences des systèmes embarqués et des applications à faible consommation.

En perspective, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés pour enrichir ce travail. Sur le plan de la commande, le remplacement du correcteur PI classique par des techniques de commande avancées — telles que la commande par mode glissant, la commande prédictive ou les approches basées sur l'intelligence artificielle — pourrait améliorer la robustesse et les performances dynamiques du système face aux perturbations. Sur le plan de la modélisation, l'intégration d'un modèle thermique de la batterie et d'un modèle plus fidèle du TENG basé sur des caractérisations expérimentales permettrait de se rapprocher davantage du comportement réel du système. Enfin, la validation expérimentale sur un prototype physique constituerait une étape essentielle pour confirmer les résultats de simulation et évaluer les performances du système dans des conditions d'utilisation réelles.

Bibliographie

- [1] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed. Academic Press, 2013.
- [2] V. Smil, *Energy and Civilization: A History*, MIT Press, 2017.
- [3] F. Blaabjerg and D. M. Ionel, *Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB/Simulink*, CRC Press, 2017.
- [4] R. A. Serway and J. W. Jewett, *Physics for Scientists and Engineers*, 10th ed. Boston, MA, USA: Cengage Learning, 2018.
- [5] O'Keefe, J. M. K., et al. (2013). On the fundamental difference between coal rank and coal type. *International Journal of Coal Geology*, 118, 58-87.
- [6] Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5th ed.). CRC Press.
- [7] Mokhatab, S., Mak, J. Y., Valappil, J. V., & Wood, D. A. (2016). Market and technology assessment of natural gas processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30, 487–514.
- [8] Braae, E., Diedrich, L., & Svensson, C. (2024). Reading nuclear landscapes: A global typological investigation of nuclear power plant sites. *Journal of Landscape Architecture*, 19(3), 1–21.
- [9] G. Boyle, B. Everett, and J. Ramage, *Energy Systems and Sustainability: Power for a Sustainable Future*, 2nd ed. Oxford University Press, 2012.
- [10] I. R. G. International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook*, 2023.
- [11] Kaced, K., Semaoui, S., Laib, I., Alik, R., & Benyoucef, B. (2024). Accurate Method for Solar Power Generation Estimation for Different PV Technologies. *Resources*, 13(12), 166.
- [12] McKenna, R., Ostman v. der Leve, M., & Fichtner, W. (2016). Key challenges and prospects for large-scale onshore wind energy deployment. *Applied Energy*, 166, 120-135.
- [13] Leitão, N. S., Castilho, E., & Farinha, M. L. B. (2023). Towards a Better Understanding of Concrete Arch Dam Behavior during the First Filling of the Reservoir. *CivilEng*, 4(1), 151–173.
- [14] Speight, J. G. (2020). *The Refinery of the Future* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.
- [15] Elshehabi, T., & Davoodi, S. (2025). Sustainable Geothermal Energy: A Review of Challenges and Opportunities in Deep Wells and Shallow Heat Pumps for Transitioning Professionals. *Energies*, 18(4), 811.
- [16] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, Abu Dhabi, 2023.
- [17] International Energy Agency (IEA), *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, Paris, 2021.
- [18] Smil, V., *Energy Transitions: Global and National Perspectives*, 2nd ed. Praeger, 2017.

- [19] École Supérieure des Métiers des Energies Renouvelables (ESMER), "Comprendre les énergies renouvelables." [Online].
- [20] Zhong Lin Wang and Aurelia Chi Wang. "On the origin of contact-electrification". In: *Materials Today* 30 (2019), pp. 34–51. ISSN: 1369-7021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2019.05.016>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702119303700> (cit. on p. 2).
- [21] Weon-Guk Kim, Do-Wan Kim, Il-Woong Tcho, Jin-Ki Kim, Moon-Seok Kim, and Yang-Kyu Choi. "Triboelectric Nanogenerator: Structure, Mechanism, and Applications". In: *ACS Nano* 15.1 (2021). PMID: 33427457, pp. 258–287. DOI: 10.1021/acsnano.0c09803. eprint: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09803>. URL: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c09803> (cit. on p. 2).
- [22] Van De Graaff Generator. Sept. 2022. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff_generator (cit. on p. 4).
- [23] Hannah Ritchie, Max Roser, and Pablo Rosado. "Energy". In: *Our World in Data* (2020). <https://ourworldindata.org/energy> (cit. on p. 5).
- [24] Zhong Lin Wang, Long Lin, Jun Chen, Simiao Niu, and Yunlong Zi. "Triboelectrification". In: *Triboelectric Nanogenerators*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1–19. DOI: 10.1007/978-3-319-40039-6-1. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40039-6-1> (cit. on p. 5).
- [25] Enrique Delgado-Alvarado, Ernesto A Elvira-Hernández, José Hernández-Hernández, Jesús Huerta-Chua, Héctor Vázquez-Leal, Jaime Martinez-Castillo, Pedro J Garcia-Ramirez, and Agustín L Herrera-May. "Recent Progress of Nanogenerators for Green Energy Harvesting: Performance, Applications, and Challenges". In: *Nanomaterials* 12.15 (2022), p. 2549 (cit. on p. 6).
- [26] Venkateswaran Vivekananthan, Arunkumar Chandrasekhar, Nagamalleswara Rao Alluri, Yuvasree Purusothaman, Gaurav Khandelwal, and Sang-Jae Kim. "Triboelectric Nanogenerators: Design, Fabrication, Energy Harvesting, and Portable-Wearable Applications". In: *Nanogenerators*. Ed. by Sang Jae Kim, Arunkumar Chandrasekhar, and Nagamalleswara Rao Alluri. Rijeka: IntechOpen, 2020. Chap. 1. DOI: 10.5772/intechopen.90951. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.90951> (cit. on pp. 8, 9).
- [27] Zhong Lin Wang, Long Lin, Jun Chen, Simiao Niu, and Yunlong Zi. "Triboelectric Nanogenerator: Vertical Contact-Separation Mode". In: *Triboelectric Nanogenerators*. Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 23–47. ISBN: 978-3-319-40039-6. DOI: 10.1007/978-3-319-40039-6-2. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40039-6-2> (cit. on pp. 9, 23, 24).
- [28] Zhihao Zhao et al. "Selection rules of triboelectric materials for direct-current triboelectric nanogenerator". In: *Nature Communications* 12 (Aug. 2021). DOI: 10.1038/s41467-021-25046-z (cit. on p. 10).