

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية

الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث

العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : automatique

Spécialité : automatique et informatique industrielle

Sujet

Dispositifs hybrides photovoltaïques et triboélectriques pour une récupération simultanée d'énergie solaire et de vibrations mécaniques

Présenté par : - MARREF ACHREF - HATIBA ABDELMOUMIN

Devant le jury :

M/ZEBIRI FOUAD	Professeur	Univ-BBA	Président
M/BENHADOUGA SEDDIK	Professeur	Univ-BBA	Examineur
M/ MEDDAD MOUNIR	Professeur	Univ-BBA	Encadrant

Année universitaire 2024/2025

Remerciement

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la Volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Pr Meddad Mounir, on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire. Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt Qu'ils ont porté à

notre travail :

Pr: ZEBIRI FOUAD

Pr: BENHADOUGA SEDDIK

Nos remerciement s'adresse également à tout nos professeurs pour Leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

Dédicace

Nous dédions ce fruit de nos efforts à :

En tout premier lieu, à ceux que les mots ne sauraient remercier à leur juste valeur,

À nos chers parents,

qui ont sacrifié leur confort et leur temps pour nous élever et nous instruire, qui nous ont entourés de leurs prières, de leur patience et de leur bienveillance, et qui ont toujours été le pilier fondamental de chaque réussite que nous avons pu atteindre.

Que Dieu les protège et les récompense pour tout ce qu'ils ont accompli.

À notre famille et à nos proches,

*à ceux qui ont été notre soutien dans les moments les plus difficiles,
et à nos amis fidèles, toujours présents par leur aide et leur sincérité.*

À nos respectés enseignants,

*ainsi qu'à l'ensemble de l'équipe pédagogique et administrative du département
électromécanique,
pour leur accompagnement, leurs conseils, et leur soutien continu envers les
étudiants.*

Et à toute personne, de près ou de loin,

*qui a contribué à notre parcours académique ou marqué de son empreinte notre
formation.*

HATIBA ABDELMOUMIN

MARREF ACHREF

Liste des figures

Figure 1.1 : l'énergie -	4
Figure 1.2 : les différentes formes de l'énergie	6
Figure 1.3 : Les sources d'énergies	7
Figure 1.4 : Les énergies fossiles et Nucléaire	8
Figure 1.5 : part des énergies renouvelables dans le mix électrique mondial (en %)	10
Figure 1.6 : les différents types d'énergies renouvelables	13
Figure 1.7 : Éolienne à axe vertical et axe horizontal	13
Figure 1.8 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique	14
Figure 1.9 : centrale biomasse	15
Figure 1.10: Géothermie haute température	16
Figure 1.11: Les panneaux solaires thermiques	17
Figure 1.12 : les panneaux solaires photovoltaïques	17
Figure 1.13 : l'énergie solaire thermique	19
Figure 1.14 : l'énergie solaire photovoltaïque	19
Figure 1.15 : silicium cristallin cellule photovoltaïque	20
Figure 1.16: Représentation schématique d'une cellule solaire	20
Figure 1.17 : Schéma d'une cellule de silicium cristallin jonction PN	22
Figure 1.18 : Lumière réfléchie à l'arrière du panneau	22
Figure 1.19 : panneaux solaires hybrides PV-TENG	23
Figure 1.20 : Intégration des micro-onduleurs au sein des systèmes photovoltaïques pour optimiser la gestion de l'énergie	23
Figure 1.21 : Une cellule solaire pérovskite efficace à 25,17 % grâce à une nouvelle couche photo active	24
Figure 1.22: cellules photovoltaïques organiques	25
Figure 1.23 : Cellule tandem 3T-SBOB (projets THESIS et BOBTANDEM) indiquant (a) l'empilement de couches et schéma équivalent et (b) la structure de bands à l'interface entre la cellule PSC haut gap et la cellule Si-IBC bas gap, au point de fonctionnement maximal des deux sous-cellules	25

Figure 2.1 : classification des systèmes hybrides	31
Figure 2.2 : Système hybride avec connexion série	33
Figure 2.3 : Système hybride à commutation	34
Figure 2.4: Système hybride à connexion parallèle	35
Figure 2.5 : Alliages à mémoire de forme (AMF)	40
Figure 2.6 :Déformation d'un fil AMF sous chargement thermique et mécanique	42
Figure 2.7 : Effets piézoélectriques	47
Figure 2.8 : Classes cristallines et piézoélectriques	47
Figure 2.9 : Quatre modes de fonctionnement des nano générateurs triboélectriques (TENGs)(a) Mode de contact et de séparation verticale (b) Mode de glissement par contact (c) Mode à électrode unique (d) Mode à couche triboélectrique autonome.	49
Figure 2.10 : (a) Les niveaux de puissance et leurs applications correspondantes(b) Le processus de conversion de l'énergie, y compris la récolte d'énergie par des nan générateurs.....	50
Figure 2.11 : Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique-diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (Société Royale de Chimie	52
Figure 2.12 : Le mode coulissant dans le plan TENG	52
Figure 2.13 : Modèles théoriques pour (a) le mode glissant TENG à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique et (b) le mode coulissant à plaque parallèle électrode attachée conducteur à diélectrique TENG. (C and d) Influence de (c) taille de l'entrefer et (d) aspect diélectrique rapport sur l'efficacité de transfert de charge du mode conducteur-diélectrique à glissement TENG lorsqu'une séparation complète a été atteinte. La constante diélectrique est de 2 dans ce calcul	53
Figure 2.14 : Mode TENG à électrode unique	53
Figure 2.15 : Comparaison des performances entre le mode libre et le mode traditionnel d'un nanogénérateur triboélectrique en fonction du déplacement (x) et de la distance (g, h)	54
Figure 2.16 : La série triboélectrique de certains matériaux	54
Figure 2.17 : Un triboélectrique-photovoltaïque	56

Figure 3.1 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.	58
Figure 3.2 : simulation d'un cellule photovoltaïque schéma bloc SIMULINK	60
Figure 3.3 : schéma bloc sur Simulink MATLAB d'un circuit PV	61
Figure 3.4: la caractéristique $I_{pv}=f(V)$	61
Figure 3.5 : la caractéristique $P_{pv}=f(V)$	62
Figure 3.6 : Schéma du CS-TENG employé pour l'analyse numérique en (a) format 2D (b) format 3D	66
Figure 3.7 : Analyse du graphique de la tension en circuit ouvert (VOC) en fonction de la distance de séparation.....	66
Figure 3.8 : densité de charge de sortie.....	67
Figure 3.9 : densité de courant en court-circuit	68
Figure 3.10 : Chaîne de Conversion TENG (AC) sous MATLAB/Simulink.....	68
Figure 3.11 : la caractéristique $I_{teng}=f(V)$	70
Figure 3.12 : la caractéristique $P_{teng}=f(V)$	71
Figure 3.13 : schéma bloc sur Simulink MATLAB d'un système hybride cellule photovoltaïque +générateur triboélectrique.....	72
Figure 3.14 :Puissance de la cellule PV, puissance du générateur triboélectrique, et puissance dusystème hybride (cellule photovoltaïque + TENG).....	72

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Évolution de la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité – AIE	11
Tableau 1.2: Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité par continent... 12	
Tableau 3.1 : Les principales caractéristiques de l'unité.....	59
Tableau 3.2 : Développement de l'apport du P_{pv} à la puissance totale (P_t) selon l'irradiance solaire (E)	74

Abréviations et Nomenclature

Symbole	Sens
PV	Photovoltaïque
IPV	courant de la cellule photovoltaïque (A)
VPV	tension de la cellule photovoltaïque (v)
E	Éclairement ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)
I _{cc}	courant de court-circuit (A)
V _{co}	tension de circuit ouvert (v)
I _p , I _{ph}	photo courant généré (A)
H	Rendement
I _D	courant de diode (A)
I ₀	Le courant de saturation
K	La constante de Boltzmann
T	temperature (k)
R _{sh}	Résistance parallèle (ou shunt) (Ω)
R _s	Resistance série(Ω)
I	Courant électrique(A)
TENG	Nano-generator triboélectrique

الملخص

تحتل الطاقة الشمسية مكانة بارزة بين مصادر الطاقة المتجددة، نظرًا لتوفرها الواسع ونظافتها البيئية، إلا أن اعتمادها الكلي على الإشعاع الشمسي يجعل أداءها محدودًا في حالات الظل، الغيوم، أو أثناء الليل، مما يطرح تساؤلات جدية حول استمرارية التزويد بالطاقة. في ظل التحديات البيئية المتزايدة والحاجة الملحة إلى مصادر طاقة نظيفة ومستدامة، أصبح من الضروري التفكير في حلول بديلة تدعم هذه الأنظمة وتعزز استقرارها.

انطلاقًا من هذا التحدي، يهدف هذا العمل إلى تصميم نظام هجين مبتكر يجمع بين الخلية الكهروضوئية التقليدية ومولد النانو التريبولكتريك، الذي يعتمد على مبدأ الكهرباء الساكنة الناتجة عن الاحتكاك. يتميز هذا النوع من المولدات بقدرته على استخلاص الطاقة من مصادر غير تقليدية مثل احتكاك الملابس، أو دوران عجلات السيارات، أو غيرها من أشكال الحركة اليومية. وهو ما يمنح هذا النظام الهجين ميزة فريدة: إنتاج الطاقة حتى في غياب الشمس.

كلمات مفتاحية : نظام طاقة هجين / طاقة شمسية / خلية كهروضوئية (PV) / مولد نانوي تريبولكتريكي (TENG)

Abstract:

Solar energy holds a prominent position among renewable energy sources due to its wide availability and environmentally friendly nature. However, its complete reliance on sunlight limits its performance in situations such as shading, cloudy weather, or nighttime, raising serious concerns about the continuity of energy supply. In light of growing environmental challenges and the urgent need for clean and sustainable energy sources, it becomes necessary to explore alternative solutions capable of supporting these systems and enhancing their stability.

With this in mind, the present work aims to design an innovative hybrid system that combines a conventional photovoltaic (PV) cell with a triboelectric nanogenerator (TENG), which operates based on the principle of static electricity generated through friction. This type of generator is notable for its ability to harvest energy from unconventional sources such as clothing friction, vehicle wheel rotation, or other everyday movements. This gives the hybrid system a unique advantage: the ability to produce energy even in the absence of sunlight.

Keywords: Hybrid energy system / Solar energy / Photovoltaic cell (PV) / Triboelectric nanogenerator (TENG)

Résumé :

L'énergie solaire occupe une place prépondérante parmi les sources d'énergie renouvelables, en raison de sa large disponibilité et de son caractère écologique. Cependant, sa dépendance totale au rayonnement solaire limite ses performances en cas d'ombre, de nuages ou durant la nuit, ce qui soulève de réelles questions quant à la continuité de l'approvisionnement énergétique. Face aux défis environnementaux croissants et au besoin urgent en sources d'énergie propres et durables, il devient nécessaire de penser à des solutions alternatives capables de soutenir ces systèmes et de renforcer leur stabilité.

Dans cette optique, ce travail vise à concevoir un système hybride innovant combinant une cellule photovoltaïque classique à un nano générateur triboélectrique (TENG), basé sur le principe de l'électricité statique générée par frottement. Ce type de générateur se distingue par sa capacité à capter l'énergie à partir de sources non conventionnelles telles que le frottement des vêtements, la rotation des roues de véhicules, ou d'autres formes de mouvement quotidien. Cela confère à ce système hybride un avantage unique : la production d'énergie même en l'absence de soleil.

Les mots clés : Système d'énergie hybride / Énergie solaire / Cellule photovoltaïque (PV) / Nano générateur triboélectrique (TENG)

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE : 01	2
Les sources d'energies	2
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur les sources d'énergie	3
1.2.1 Définition d'énergie	3
1.2.2 Les formes d'énergies	4
1.2.2.1 L'énergie mécanique.	4
1.2.2.2 L'énergie thermique.....	4
1.2.2.3 L'énergie chimique	5
1.2.2.4 L'énergie rayonnant.....	5
1.2.2.5 L'énergie nucléaire	5
1.2.2.6 L'énergie électrique.....	5
1.3 Les sources d'énergies	6
1.3.1 Les énergies primaires	6
1.3.2 Les énergies secondaires	7
1.4. Les énergies non renouvelables	7
1.4.1 Les énergies fossiles	7
1.4.2 Les énergies Nucléaire	8
1.4.3 Les avantages	8
1.4.4 Les inconvénients	9
1.5 Les énergies renouvelables	9
1.5.1 Historique et définition d'énergie renouvelable	9
1.5.2 La transition énergétique mondiale	10
1.5.3 Les types d'énergies renouvelables	12
1.5.4 L'énergie éolienne	13
1.5.5 L'énergie hydraulique	14
1.5.6 L'énergie biomasse	15
1.5.7 L'énergie géothermique	16

1.5.8 L'énergie solaire	16
1.5.8.1 l'histoire de photovoltaïque	16
1.5.8.2 définition	17
1.5.8.3 Les différents types des panneaux solaires photovoltaïques.....	18
1.5.8.4 Cellule photovoltaïque	20
1.5.8.5 Les dernières avancées technologiques sur le photovoltaïque	20
1.6 Les avantages et Les inconvénient des énergies renouvelables	21
1.6.1 Les avantages des énergies renouvelables	26
1.6.2 Les inconvénients	26
1.7 Conclusion	27
CHAPITRE 02.....	28
les systèmes hybrides énergétiques.....	28
2.1 Introduction	29
2.2 Généralités sur les microsystemes	29
2.2.1 Les systèmes micro-électromécaniques (MEMS)	29
2.2.2 Les MEMS et leurs enjeux économiques	30
2.2.3 Le marché des MEMS – Contexte économique	30
2.3 Les systèmes hybrides	31
2.3.1 Définition d'un système hybride	31
2.3.2 Classifications	31
2.3.3 Le régime du fonctionnement	31
2.3.4 La structure du système hybride	32
2.3.5 Etudes des structures de systèmes hybrides	32
2.3.5.1 Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle	32
2.3.5.2 Systèmes éolien/source conventionnelle	36
2.3.5.3 Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel	36
2.3.5.4 Systèmes hybrides sans source conventionnelle	37
2.3.5.5 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage	37
2.3.5.6 Système hybride éolien/stockage	38

2.3.5.7 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	39
2.4 Les matériaux intelligents	39
2.4.1 Alliages à mémoire de forme (AMF)	39
2.4.1.1 Définition	40
2.4.1.2 Historique	41
2.4.1.3 Transformation martensitique	41
2.4.1.4 Les effets des alliages à mémoire de forme	41
2.4.1.5 La superélasticité	42
2.4.1.6 Les applications des AMF	43
2.4.2 Les matériaux magnétostrictifs	43
2.4.2.1 Définition	43
2.4.2.2 Historique	43
2.4.2.3 Principaux Phénomènes de magnétostuction	44
2.4.2.4 Application	45
2.4.3 Matériaux Electroactifs	45
2.4.4 Matériaux piézoélectriques	46
2.4.4.1 Historiques	46
2.4.4.2 Définition de la piézoélectricité	46
2.4.4.3 Effets piézoélectriques	46
2.4.4.4 Classes cristallines	47
2.4.4.5 Applications des matériaux piézoélectriques.....	47
2.5 Triboélectricité	48
2.5.1 définition	48
2.5.2 Effet Triboélectrique	48
2.5.3 La nanoénergie.....	49
2.5.4 Modes de fonctionnement des TENGs :.....	51
2.5.4.1 Mode de séparation de contact verticale	51
2.5.4.2 Mode coulissant latéral	52
2.5.4.3 Mode à électrode unique	53
2.5.4.4 Mode triboélectrique autonome	54

2.5.5 Matériaux et séries triboélectriques	55
2.5.6 Système de récupération d'énergie hybride (PV-TENG)	55
2.6 Conclusion.....	56
CHAPITRE : 03	57
Modélisation et simulation d'un système PV-TENG	57
3.1 Introduction	58
3.2 Modélisation mathématique et électrique d'une cellule photovoltaïque	58
3.2.1 Courant de court-circuit (I_{cc})	59
3.3 Modélisation d'un cellule photovoltaïque	60
3.3.1 Simulation d'une cellule photovoltaïque	61
3.4 Présentation du modèle mathématique et circuit électrique de générateur triboélectrique	63
3.4.1 circuit équivalent d'un générateur triboélectrique	68
3.4.2 les résultats de la simulation d'un système triboélectrique	69
3.5 Simulation d'un système hybride PV + TENG	72
3.5.1 circuit équivalent d'un cellule photovoltaïque +générateur triboélectrique	72
3.5.2 les résultats de la simulation d'un système hybride cellule pv + teng	72
3.6 Conclusion	75
Conclusion générale.....	77

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'énergie représente aujourd'hui l'un des principaux défis auxquels l'humanité fait face, en raison de la demande mondiale croissante, de l'épuisement progressif des ressources fossiles et des conséquences environnementales qui en résultent, notamment les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce cadre, les énergies renouvelables se présentent comme des solutions stratégiques capables de répondre de manière durable aux besoins énergétiques tout en protégeant l'environnement. Des sources telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et la biomasse se distinguent par leur grande disponibilité, leur caractère inépuisable et leur faible impact écologique. Elles constituent également une alternative pratique pour électrifier les zones isolées, où l'extension du réseau électrique traditionnel s'avère difficile tant sur le plan économique que technique.

Dans cette perspective, les systèmes énergétiques hybrides (SEH) se révèlent comme une solution prometteuse, car ils combinent plusieurs sources d'énergie afin d'améliorer le rendement, de renforcer la stabilité de l'alimentation et de diminuer la dépendance aux combustibles fossiles.

Parmi les combinaisons innovantes, l'intégration des cellules photovoltaïques (PV) avec les générateurs triboélectriques (TENG) permet de tirer parti à la fois de l'énergie solaire et de l'énergie mécanique ambiante. Bien que les recherches sur les énergies renouvelables soient nombreuses, la combinaison PV–TENG reste un domaine émergent nécessitant des études approfondies pour identifier les méthodes d'intégration les plus efficaces et garantir une production énergétique stable. L'intérêt de ce système réside dans la complémentarité de deux sources distinctes par leurs mécanismes de conversion et leurs comportements dynamiques, en faisant ainsi une solution innovante, particulièrement adaptée aux régions à faible ou irrégulier ensoleillement.

Cette recherche a pour objectif de modéliser et d'analyser un système hybride PV–TENG à travers des simulations numériques, dans le but d'évaluer ses performances sous diverses conditions d'exploitation. Elle sert également de fondement pour le développement futur de prototypes pouvant être appliqués sur le terrain, en particulier dans des environnements isolés ou pour des applications à faible consommation d'énergie. Ce mémoire se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre examine les différentes sources d'énergie .

Le deuxième chapitre traite des systèmes hybrides et de l'évolution de leurs applications .

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et à la simulation du système PV–TENG

CHAPITRE 01
LES SOURCES D'ENERGIE

1.1 INTRODUCTION

L'énergie est définie comme la capacité de provoquer un changement ou d'effectuer un travail. C'est une quantité physique fondamentale qui permet de décrire l'état d'un système et les changements qui peuvent y survenir. Les scientifiques ont découvert que les processus fondamentaux, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques, qui régissent notre monde macroscopique (objets et êtres vivants) obéissent à une loi selon laquelle une quantité appelée "énergie" est conservée dans un système isolé. Cette loi trouve son origine dans la symétrie du temps. En d'autres termes, elle indique que les résultats d'une expérience ne dépendent pas de la date à laquelle elle est réalisée, tant que les conditions restent identiques. À l'échelle microscopique, l'énergie peut se manifester sous deux formes : organisée ou désorganisée. Dans le premier cas, on parle de travail, et dans le second, de chaleur. La chaleur est considérée comme la forme la plus désorganisée de l'énergie, car elle est répartie sur de nombreux degrés de liberté dans le système étudié. [1]

L'énergie peut se présenter sous diverses formes : mécanique, chimique, thermique, nucléaire, etc. Cela implique fréquemment qu'une forme d'énergie soit convertie en une autre. Ce processus de conversion n'est jamais parfait et entraîne des pertes. Ainsi, lorsqu'on passe d'une énergie désorganisée, comme la chaleur, à une énergie plus organisée, comme le travail, l'efficacité de cette conversion est toujours limitée par les lois de la thermodynamique [1].

1.2 Généralités sur les sources d'énergie

1.2.1 Définition d'énergie

Le mot « énergie » provient du grec ancien « ἐνέργεια » (enérgeia), qui signifie littéralement « force en action ». Ce concept, introduit notamment par Aristote, a évolué au fil du temps pour désigner aujourd'hui la capacité à accomplir un travail ou à provoquer un changement, que ce soit par le mouvement, la chaleur, la lumière ou d'autres formes. Concrètement, l'énergie permet de fournir un travail, de produire un mouvement, de modifier une température ou de changer l'état de la matière. Toute activité humaine, qu'il s'agisse de se déplacer, de se chauffer, de fabriquer des objets ou simplement de vivre, nécessite de l'énergie [2]. En physique, l'énergie se mesure en joules et suit le principe fondamental de conservation : l'énergie ne disparaît pas, elle se transforme simplement d'une forme à une autre. Parmi ses différentes formes figurent l'énergie cinétique, potentielle, thermique, électrique, chimique et nucléaire, toutes essentielles aux phénomènes naturels et aux technologies humaines. L'énergie totale d'un système inclut également l'énergie contenue dans la masse de la matière, comme l'exprime la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$, indiquant qu'une petite quantité de matière renferme une immense quantité d'énergie. Dans la vie quotidienne, on parle souvent d'« énergie utilisable » ou « énergie libre », qui correspond à la part

d'énergie que l'homme peut exploiter concrètement. L'histoire humaine témoigne d'une évolution progressive, passant de l'utilisation exclusive de sa propre énergie à la maîtrise de multiples sources comme le feu, l'énergie animale, éolienne, hydraulique, chimique, électrique et nucléaire, favorisant ainsi le développement des sociétés et l'amélioration des conditions de vie[3].



Figure 1.1- l'énergie [4]

1.2.2 Les formes d'énergies

1.2.2.1 L'énergie mécanique

d'un objet est la somme de deux énergies : l'énergie cinétique liée au mouvement de l'objet, et l'énergie potentielle liée à sa position.

L'énergie cinétique dépend de la masse et de la vitesse de l'objet (formule : $E_c = \frac{1}{2} mv^2$) et augmente avec la vitesse.

L'énergie potentielle est l'énergie stockée selon la position de l'objet, notamment sa hauteur (formule : $E_p = mgh$). Elle devient visible lorsqu'elle se transforme en énergie cinétique.

L'énergie mécanique totale est donc la somme de ces deux énergies : $E_m = E_c + E_p$. Elle dépend à la fois de la vitesse et de la position de l'objet et se conserve dans un système isolé soumis à des forces conservatives. [5]

1.2.2.2 L'énergie thermique

L'énergie thermique correspond simplement à la chaleur. Elle résulte de l'agitation des molécules et des atomes à l'intérieur de la matière. Ainsi, l'énergie thermique représente l'énergie cinétique totale d'un ensemble au repos.

Dans une machine à vapeur, cette énergie est convertie en énergie mécanique, tandis que dans une centrale thermique, elle est transformée en électricité. Par ailleurs, le sous-sol contient de l'énergie

thermique, appelée géothermie, qui peut être exploitée pour le chauffage ou la production d'électricité. [5]

1.2.2.3 L'énergie chimique

L'énergie chimique correspond à l'énergie contenue dans les liaisons entre les atomes au sein des molécules. Certaines réactions chimiques peuvent rompre ces liaisons, libérant ainsi cette énergie ; on parle alors de réactions exothermiques.

Par exemple, lors de la combustion - une réaction chimique courante - des substances comme le pétrole, le gaz, le charbon ou la biomasse transforment leur énergie chimique en chaleur, souvent accompagnée de lumière. De même, dans les piles, les réactions électrochimiques génèrent de l'électricité à partir de cette énergie chimique. [5]

1.2.2.4 L'énergie rayonnant

L'énergie transportée par les rayonnements comprend notamment l'énergie lumineuse et le rayonnement infrarouge. Ces deux types d'énergie sont émis, par exemple, par le Soleil ou par les filaments des ampoules électriques.

L'énergie solaire issue de ces rayonnements peut être captée puis transformée soit en électricité, grâce à l'énergie photovoltaïque, soit en chaleur, via le solaire thermique. [5]

1.2.2.5 L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire correspond à l'énergie contenue au sein des atomes, plus précisément dans les liaisons qui unissent les particules (protons et neutrons) formant leur noyau. Lorsqu'on modifie ces noyaux atomiques par des réactions nucléaires, une importante quantité de chaleur est libérée. Dans les centrales nucléaires, ce sont des réactions de fission des noyaux d'uranium qui ont lieu, et une partie de la chaleur produite est convertie en électricité.

Dans les étoiles, comme le Soleil, l'énergie est libérée par des réactions de fusion des noyaux d'hydrogène. [5]

1.2.2.6 L'énergie électrique

L'énergie électrique désigne l'énergie transférée d'un système à un autre par le biais de l'électricité, c'est-à-dire grâce au déplacement de charges électriques. Ce n'est pas une forme d'énergie à part entière, mais un vecteur énergétique qui permet de transporter et de distribuer l'énergie. Cependant, le terme est couramment employé par facilité de langage. [5]

Les sources capables de fournir cette énergie électrique sont, par exemple, les alternateurs ou les piles. Du côté des récepteurs, on trouve des dispositifs comme les résistances électriques, qui convertissent cette énergie en chaleur, les lampes qui la transforment en lumière ou encore les moteurs électriques qui la convertissent en énergie mécanique. [5]

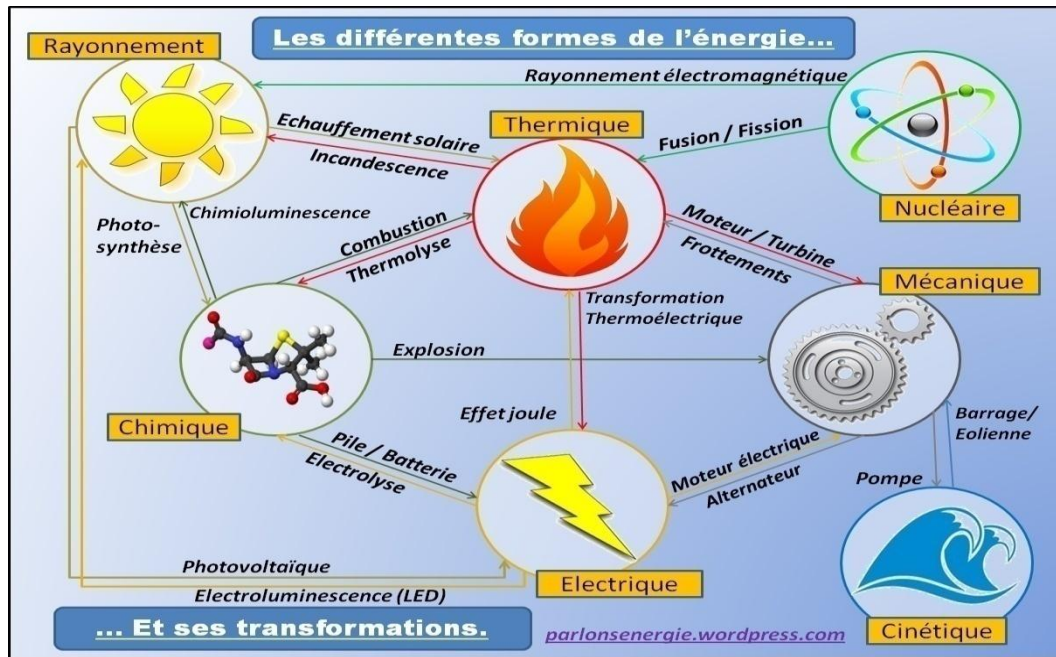


Figure 1.2- les différentes formes de l'énergie [6]

1.3 Les sources d'énergies

Une source d'énergie désigne une ressource, qu'elle soit naturelle ou issue de l'activité humaine, capable de générer de l'énergie par le biais d'un phénomène physique ou chimique. L'énergie obtenue peut ensuite être utilisée pour divers usages : alimenter les transports, faire fonctionner des équipements électriques ou encore chauffer les habitations.

On distingue principalement deux grandes catégories de sources d'énergie:

- ❖ Les énergies primaires
- ❖ Les énergies secondaires

Ces catégories comprennent également deux types majeurs : les énergies renouvelables et non renouvelables. [7]

1.3.1 Les énergies primaires

Les énergies primaires proviennent directement de phénomènes naturels, sans intervention humaine. Elles peuvent être utilisées telles quelles ou bien transformées en énergies secondaires. Parmi ces sources, on retrouve notamment :

Le rayonnement solaire, La force du vent, Le pétrole brut, Uranium, Le charbon, Les hydrocarbures, L'énergie hydraulique issue des chutes et cours d'eau, L'énergie marine, Le Gaz naturel, La géothermie Les déchets et la biomasse.

Ces énergies primaires sont majoritairement d'origine thermique ou mécanique, et peuvent être classées comme renouvelables ou fossiles selon leur nature. [7]

1.3.2 Les énergies secondaires

Secondaires résultent d'une intervention humaine. En effet, une énergie secondaire n'existe pas à l'état naturel : elle est produite à partir de la transformation d'une énergie primaire, à travers différents procédés techniques, comme la combustion de combustibles fossiles ou l'exploitation de réacteurs nucléaires. Autrement dit, toute forme d'énergie issue de la conversion d'une source primaire est considérée comme une énergie secondaire.

Parmi les principales sources d'énergie secondaire, on peut citer: Les centrales nucléaires, Les centrales thermiques à flamme, Les centrales hydroélectriques, Les centrales éoliennes, L'énergie solaire photovoltaïque, Les centrales géothermiques, La cogénération (production simultanée de chaleur et d'électricité) L'énergie solaire thermique à concentration [7].

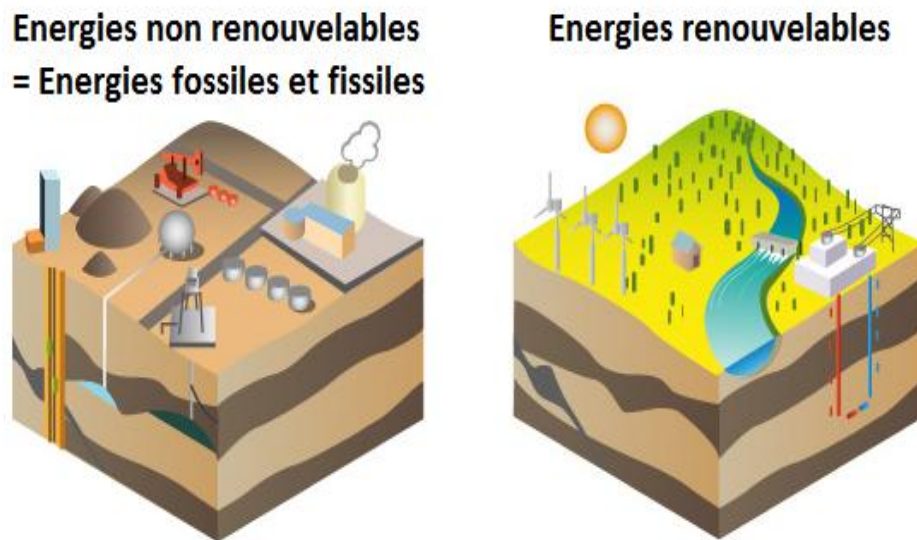


Figure 1.3 - Les sources d'énergies [8]

1.4. Les énergies non renouvelables

1.4.1 Les énergies fossiles

Il est important de ne pas confondre énergie primaire et énergie renouvelable. Bien que l'énergie primaire provienne de phénomènes naturels, cela ne signifie pas qu'elle soit inépuisable. Par ailleurs, une énergie primaire n'est pas nécessairement synonyme de neutralité carbone.

Les énergies fossiles, quant à elles, proviennent de l'exploitation de gisements formés au fil de millions d'années par la décomposition de matières organiques enfouies dans le sol. Parmi ces sources d'énergie primaire fossile, on retrouve :

Le charbon, Le pétrole, Le gaz [7]

1.4.2 Les énergies Nucléaire

L'énergie nucléaire provient du noyau des atomes, composé de protons et de neutrons. Elle peut être produite de deux manières : par fission, qui consiste à scinder un noyau en plusieurs fragments, ou par fusion, qui réunit plusieurs noyaux pour en former un seul.

Aujourd'hui, la production d'électricité d'origine nucléaire repose essentiellement sur la fission, tandis que la technologie de la fusion est encore au stade de la recherche et du développement.

La fission nucléaire est un processus au cours duquel le noyau d'un atome se divise en deux ou plusieurs noyaux plus légers, libérant ainsi de l'énergie. Par exemple, lorsqu'un noyau d'uranium 235 est percuté par un neutron, il se scinde en deux noyaux plus petits – comme le baryum et le krypton – accompagnés de deux ou trois neutrons. Ces neutrons peuvent à leur tour frapper d'autres noyaux d'uranium 235, déclenchant ainsi une réaction en chaîne en une fraction de seconde.

Chaque réaction de fission libère une quantité importante d'énergie, principalement sous forme de chaleur et de rayonnements. Dans les centrales nucléaires, cette chaleur est utilisée pour chauffer de l'eau et produire de la vapeur, qui fait tourner des turbines afin de générer de l'électricité.[9]



Figure 1.4 - Les énergies fossiles et Nucléaire [10]

1.4.3 Les avantages

- ❖ La production d'énergie génère une quantité négligeable de gaz à effet de serre comparée à d'autres sources.
- ❖ Capacité à produire une grande quantité d'énergie indépendamment des conditions météorologiques.

- ❖ Facilité d'extraction et de transport, ce qui permet un accès facile aux sources d'énergie.
- ❖ L'extraction et le traitement créent de nombreux emplois, contribuant ainsi à la croissance économique.
- ❖ Utilisation polyvalente dans divers secteurs industriels, comme l'essence utilisée pour alimenter les véhicules.
- ❖ Les centrales thermiques alimentées par du charbon peuvent être installées n'importe où, sans besoin d'être proches des sites d'extraction. [11]

1.4.4 Les inconvénients

- ❖ La production d'énergie nucléaire génère des déchets radioactifs, qui représentent une menace pour la santé humaine et l'environnement.
- ❖ Les énergies non renouvelables, telles que le pétrole, le gaz et le charbon, prennent des millions d'années pour se former, ce qui en fait des ressources limitées.
- ❖ L'extraction et la consommation de pétrole génèrent une grande quantité de gaz à effet de serre.
- ❖ L'extraction du pétrole entraîne la contamination de l'eau.
- ❖ Bien qu'il soit plus propre que d'autres combustibles fossiles, le gaz naturel reste nocif pour l'environnement et est le cinquième plus grand producteur de gaz à effet de serre au monde.
- ❖ La combustion du charbon pollue l'air et produit une grande quantité de gaz à effet de serre.[11]

1.5 Les énergies renouvelables

1.5.1 Historique et définition d'énergie renouvelable

Pendant longtemps, l'humanité a principalement utilisé des énergies renouvelables comme la force musculaire, la biomasse et la traction animale. Des progrès majeurs sont intervenus avec la navigation à voile, puis les moulins à eau et à vent, qui ont fourni une énergie essentielle dans une économie peu énergivore. Avant la révolution industrielle, la traction animale et le bois dominaient largement la production d'énergie.

Au XIX^e siècle, la machine à vapeur et le moteur Diesel ont supplanté les moulins traditionnels, tandis que l'hydroélectricité a renouvelé l'usage de l'énergie hydraulique. La géothermie a été exploitée dès le début du XX^e siècle, et les premiers chauffe-eau solaires sont apparus dans les années 1910. Depuis les années 1990, les éoliennes ainsi que l'énergie solaire thermique et photovoltaïque connaissent un fort développement grâce aux avancées technologiques.

Aujourd'hui, les énergies renouvelables (EnR) jouent un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale. Ces sources d'énergie proviennent de ressources naturelles qui se régénèrent plus rapidement qu'elles ne sont consommées, contrairement aux énergies fossiles, limitées et non renouvelables. Elles tirent leur origine de phénomènes naturels continus comme le soleil, le vent ou l'eau, et sont quasiment illimitées à l'échelle géologique.

Cependant, bien qu'elles soient souvent qualifiées d'« énergies vertes » ou « propres », il est important de prendre en compte certains impacts environnementaux liés à leur développement, notamment ceux résultant de l'installation des infrastructures nécessaires, qui peuvent parfois affecter l'utilisation des sols. [12] [13]

1.5.2 La transition énergétique mondiale

Malgré une croissance rapide, les sources solaires et éoliennes ne représentaient respectivement que 4,5 % et 7,6 % de la production mondiale d'électricité en 2022, contre 15,1 % pour l'hydroélectricité, qui demeure la première filière renouvelable. Le charbon reste de loin la principale source de production d'électricité à l'échelle mondiale, avec 35,7 % de l'électricité produite en 2022. [14]

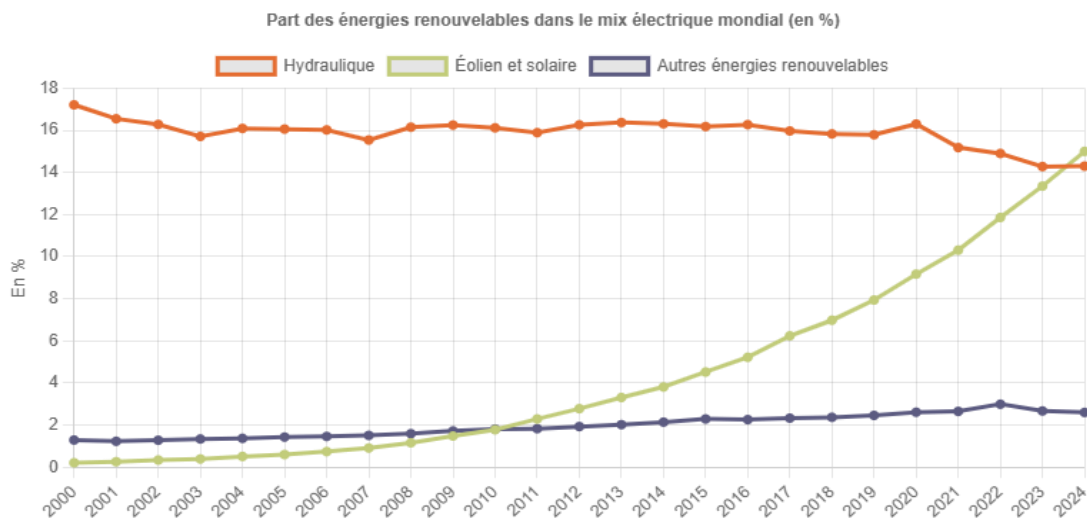


Figure 1.5 - part des énergies renouvelables dans le mix électrique mondial (en %) [14]

À la fin de 2022, la capacité installée en énergies renouvelables (toutes filières confondues) dans le monde s'élevait à environ 3 372 GW, soit une hausse de 9,6 % par rapport à fin 2021. Bien que l'hydroélectricité reste prédominante, le solaire et l'éolien ont constitué près de 90 % des nouvelles capacités renouvelables installées cette année-là. [14]

À l'échelle mondiale

La part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité a connu une évolution notable. En 1985, les renouvelables représentaient 20,82 % de la production (presque exclusivement de l'hydroélectricité). Cette proportion a ensuite diminué progressivement jusqu'à un point bas de 18,09 % en 2005. À partir de 2010, la tendance s'est inversée avec une remontée continue de la part des renouvelables, atteignant 19,71 %, puis augmentant chaque année jusqu'à atteindre 30,24 % en 2023. Cette croissance soutenue est le résultat d'investissements accrus, d'avancées technologiques, d'une prise de conscience climatique globale et de politiques environnementales visant à réduire les émissions de CO₂. [14]

Tableau 1.1 : Évolution de la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité – AIE [15]

Année	Part des renouvelables %
1985	20,82 %
1990	19,06 %
1995	19,72 %
2000	18,71 %
2005	18,09 %
2010	19,71 %
2011	20,01 %
2012	20,97 %
2013	21,7 %
2014	22,26 %
2015	22,99 %
2016	23,75 %
2017	24,54 %
2018	25,18 %
2019	26,19 %
2020	28,08 %
2021	28,14 %
2022	29,42 %
2023	30,24 %

Répartition continentale en 2022 – AIE

La part des énergies renouvelables varie fortement selon les continents. L'Amérique du Sud se distingue avec une part exceptionnelle de 74,74 %, due principalement à l'abondance de ressources hydroélectriques, notamment au Brésil

L'Océanie, avec 40,04 %, bénéficie de politiques pro-renouvelables dynamiques en Australie et en Nouvelle-Zélande. L'Europe affiche une part de 35,23 %, grâce à ses investissements importants dans l'éolien et le solaire, soutenus par des politiques environnementales ambitieuses.

En comparaison, l'Amérique du Nord (28,44 %), l'Asie (24,68 %) et l'Afrique (23,30 %) présentent des parts inférieures, mais en nette progression, traduisant les efforts pour verdir leur mix énergétique. [14]

Tableau 1.2 : Part des énergies renouvelables dans la production d'électricité par continent [14]

Continent	Part des renouvelables (%)
Afrique	23,30 %
Asia	24,68 %
Europe	35,23 %
Amérique du Nord	28,44 %
Oceania	40,04 %
Amérique du Sud	74,74 %
Monde	29,42 %

1.5.3 Les types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables, souvent désignées sous le terme d'énergies vertes, représentent des sources d'énergie provenant de ressources naturelles qui se régénèrent sans cesse. On peut identifier cinq grandes catégories : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie.



Figure 1.6 - les différents types d'énergies renouvelables [16]

1.5.4 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne trouve son origine dans le mouvement des masses d'air, provoqué de manière indirecte par l'ensoleillement de la Terre. Le réchauffement de certaines régions et le refroidissement d'autres créent des différences de pression atmosphérique, entraînant ainsi un déplacement constant de l'air. Bien que cette source d'énergie soit utilisée depuis l'Antiquité, elle a été longtemps négligée avant de connaître, depuis environ 30 ans, un développement remarquable, en grande partie à cause des premières crises pétrolières.



Éolienne à axe vertical



Éolienne à axe horizontal

Figure 1.7 - Éolienne à axe vertical et axe horizontal [17]

À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne enregistre une croissance annuelle d'environ 30 % depuis une dizaine d'années. Une éolienne est un appareil qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est ensuite transformée en énergie électrique grâce à une machine électrique. Elle est généralement constituée de trois pales fixées à un rotor, lui-même monté au sommet d'un mât vertical. L'ensemble est relié à une nacelle contenant un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure de l'éolienne pour qu'elle soit toujours face au vent.

Les pales ont pour fonction de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Sous l'effet du vent, elles tournent à une vitesse comprise entre 10 et 25 tours par minute. Cette vitesse dépend de la taille des pales : plus elles sont grandes, plus leur rotation est lente.

Les petites éoliennes, quant à elles, peuvent être équipées d'un axe vertical ou horizontal, en fonction de leur conception et de l'environnement dans lequel elles sont utilisées. [18] [19]

1.5.5 L'énergie hydraulique

Les centrales hydrauliques convertissent l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique à l'aide de turbines hydrauliques couplées à des générateurs électriques (voir fig. 08).

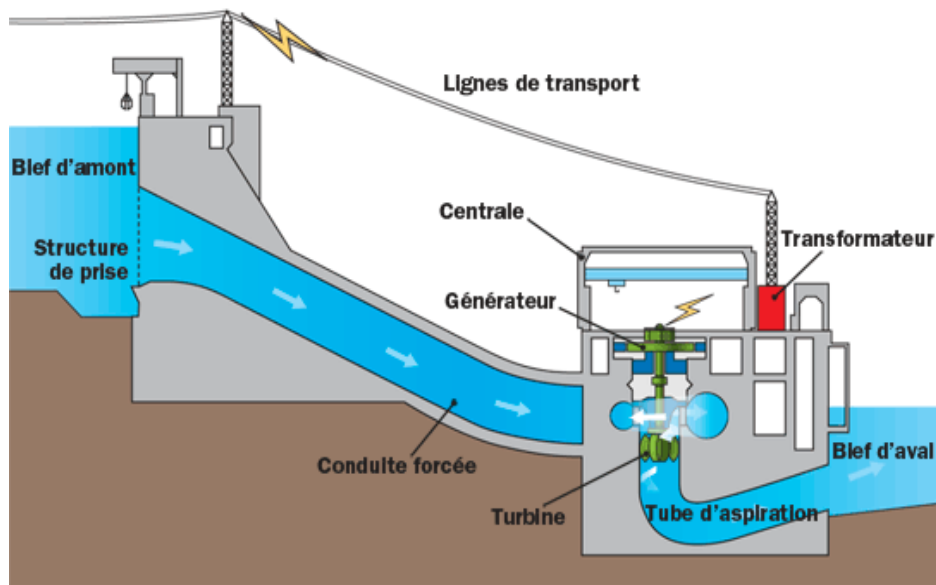


Figure 1.8- Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [20]

La puissance maximale d'une centrale dépend de plusieurs facteurs : la hauteur de chute, le débit d'eau et les caractéristiques techniques de la turbine. Il existe trois types principaux de centrales hydroélectriques :

- ❖ **Les centrales gravitaires** : Dans ce type de centrale, l'approvisionnement en eau provient principalement du cours d'eau par gravitation.
- ❖ **Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P.)** : Ces centrales, également appelées centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrales de pompage-turbinage, sont conçues pour pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles servent souvent de système de stockage d'énergie : l'eau est pompée durant les périodes de faible demande, grâce à l'électricité produite par des équipements de base (comme les centrales nucléaires), puis l'électricité est générée pendant les périodes de forte demande par turbinage. Cela permet de compléter ou de substituer la production d'électricité plus coûteuse provenant des équipements de pointe.

❖ **Les usines marémotrices** : Celles-ci exploitent l'énergie des mouvements marins, que ce soit le flux alterné des marées (centrales marémotrices au sens strict), les courants marins permanents (connus aussi sous le nom d'hydroliennes) ou le mouvement des vagues.

Les centrales gravitaires et les stations de transfert d'énergie par pompage peuvent être classées en trois catégories selon la hauteur de la chute d'eau : Chute haute (> 200 m), Chute moyenne (entre 50 et 200 m), Chute basse (< 50 m) [21]

En conclusion, bien que les investissements initiaux pour la construction de ces centrales soient élevés, leur coût de maintenance reste relativement bas. De plus, l'énergie hydraulique est une ressource renouvelable et gratuite lorsqu'elle est gérée de manière durable. Ces centrales constituent ainsi une solution efficace et rentable pour la production d'électricité, tout en contribuant à la diversification des sources d'énergie et à la réduction des impacts environnementaux, notamment par rapport aux énergies fossiles. [21]

1.5.6 L'énergie biomasse

Depuis les temps anciens, la biomasse solide a toujours été utilisée comme une source d'énergie renouvelable. Dans certaines régions du monde, elle constitue la principale source d'énergie pour la cuisine et le chauffage. Cette biomasse englobe tous les produits dérivés des plantes ou de leurs résidus, qu'ils soient secs ou déshydratés, tels que le bois, la paille, les grignons d'olives, ou encore la bagasse de canne à sucre. Elle est exploitée par combustion ou par métabolisation. Cependant, pour être considérée comme une véritable énergie renouvelable, les quantités brûlées ne doivent pas dépasser celles qui sont produites. Selon les besoins, elle permet une production constante de chaleur ou d'électricité. Ainsi, sa contribution à la production d'énergie mondiale reste significative par rapport à d'autres formes d'énergie [22]



Figure 1.9 - centrale biomasse [23]

1.5.7 L'énergie géothermique

La géothermie consiste à exploiter la chaleur naturellement présente dans le sol pour la convertir en chauffage ou en électricité, à l'aide de pompes et de turbines. Ce processus permet d'utiliser une source de chaleur constante et indépendante des conditions climatiques, reposant sur la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre. Selon la température des différentes couches du sol, la géothermie se divise en plusieurs catégories : « haute énergie » (Supérieure à 150°C), « moyenne énergie » (entre 90 et 150°C), « basse énergie » (entre 30 et 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C). Ainsi, plus l'on s'enfonce dans la terre, plus la température augmente, offrant diverses possibilités d'utilisation. [22]

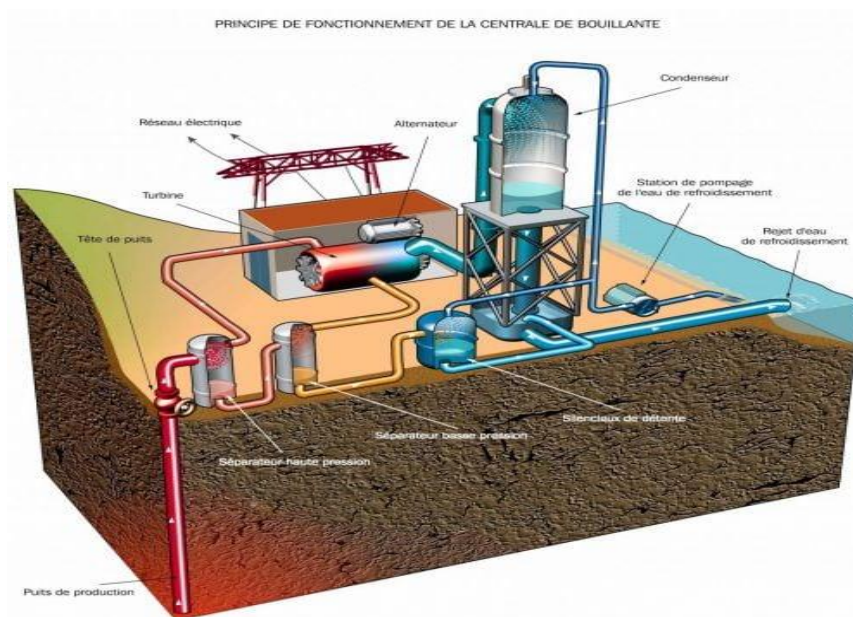


Figure 1.10- Géothermie haute température [24]

1.5.8 L'énergie solaire

1.5.8.1 l'histoire de photovoltaïque

L'histoire du photovoltaïque débute en 1839 avec la découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre-Edmond Becquerel. À la fin du XIXe siècle, les premières cellules en sélénium sont développées, mais leur efficacité demeure limitée. Dans les années 1950, le silicium remplace le sélénium, ce qui améliore considérablement les performances des cellules. Cette avancée a permis la fabrication des premiers panneaux solaires destinés à une utilisation dans l'espace. Les années 1970 marquent le commencement de la commercialisation des panneaux photovoltaïques pour des applications terrestres, accompagnée d'une diminution progressive des coûts. Depuis lors, cette technologie a continué à progresser. De nos jours, les panneaux solaires sont largement déployés à

travers le monde pour générer de l'électricité renouvelable, jouant un rôle clé dans la transition énergétique durable. [25]

1.5.8.2 Définition

Le soleil constitue la source première et essentielle des énergies renouvelables. Son rayonnement peut être capté à l'aide de capteurs thermiques vitrés, permettant ainsi de produire soit de l'électricité, soit de la chaleur destinée à des usages domestiques, notamment le chauffage de l'eau sanitaire. [22]

Pour exploiter cette énergie solaire, deux types de panneaux peuvent être utilisés :

- ❖ **Les panneaux solaires thermiques** également appelés (capteurs solaires thermiques), sont des dispositifs qui transforment la lumière en chaleur, laquelle est ensuite convertie en eau chaude.
- ❖ **Les panneaux solaires photovoltaïques** également appelés (installations photovoltaïques), transforment directement la lumière en électricité solaire. [25]



Figure 1.11- Les panneaux solaires thermiques [26]



Figure 1.12 - les panneaux solaires photovoltaïques [27]

1.5.8.3 Les différents types des panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires monocristallins

Constitué d'un unique cristal de silicium pur, le panneau solaire monocristallin présente un rendement élevé, variant entre 16 et 24 %. Ce type de panneau est également apprécié pour ses performances, même en conditions nuageuses, ainsi que pour sa longévité, qui atteint en moyenne 30 ans.

Avec un design épuré grâce à son revêtement entièrement noir et ses performances, le panneau solaire photovoltaïque est actuellement le plus recherché sur nos toits. [30]

Les panneaux solaires polycrystalline

Contrairement au revêtement noir uniforme du panneau monocristallin, le panneau solaire polycristallin est composé de plusieurs cristaux de silicium, ce qui lui donne un revêtement hétérogène avec une nuance bleutée.

Les panneaux polycristallins affichent une performance légèrement inférieure, avec un rendement variant entre 13 et 18 %.

Cependant, ils se distinguent par une meilleure résistance aux températures élevées. À la différence du panneau monocristallin, lorsque la température dépasse 25°C, le module polycristallin parvient à maintenir un rendement stable. [30]

Les panneaux solaires amorphe ou à couche mince

En utilisant du silicium amorphe, le panneau présente une flexibilité et une légèreté qui le rendent approprié pour des surfaces atypiques, telles que la coque courbée d'un navire.

Cependant, son efficacité est inférieure, se situant autour de 10 %, et sa longévité est restreinte à environ dix ans. [30]

a. Fonctionnement des panneaux solaires

a.1 Les panneaux solaires thermiques :

Contrairement aux panneaux photovoltaïques, ils ne produisent pas d'électricité mais captent la chaleur dégagée par le soleil.

Cette chaleur est transmise à un ballon d'eau chaude via un circuit fermé, permettant de chauffer l'eau à usage domestique.

Ce système peut également servir à :

- Chauffer les habitations.
- Chauffer les piscines.
- Sécher les récoltes.
- ou même cuire des aliments dans des fours solaires. [22]

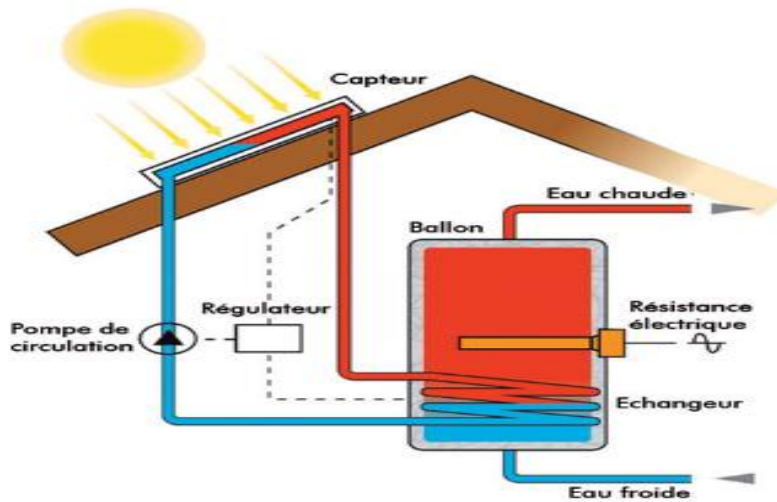


Figure 1.13 - l'énergie solaire thermique [28]

a.2 Les panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires sont conçus pour capter l'énergie lumineuse émise par le soleil et la transformer en électricité exploitable. Ils se composent de plusieurs cellules photovoltaïques fabriquées en silicium. Ces cellules photovoltaïques sont généralement fixées sur un support rigide et recouvertes d'un matériau protecteur transparent, tel que le verre, afin de les protéger des intempéries. Lorsque la lumière solaire atteint les cellules photovoltaïques, les électrons présents dans celles-ci sont excités, générant ainsi un flux d'électricité. Ce courant électrique peut ensuite être utilisé pour alimenter des appareils électriques, recharger des batteries, ou être injecté dans le réseau électrique, contribuant ainsi à la production d'électricité d'origine renouvelable.

Les panneaux solaires sont employés pour générer de l'électricité dans une variété d'applications, allant des installations solaires résidentielles et commerciales aux centrales solaires de grande taille. Ils jouent un rôle essentiel dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et respectueuses de l'environnement, émissions de gaz à effet de serre. [25]

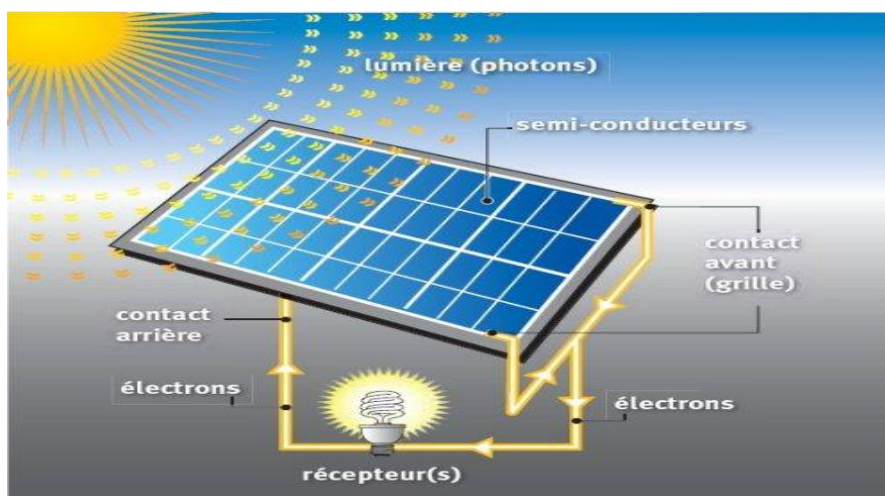


Figure 1.14 - l'énergie solaire photovoltaïque [29]

1.5.8.4 Cellule photovoltaïque

a. Définition

Une cellule solaire est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique par le biais de l'effet photovoltaïque. Elle est également désignée sous le terme de cellule photovoltaïque (cellule PV). Ce dispositif est composé de deux types de semi-conducteurs : une couche de silicium de type p et une couche de silicium de type n. Par conséquent, une cellule solaire opère comme une diode à jonction p-n. L'énergie solaire émise par le soleil, sous forme de photons, libère des électrons dans le semi-conducteur de type n et crée des trous dans le semi-conducteur de type p. Ces électrons libres sont captés par la couche d'aluminium et commencent à circuler, ce qui produit un courant électrique. [31]



Figure 1.15 - silicium cristallin cellule photovoltaïque[32]

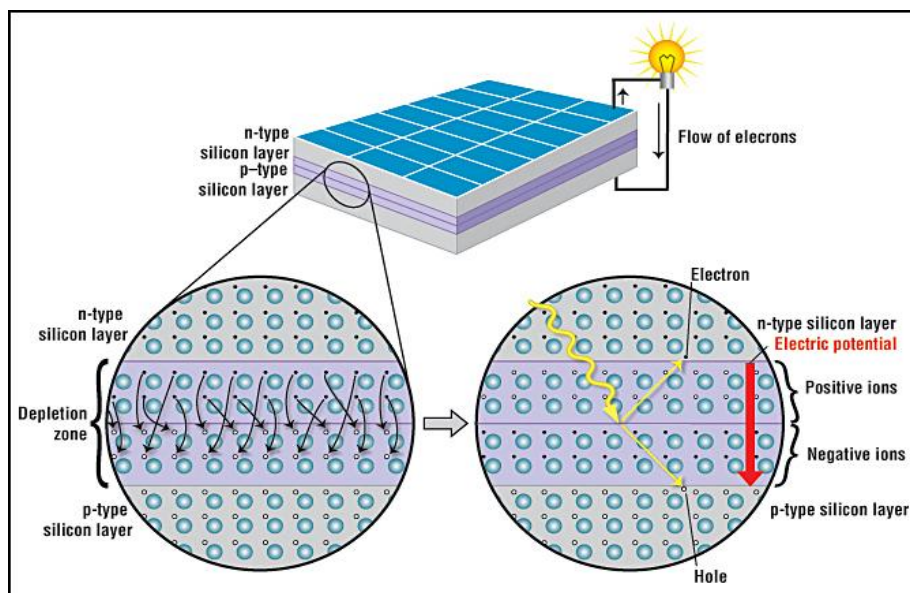


Figure 1.16 - Représentation schématique d'une cellule solaire [33]

b. Les différents types de cellules photovoltaïques

- **Le silicium amorphe**

Le silicium amorphe est produit à partir de gaz de silicium. Ce gaz est vaporisé sur un substrat, qu'il soit en verre, en plastique flexible ou en métal, par un procédé de projection sous vide. Les cellules photovoltaïques résultantes affichent une teinte gris foncé.

- **Le silicium monocristallin**

Le silicium monocristallin provient du refroidissement du silicium liquide. Une fois solidifié, il se transforme en un cristal homogène qui est découpé en fines tranches pour constituer la cellule photovoltaïque. Ce matériau présente une couleur bleue, sans aucune trace de cristaux ou d'autres imperfections.

- **Le silicium polycristallin**

Pour produire du silicium polycristallin, le silicium est fondu dans un moule métallique de forme carrée et allongée, connu sous le nom de lingotière. La couleur de ce type de cellule est bleue, ornée de motifs créés par les cristaux. Cette caractéristique permet de reconnaître aisément cette cellule photovoltaïque. [34]

c. Le principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur les caractéristiques des semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont frappés par les photons lumineux, engendrent un mouvement d'électrons. Les photons, considérés comme des particules fondamentales, transportent l'énergie solaire à une vitesse de 300 000 km/s et étaient désignés par Albert Einstein dans les années 1920 sous le terme de « grains de lumière ». Lorsque ces photons impactent un matériau semi-conducteur tel que le silicium, ils libèrent des électrons de leurs atomes. Ces électrons commencent alors à se déplacer de manière aléatoire, cherchant d'autres « trous » où ils peuvent se rétablir.

Cependant, pour qu'un courant électrique soit généré, il est nécessaire que les mouvements des électrons se dirigent tous dans la même direction. Afin de faciliter ce processus, deux types de silicium seront combinés. La surface exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore, qui possèdent un surplus d'électrons par rapport au silicium, tandis que l'autre surface est dopée avec des atomes de bore, qui en contiennent moins. Cette configuration à double face fonctionne comme une pile : le côté riche en électrons devient la borne négative (N), tandis que le côté appauvri en électrons constitue la borne positive (P). Un champ électrique se forme entre ces deux pôles.

Lorsque les photons excitent les électrons, ceux-ci migrent vers la zone N sous l'influence du champ électrique, tandis que les « trous » se dirigent vers la zone P. Les électrons sont collectés par des contacts électriques placés à la surface des deux zones avant d'être envoyés dans le circuit externe sous forme d'énergie électrique. Un courant continu est ainsi généré. Une couche anti-reflet

est installée pour minimiser la perte de photons qui seraient réfléchis par la surface. Consultez le schéma ci-dessous. [35]

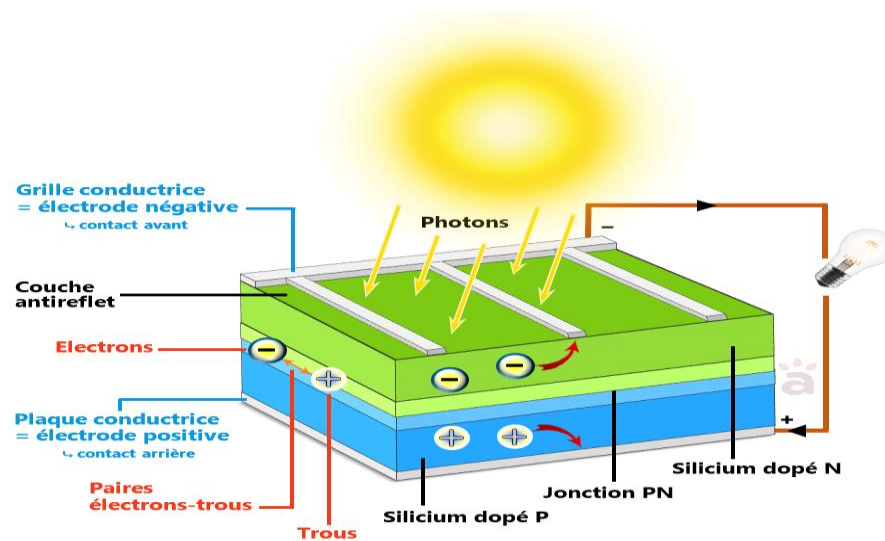


Figure 1.17- Schéma d'une cellule de silicium cristallin jonction PN [36]

1.5.8.5 Les dernières avancées technologiques sur le photovoltaïque

a. Les nouvelles technologies des panneaux photovoltaïques

Au cours des dernières années, les nouvelles techniques de fabrication ont permis d'améliorer l'efficacité des modules solaires, tout en faisant évoluer les applications auxquelles ils sont destinés. Parmi les réalisations les plus significatives. [37]

Les panneaux photovoltaïques bifaciaux

Les panneaux solaires bifaciaux offrent un avantage considérable : ils sont équipés de cellules photovoltaïques sur leurs faces supérieure et inférieure. La bifacialité permet à l'installation solaire de capter le rayonnement solaire sur ses deux côtés. Cette aptitude à exploiter la lumière réfléchie par les surfaces environnantes (ardoises, tuiles, murs, sol...) procure un rendement supérieur au système. Certaines entreprises, telles que Munchen Solar, proposent déjà ce type de solution. [37]

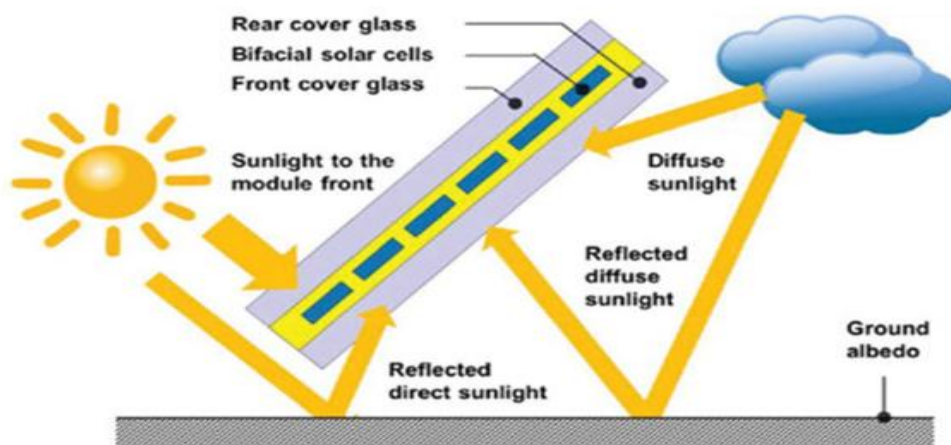


Figure 1.18 - Lumière réfléchie à l'arrière du panneau [38]

Les panneaux solaires hybrides

Les panneaux solaires hybrides sont capables de produire de l'électricité sur leur face avant et de générer de l'eau chaude sur leur face arrière. Cette eau peut être utilisée pour diverses applications telles que l'eau chaude sanitaire, les pompes à chaleur ou les piscines... Cette solution combinée présente également un avantage significatif en matière d'efficacité : le système réduit les risques de surchauffe en aidant les cellules photovoltaïques à se refroidir, ce qui améliore le rendement des panneaux solaires. Cette technologie est déjà disponible sur le marché : l'entreprise française Dual Sun propose notamment Spring, le premier panneau solaire hybride certifié au monde. [37]

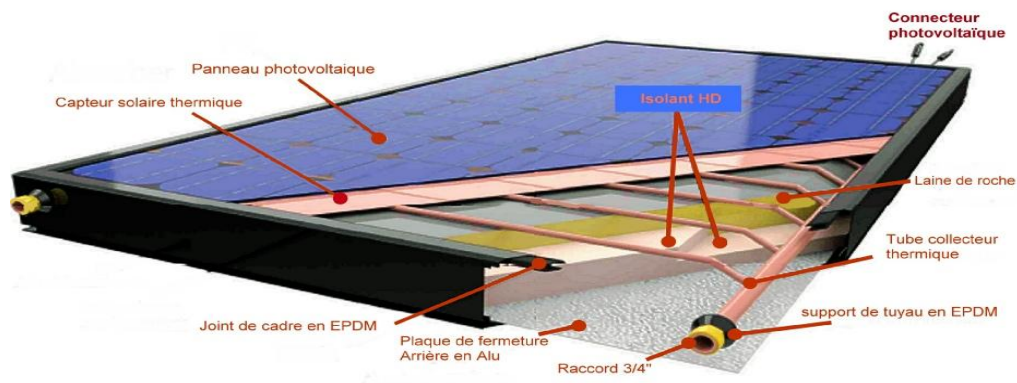


Figure 1.19 - panneau solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) [39]

Le micro-onduleur :

qui permet de créer son propre mini-réseau électrique : Grâce à son micro-onduleur IQ8, la société Enphase a mis au point une technologie particulièrement innovante : il est capable de fonctionner même en cas de coupure de courant. Le micro-onduleur, associé à son dispositif, permet à l'utilisateur de constituer son propre mini-réseau électrique. Ce micro-onduleur aide ainsi à diminuer encore plus la dépendance au réseau électrique public, sans nécessiter une solution de stockage. [37]

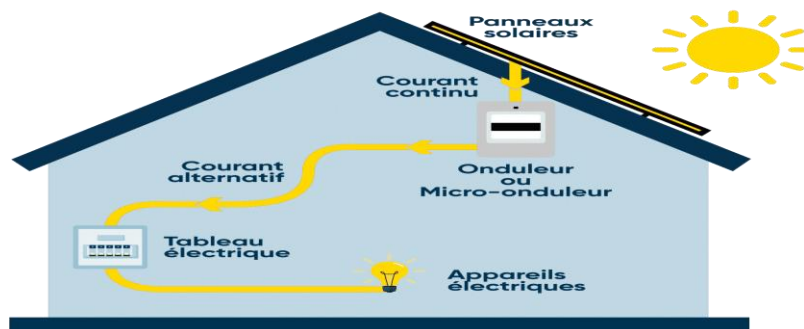


Figure 1.20 - Intégration des micro-onduleurs au sein des systèmes photovoltaïques pour optimiser la gestion de l'énergie [40]

b. Les nouvelles technologies de cellules photovoltaïques

Les cellules pérovskites

Liées à la technologie des couches minces, les cellules pérovskites apparaissent comme une alternative plus prometteuse. En effet, les essais en laboratoire indiquent un rendement de 22 %. Un autre avantage est qu'elles permettent la création d'un module flexible et transparent, d'une épaisseur de seulement quelques millimètres, ce qui ouvre la voie à de nombreuses applications (fenêtres, toitures...). Bien que faciles et peu coûteuses à produire, les cellules pérovskites présentent néanmoins certains inconvénients : elles sont constituées de méthyl ammonium iodure de plomb, un matériau nuisible pour l'environnement et la santé. De plus, leur durée de vie est inférieure à celle des cellules en silicium.[37]

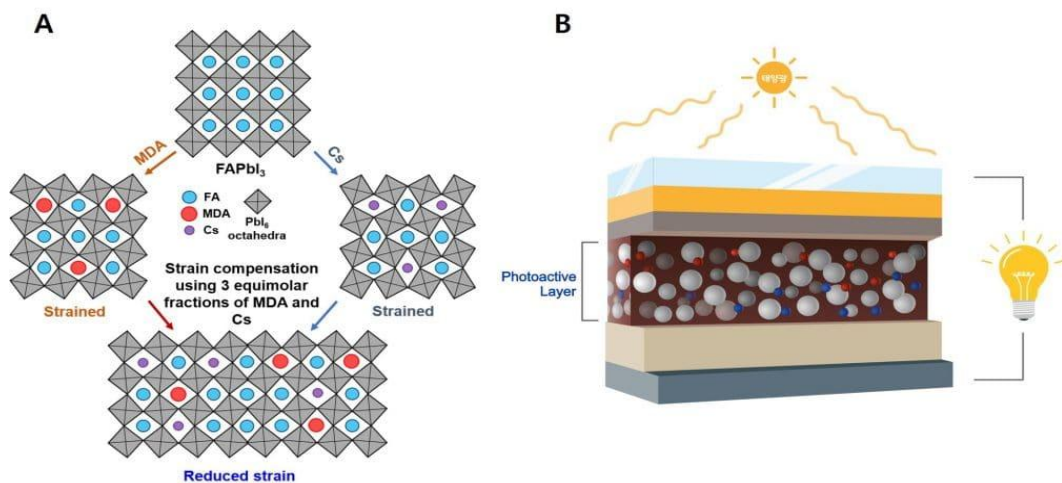


Figure 1.21 - Une cellule solaire pérovskite efficace à 25,17 % grâce à une nouvelle couche photo active [41]

Les cellules organiques

Une autre avancée dans le domaine des cellules photovoltaïques est représentée par les cellules organiques. On peut identifier trois catégories de cellules photovoltaïques organiques : les moléculaires, celles en polymères et les hybrides. Les modules fabriqués à partir de cellules organiques se caractérisent par leur finesse, leur flexibilité et leur facilité d'installation. Ces attributs leur permettent d'être intégrés aisément dans l'architecture et de s'adapter à divers supports, tels que les surfaces vitrées. Cette technologie, qui est polyvalente et peu coûteuse à produire, est encore en phase de développement, mais elle offre un potentiel particulièrement prometteur pour la production d'électricité. [37]

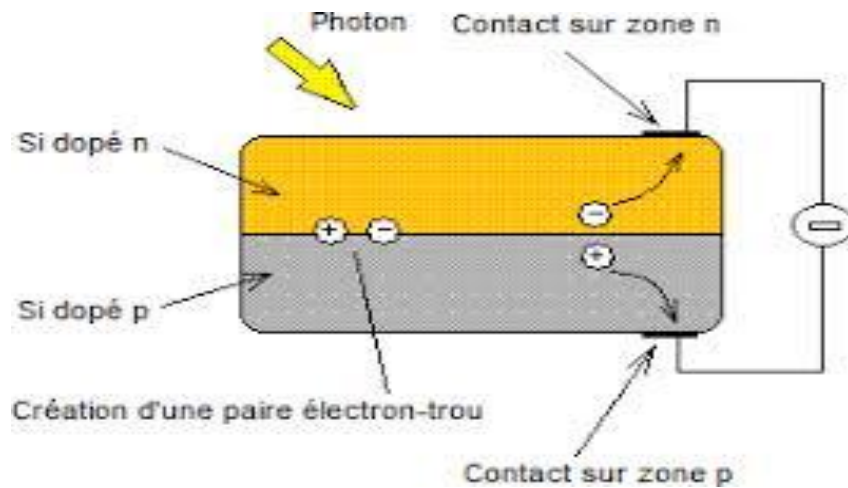


Figure 1.22- cellules photovoltaïques organiques [42]

Les cellules multi-jonctions

cellules multi-jonctions se composent de plusieurs strates de matériaux semi-conducteurs. Ces cellules photovoltaïques réussissent à transformer diverses portions du spectre lumineux solaire. En conséquence, elles offrent un rendement sans égal. Conçues pour des applications spatiales, elles ne sont pas encore prêtes à être commercialisées, mais attirent l'attention des chercheurs et des ingénieurs. [37]

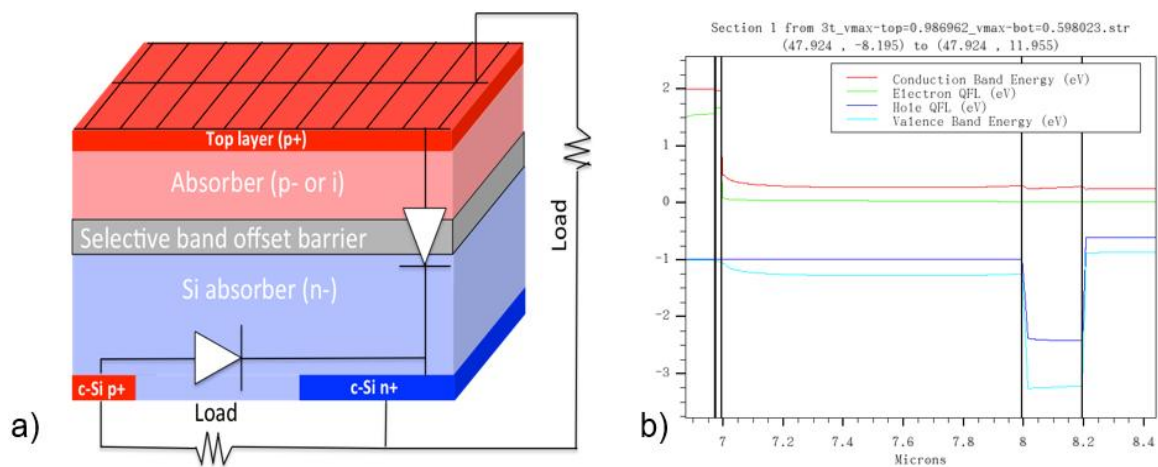


Figure 1.23- Cellule tandem 3T-SBOB (projets THESIS et BOBTANDEM) indiquant (a) l'empilement de couches et schéma équivalent et (b) la structure de bands à l'interface entre la cellule PSC haut gap et la cellule Si-IBC bas gap, au point de fonctionnement maximal des deux sous-cellules [43]

1.6 Les avantages et Les inconvénient des énergies renouvelables

1.6.1 Les avantages des énergies renouvelables

- **Ressource inépuisable:**

Les énergies renouvelables, comme le solaire, l'éolien et l'hydroélectrique, sont inépuisables, contrairement aux ressources non renouvelables qui deviennent plus coûteuses et polluantes.

- **Production d'énergie décarbonée :**

Les énergies renouvelables génèrent peu ou pas d'émissions de carbone, contribuant ainsi à la réduction des gaz à effet de serre.

- **Environnement plus sain :**

Les énergies renouvelables réduisent la pollution atmosphérique et les impacts environnementaux liés à l'extraction des combustibles fossiles.

- **Indépendance énergétique :**

Les énergies renouvelables renforcent la production locale et réduisent la dépendance aux importations d'énergie, ce qui accroît la résilience des réseaux électriques.

- **Maintenance réduite :**

Les systèmes d'énergie renouvelable, tels que les panneaux solaires, ont des coûts de maintenance faibles et une longue durée de vie.

- **Création d'emplois :**

Les énergies renouvelables créent des emplois à un rythme plus rapide que les énergies fossiles, et soutiennent la reconversion des travailleurs du secteur fossile. [44]

1.6.2 Les inconvénients :

Malgré leurs nombreux avantages, les énergies renouvelables présentent plusieurs défis à considérer pour une mise en œuvre efficace :

- **Coûts initiaux élevés :**

L'installation de systèmes d'énergie renouvelable demande un investissement important au départ, bien que des aides financières puissent en atténuer le coût.

- **Dépendance au site et à l'espace :**

L'efficacité dépend des conditions géographiques et climatiques, et ces installations nécessitent souvent plus de surface que les centrales classiques.

- **Production instable :**

La production varie selon le temps (ensoleillement, vent, sécheresse), ce qui complique l'approvisionnement constant. Des technologies avancées permettent toutefois d'anticiper ces variations.

- **Besoin de stockage énergétique :**

Le stockage de l'énergie est essentiel pour compenser l'intermittence des sources renouvelables. Les solutions existantes restent coûteuses mais évoluent.

- **Contraintes de la chaîne d'approvisionnement :**

La rareté de certaines matières premières, le manque de main-d'œuvre qualifiée et la dépendance à quelques fournisseurs freinent parfois les projets. [44]

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différents concepts liés à l'énergie, en mentionnant ses types et ses formes. Nous avons également traité les deux catégories d'énergie : renouvelable et non renouvelable. La première a connu un développement important dans les domaines technologique et économique, car elle représente une alternative très appropriée aux énergies fossiles et nucléaires. Elle se distingue par son caractère propre et respectueux de l'environnement, contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables sont considérées comme un pilier fondamental pour atteindre les objectifs du développement durable et garantir la sécurité énergétique à long terme.

CHAPITRE 02

les systèmes hybrides énergétiques

2.1 Introduction :

Face aux défis environnementaux croissants et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, il est devenu impératif de se diriger vers les énergies renouvelables et de les considérer comme une alternative durable assurant la sécurité énergétique à long terme, une approche adoptée par la majorité des pays à travers le monde. Avec l'avancement des techniques et des technologies, l'intérêt ne s'est pas restreint aux sources renouvelables traditionnelles, mais une nouvelle génération a émergé, intégrant deux sources d'énergie ou plus, ce que l'on désigne sous le terme de systèmes hybrides. Dans ce chapitre, nous allons vous exposer les différents types de ces systèmes ainsi que leurs caractéristiques, en mettant particulièrement l'accent sur le système hybride photovoltaïque – triboélectrique, qui est considéré comme le cœur de notre étude.

2.2 Généralités sur les microsystèmes

2.2.1 Les systèmes micro-électromécaniques (MEMS)

Le terme MEMS, qui signifie Système Micro Électro Mécanique, a progressivement remplacé les appellations européennes de « Microsystèmes » et japonaises de « Micromachines ». Ce terme désigne un ensemble de composants élaborés sur silicium grâce à des micro technologies. Les microsystèmes ont vu le jour au début des années 1970, en tant qu'évolution de la microélectronique, et leur première commercialisation a eu lieu dans les années 1990. Actuellement, les MEMS continuent de se développer rapidement, représentant un domaine de recherche relativement récent qui intègre des techniques électroniques, informatiques, chimiques, mécaniques et optiques. Les microsystèmes, ou systèmes micro-électromécaniques, sont définis comme des dispositifs de petite taille (inférieure à un centimètre cube) capables d'exécuter des fonctions précises. Ce concept a suscité un intérêt considérable à l'échelle mondiale, étant désigné sous le terme MEMS aux États-Unis, Micro-machines au Japon et MST (Micro-systèmes Technologies) en Europe, tandis qu'en France, on utilise le terme de micro-système. Ces dispositifs se composent de capteurs qui collectent des données de l'environnement et d'actionneurs qui interagissent avec celui-ci. Souvent, l'électronique associée est intégrée sur le même substrat pour le traitement des données. Le terme micro-système peut également désigner des systèmes hybrides, où les composants sont fabriqués séparément avec différentes technologies et substrats, ainsi que des systèmes monolithiques, où tous les composants sont réalisés sur un même substrat. Les capteurs et actionneurs sont généralement fabriqués sur des microstructures en silicium, tandis que les éléments de traitement du signal sont produits par des procédés microélectroniques standards.[45]

Dans le secteur en pleine expansion des MEMS, les matériaux fonctionnels sont destinés à jouer un rôle crucial à court ou moyen terme pour améliorer les performances et la compétitivité des dispositifs. En particulier, les matériaux piézo-électriques suscitent un intérêt marqué en raison de

leur capacité à générer une densité d'énergie élastique élevée dans un espace réduit, ainsi que de leur faible impédance électrique. Ces caractéristiques permettent la conception d'actionneurs miniaturisés à basse tension et de capteurs de micro-déformations d'une grande sensibilité. [45]

2.2.2 Les MEMS et leurs enjeux économiques

Les systèmes micro-électro-mécaniques, communément appelés MEMS, représentent des microsystèmes dérivés de l'industrie de la microélectronique, intégrant des composants mécaniques et électroniques. Ces systèmes sont capables d'exécuter diverses fonctions, notamment celles de capteurs (comme la mesure de pression, d'accélération ou de masse) et d'actionneurs (tels que des moteurs). Leur fabrication repose sur des techniques de microélectronique, incluant la lithographie, la gravure et le dépôt, et se distingue par la présence d'un élément mobile, dit « libéré », qui peut se déplacer sous l'influence de forces externes telles que l'accélération, la pression ou la tension. Bien que les premiers MEMS aient vu le jour dans les années 1960, leur adoption à grande échelle n'a eu lieu qu'à partir des années 1980, notamment dans des applications telles que les buses d'impression des imprimantes et les accéléromètres des airbags. Aujourd'hui, les MEMS sont omniprésents dans divers secteurs, y compris les télécommunications, la médecine, l'automobile, l'aéronautique et la biologie.[46]

2.2.3 Le marché des MEMS – Contexte économique

Actuellement, les MEMS constituent un marché évalué à 8 milliards de dollars ; la majorité des revenus provient des têtes d'impression, des capteurs de pression, des accéléromètres, des capteurs inertiels et des gyroscopes. Toutefois, cette répartition est en mutation, notamment avec l'émergence de nouveaux marchés liés à l'intégration des MEMS dans l'électronique grand public (Smartphones, consoles de jeux). Ainsi, une seconde étude de marché menée par I Suppli indique qu'en 2013, 30 % du chiffre d'affaires des MEMS sera généré par ce secteur, alors qu'il n'en représentait que 19 % en 2008. [47]

La crise économique de 2009 a durement frappé l'industrie des semi-conducteurs, entraînant une chute de 23 % du chiffre d'affaires. Pendant cette même période, le marché des MEMS associé aux applications grand public s'est plutôt bien comporté, générant 1,2 milliard de dollars, avec une tendance à la hausse. L'étude réalisée par I Suppli prévoit qu'en 2013, ce marché atteindra 2,5 milliards de dollars, soutenu par le développement des Smartphones (microphones, accéléromètres, gyroscopes...) et des télécommunications (filtres BAW, Switch RF,...). [47]

L'année 2012 sera également une date charnière pour l'industrie des MEMS. Cette année marque en effet l'application de lois européennes concernant la mesure obligatoire de la pression des pneus en temps réel (TPMS), mesure qui sera vraisemblablement effectuée à l'aide de MEMS (déjà en vigueur aux États-Unis depuis 2007). Actuellement, les principaux fabricants de MEMS sont Hewlett Packard et Texas Instruments. Les MEMS ont permis la création de nombreuses start-up,

et l'on peut aujourd'hui recenser 300 entreprises opérant dans ce secteur. Cependant, seules 10 % d'entre elles génèrent 90 % du chiffre d'affaires mondial. [48]

2.3 Les systèmes hybrides

2.3.1 Définition d'un système hybride

Un système énergétique hybride intègre divers types de production d'énergie et/ou de stockage, ou utilise deux combustibles ou plus pour alimenter un générateur. Un tel système représente une approche essentielle dans la transition vers des économies moins dépendantes des combustibles fossiles. Cela est particulièrement vrai à court terme, alors que de nouvelles technologies visant à améliorer l'intégration des sources d'énergie renouvelable sont encore en phase de développement [18]. Ces systèmes combinent généralement des sources d'énergie renouvelable, telles que des fermes solaires ou des éoliennes, avec des modes de production d'énergie traditionnels comme le gaz naturel ou les groupes électrogènes diesel. De plus, des technologies de stockage d'énergie, telles que les batteries, sont souvent intégrées pour conserver l'excès d'énergie, assurant ainsi une disponibilité continue même lorsque la production renouvelable varie. [49]

2.3.2 Classifications

Différentes classifications de systèmes hybrides sont effectuées en fonction du critère sélectionné. Les classifications les plus courantes sont présentées ci-après.

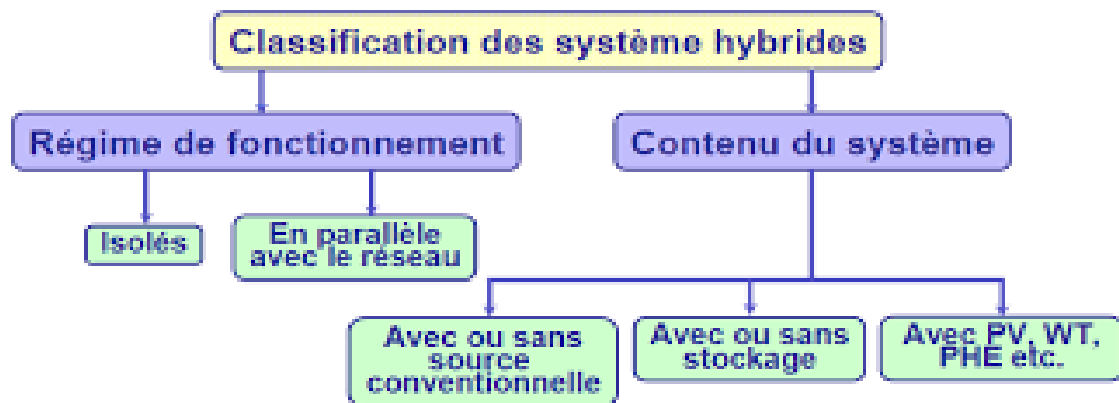


Figure 2.1 - classification des systèmes hybrides. [50]

2.3.3 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides se classifient en deux catégories. Dans la première catégorie, on trouve les systèmes hybrides qui opèrent en parallèle avec le réseau électrique, également désignés sous le terme de connectés au réseau. Ces systèmes jouent un rôle essentiel dans la satisfaction de la demande du système électrique national. En revanche, les systèmes hybrides de la seconde catégorie fonctionnent en mode isolé ou autonome. Ils doivent répondre aux besoins des utilisateurs situés

dans des zones reculées du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière, etc. [50]

2.3.4 La structure du système hybride

Trois critères peuvent être considérés dans le classement selon la structure du système. Le premier critère concerne la présence ou l'absence d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut inclure un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cadre d'une étude du réseau électrique complet – une centrale entière.

Un second critère envisageable est la présence ou l'absence d'un dispositif de stockage. La disponibilité d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques durant les périodes où une ressource primaire n'est pas disponible pour être convertie en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent inclure des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La dernière classification envisageable concerne le type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut intégrer un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectriques ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère essentiel pour le choix de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible, qui dépend de l'emplacement d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance influence le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle...[50].

2.3.5 Etudes des structures de systèmes hybrides

2.3.5.1 Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

a. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle : Ce type de système hybride est principalement employé dans des zones bénéficiant d'un ensoleillement intense et d'un climat chaud, telles que l'Arabie saoudite, le Maroc, les Maldives ou la Corse, où le potentiel solaire est considérable (Shaahid et Elhadidy, 2003, 2004 ; Muñoz et al., 2004 ; van Sark et al., 2006 ; Muselliet al., 2000).

Ces systèmes, lorsqu'ils fonctionnent de manière autonome, ont pour objectif d'alimenter en permanence divers types de structures : maisons individuelles, bâtiments résidentiels ou administratifs, et même des villages entiers. Ils peuvent également approvisionner des centres de recherche ou être reliés au réseau électrique (Ashari et al., 2001 ; Tina et al., 2005). Les systèmes autonomes intègrent fréquemment des batteries (Ashari et Nayar, 1999) ainsi que d'autres dispositifs de stockage. Alors que les batteries et les panneaux photovoltaïques fournissent du courant continu, les moteurs diesel peuvent entraîner des générateurs produisant du courant

continu ou alternatif. Étant donné que la majorité des charges nécessitent du courant alternatif, la configuration du système dépend du type de machine électrique associée au moteur diesel, et a été classifiée par Wickert et al. (1999). [50]

a.1 Première configuration la connexion série

Dans cette architecture, le générateur diesel est relié au bus en courant continu, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un redresseur. Le champ photovoltaïque ainsi que la batterie y sont également connectés, et la charge est alimentée par un onduleur.

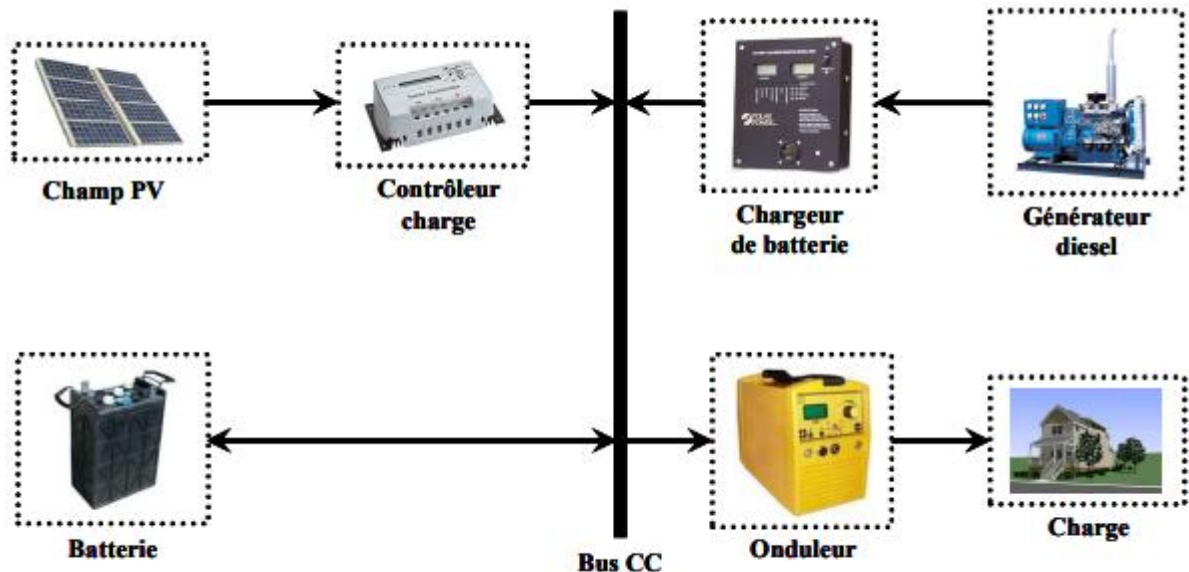


Figure 2.2- Système hybride avec connexion série [50]

Les avantages

- Dimensionnement du générateur diesel facilité.
- Schéma électrique simplifié (absence de commutation AC).
- Aucune interruption lors du démarrage du générateur diesel.
- L'onduleur fournit une tension stable et appropriée à la charge.

Les inconvénients

- L'onduleur ne peut pas fonctionner en parallèle avec le générateur diesel, ce qui nécessite un surdimensionnement
- Nécessité d'une batterie de grande capacité
- Rendement faible en cas de générateur à courant alternatif (conversion double)
- Une défaillance de l'onduleur entraîne l'arrêt complet de l'alimentation.

a.2 Deuxième configuration la commutation

Cette configuration, bien que plus élaborée, est couramment employée. L'alimentation de la charge peut provenir soit du générateur diesel, soit de l'installation photovoltaïque à travers l'onduleur, mais pas en même temps. De plus, le générateur a la capacité de recharger la batterie via un redresseur. Une gestion automatique s'avère indispensable.

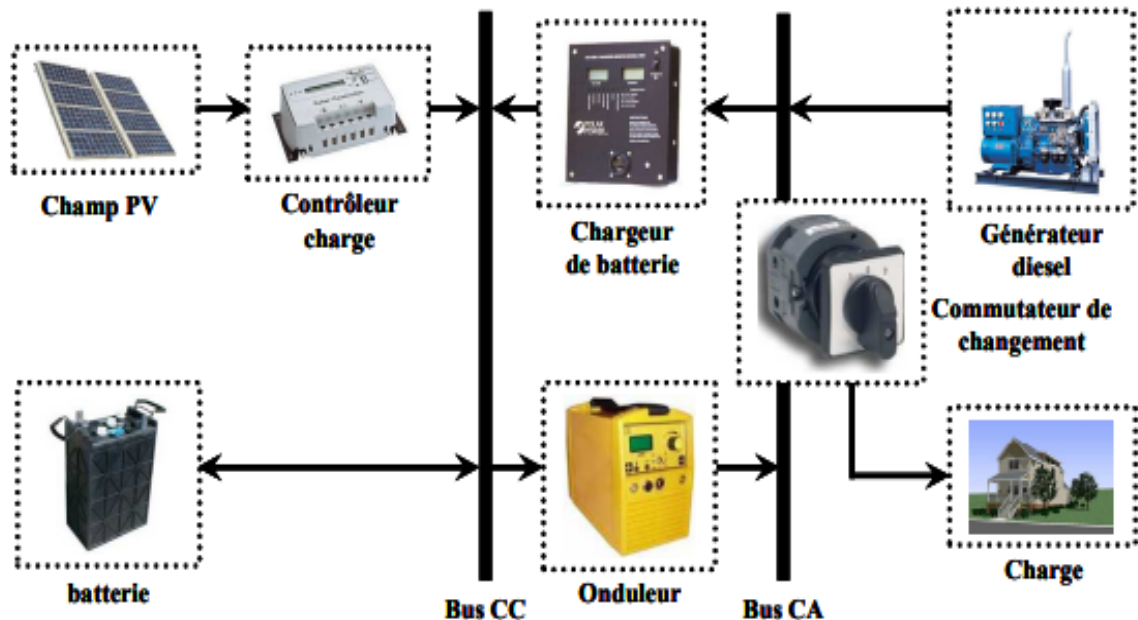


Figure 2.3 Système hybride à commutation [50]

Les avantages:

- Un rendement supérieur, car la charge peut être directement alimentée par le générateur
- L'onduleur garantit une tension adaptée aux exigences
- En cas de défaillance de l'onduleur, l'alimentation peut être soutenue par le générateur diesel

Les inconvénients:

- Risque de coupure temporaire lors du changement entre les sources .
- Nécessité de dimensionner l'onduleur et le générateur en fonction de la charge maximale, ce qui diminue l'efficacité en cas de faible demande.
- Complexité augmentée du système.

a.3 Troisième configuration parallèle

Dans une configuration parallèle, le générateur diesel est relié au bus en courant alternatif, tandis que les panneaux photovoltaïques et les batteries sont connectés à un bus en courant continu. Ces deux bus sont interconnectés par un convertisseur bidirectionnel capable de fonctionner comme

redresseur ou onduleur en fonction de la direction de l'énergie. De cette manière, la charge peut être alimentée en même temps par les deux sources.

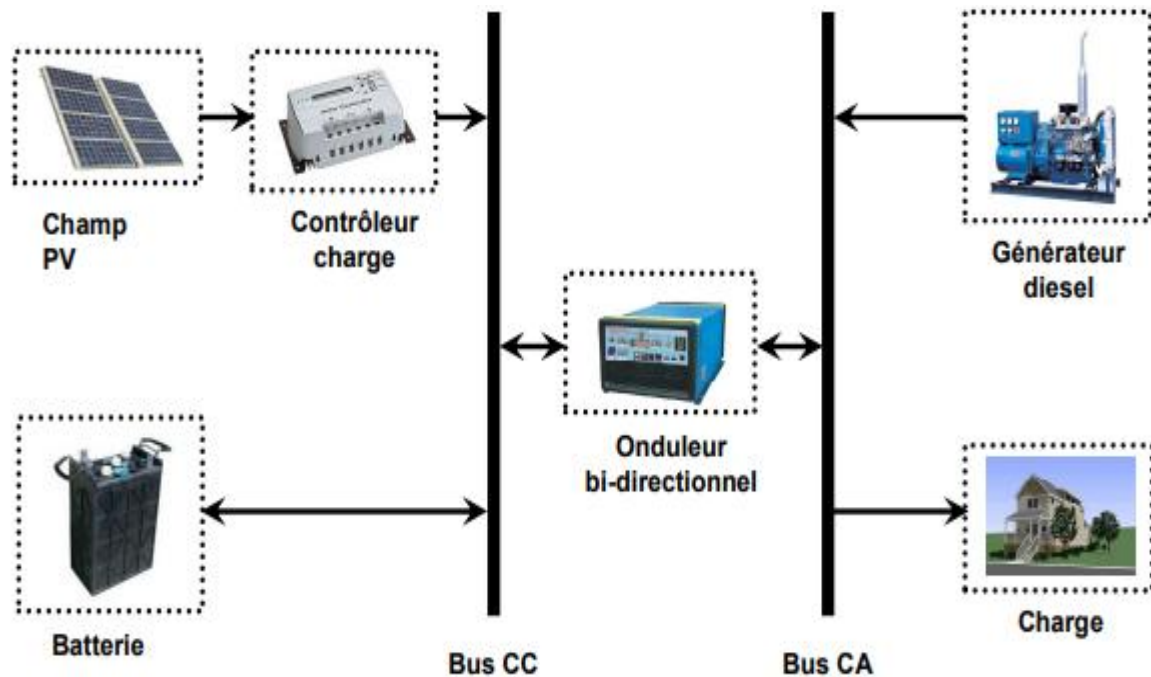


Figure 2.4 Système hybride à connexion parallèle [50]

Les avantages

- Les composants ne requièrent pas de dimensionnement pour la charge maximale, car l'alimentation peut être répartie.
- Un rendement global amélioré est obtenu grâce à un fonctionnement proche de la puissance nominale et à l'absence de double conversion pour le diesel.
- Diminution du nombre de convertisseurs, ce qui entraîne moins de câblage et un coût d'investissement réduit.
- Une défaillance du convertisseur n'entraîne pas une interruption totale.

Les inconvénients

- Le système requiert un contrôle automatique avancé.
- Le convertisseur doit produire une tension sinusoïdale en phase avec le générateur.
- Il est essentiel de disposer de personnel qualifié.
- Le vieillissement rapide des batteries et l'absence de chargeur spécifique sont préoccupants.
- Le bus continu présente des défis de contrôle plus importants.

Des études sur ce type de structure ont été menées par plusieurs auteurs, notamment Ashari, Wichert, Ajan, Shaahid, Oldach et Klinghammer.

Les recherches se focalisent soit sur des systèmes réels déjà en opération, soit sur l'intégration de panneaux photovoltaïques dans des infrastructures existantes, soit sur des analyses théoriques : modélisation des processus internes, optimisation du dimensionnement ou stratégies de gestion de l'énergie.

Un certain nombre d'outils logiciels ont été utilisés : HOMER, Hybrid2, LabView, VEE Pro 7.0.

La majorité des publications considèrent le générateur diesel comme une source conventionnelle, bien que certaines (comme l'indiquent Rana et al., 1998) explorent l'utilisation de turbines à gaz alimentées par du méthane dérivé de la biomasse.[50]

2.3.5.2 Systèmes éolien/source conventionnelle

Les systèmes hybrides éolien-diesel se caractérisent par leur compatibilité entre les deux sources, toutes deux génératrices de courant alternatif, ce qui limite la variété des configurations.

Ils sont particulièrement bien adaptés aux zones insulaires, où le vent est abondant, comme les Canaries (Carta et al., 2003), la Corse (Notton et al., 2001) ou certaines régions d'Angleterre (Bowen et al., 2001).

Les recherches se concentrent sur des installations déjà en place (Bowen et al., 2001), l'intégration de l'éolien comme source additionnelle (Ulleberg et Pryor, 2002), ou des aspects plus globaux tels que les politiques, les flux énergétiques, ou l'optimisation structurelle (Garcia et Weissner, 2006 ; Notton et al., 2001).

Les charges alimentées vont des habitations aux bâtiments publics, en passant par des villages ou des îles entières. La plupart des systèmes fonctionnent de manière autonome, bien que certains soient encore connectés au réseau (Lund et Münster, 2003).

Les solutions de stockage comprennent des batteries, des électrolyseurs associés à des piles à combustible, ou des modèles idéalisés. Pour la modélisation et l'optimisation, divers outils sont utilisés : TRNSYS, Energy PLAN ou encore des algorithmes avancés (multi-variables, linéaires, dynamiques, heuristiques).

Enfin, les évaluations économiques reposent sur des mesures réelles ou des estimations de coûts (Carta et al., 2003 ; Notton et al., 2001).[50]

2.3.5.3 Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

La mise en œuvre de systèmes hybrides a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelables et de réduire encore plus la consommation de combustibles fossiles, grâce à la complémentarité des sources vertes. Plusieurs recherches se concentrent sur des systèmes déjà en place (Pinto & Araújo, 2004 ; Khelif & Fatnassi, 2005 ; Phuangpornpitak & Kumar, 2007) ou sur la conception de nouveaux dispositifs (McGowan et al., 1996). D'autres études examinent l'interconnexion de ces systèmes au réseau électrique, comme c'est le cas à New York

(Baghdadchi & Varrette, 2002) ou en Arabie Saoudite (Elhadidy & Shaahid, 1999). L'optimisation de la configuration de ces systèmes repose sur plusieurs critères : la probabilité de perte de charge (El-Tamaly & Mohammed, 2006), le coût minimal associé à de faibles émissions polluantes (Bernal-Agustín et al., 2006), ou encore la minimisation de la charge non satisfaite (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2008). Pour atteindre ces objectifs, des approches avancées sont mises en œuvre, telles que les algorithmes de Pareto, les algorithmes génétiques et évolutifs, ou la logique floue. Ces systèmes sont utilisés pour alimenter aussi bien des maisons et refuges isolés (Elhadidy, 2002) que des villages entiers (Pinto & Araújo, 2004), et peuvent fonctionner de manière autonome ou être connectés au réseau national (Bhave, 1999). En ce qui concerne le stockage de l'énergie, plusieurs technologies sont mises en œuvre : les batteries (Brito et al., 2004 ; Rothert & Wollny, 2006), l'hydrogène couplé à un électrolyseur et une pile à combustible (Steinhäuser et al., 2004), ou une combinaison de ces deux solutions (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2008). Une gestion optimisée du stockage est également proposée par certains auteurs (Rothert & Wollny, 2006). Parmi les logiciels de simulation les plus utilisés, on retrouve HOMER, Hybrid2 et SOMES. Enfin, plusieurs études se sont intéressées à l'analyse économique de ces systèmes (Phuangpornpitak & Kumar, 2007). [50]

2.3.5.4 Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides opèrent principalement en mode autonome dans des zones où l'accès au carburant diesel ou la connexion au réseau électrique est complexe, voire impossible. Dans la suite de ce paragraphe, quatre configurations de systèmes hybrides, avec ou sans stockage, seront présentées.

2.3.5.5 Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être couplée à une autre source d'énergie pour garantir l'alimentation de la charge pendant la nuit ou lors de périodes de faible ensoleillement. Ces systèmes hybrides peuvent fournir de l'énergie à des maisons (Mulder et al., 2010 ; Islam & Belmans, 2004) ou même à des villages entiers (Vosseler et al., 2004). Les recherches se concentrent soit sur la modélisation et l'analyse (Zahedi, 1998), soit sur le dimensionnement optimal des composants (Mulder et al., 2010 ; Kaushika et al., 2005), avec comme critère principal la probabilité de perte d'alimentation (Fragaki & Markvart, 2008 ; Kaushika et al., 2005).

Vosseler et al. (2004) présentent les résultats de six systèmes totalisant 86,3 kWc, tandis que Busquet et al. (2004) examinent des systèmes hybrides dans des centres de recherche. La gestion énergétique est analysée par Uzunoglu et al. (2009) et Kaushika et al. (2005). Des algorithmes de suivi du point de puissance maximale, fondés sur la logique floue, ont été élaborés par El-Shatter et

al. (2002). La production d'hydrogène à partir de l'énergie photovoltaïque est également étudiée, que ce soit par électrolyseur (McConnell et al., 2005) ou à travers diverses technologies (Conibeera & Richards, 2007).

Différentes options de stockage sont envisagées : stockage idéal (Mulder et al., 2010), bancs de batteries (Zahedi, 1998 ; Kaushika et al., 2005), électrolyseur avec réservoir d'hydrogène (Busquet et al., 2004), ou encore des combinaisons de technologies, telles que l'électrolyseur et la batterie (Islam & Belmans, 2004), ou l'électrolyseur et le supercondensateur (Uzunoglu et al., 2009). Les supercondensateurs, de conception récente, permettent un stockage très rapide sur une courte période, tandis que l'électrolyseur offre un stockage plus lent mais de grande capacité (Thounthong et al., 2009). Enfin, Mulder et al. (2010) examinent un système hybride relié au réseau électrique, apte à remédier aux surtensions et aux interruptions d'alimentation. Les logiciels employés pour ces recherches comprennent Matlab (Islam & Belmans, 2004 ; El-Shatter et al., 2002 ; Uzunoglu et al., 2009) ainsi que ESRA (Fragaki & Markvart, 2008). [50]

2.3.5.6 Système hybride éolien/stockage

L'interconnexion du système de stockage avec un générateur éolien vise deux objectifs : agir comme un tampon en fonctionnement parallèle avec le réseau électrique pour atténuer les fluctuations rapides de puissance (Nouni et al., 2007 ; Zhou, 2009), ou garantir un stockage à long terme en mode autonome afin de fournir de l'énergie à la charge durant les périodes de faible vent (Zini & Tartarini, 2010 ; Ntziachristos et al., 2005). Le réseau peut être de grande envergure, comme aux États-Unis (Denholm, 2006), ou de plus petite taille, notamment sur des réseaux insulaires (Kasseris et al., 2007).

Les recherches varient en fonction de l'intervalle de temps étudié : certaines se concentrent sur les processus à variation lente, en examinant l'énergie fournie par chaque source (Korpaas et al., 2003 ; Nouni et al., 2007), tandis que d'autres se penchent sur des phénomènes de courte durée (Iqbal, 2003a ; Shi et al., 2008). Ces systèmes hybrides peuvent alimenter aussi bien des ménages (Iqbal, 2003b), des bâtiments tels que des hôtels (Bechrakis et al., 2006), que des villages entiers (Nouni et al., 2007). Les modes de stockage analysés comprennent les batteries (Nouni et al., 2007), l'électrolyseur avec réservoir d'hydrogène (Ntziachristos et al., 2005 ; Bechrakis et al., 2006), leurs combinaisons (Zini & Tartarini, 2010), ainsi que d'autres solutions comme le stockage par air comprimé (Denholm, 2006), les aimants supraconducteurs (Shi et al., 2008) ou l'association d'électrolyseur, réservoir d'hydrogène et supercondensateur (Zhou, 2009).

En fonctionnement parallèle au réseau, la gestion de la puissance est essentielle (Ntziachristos et al., 2005 ; Kasseris et al., 2007). D'un point de vue économique, certaines études se limitent à l'évaluation des coûts des composants (Denholm, 2006 ; Kasseris et al., 2007), tandis que d'autres calculent le coût de production par kilowattheure (Bechrakis et al., 2006 ; Nouni et al., 2007).

Enfin, l'étude des systèmes hybrides est effectuée grâce à des algorithmes de programmation dynamique (Korpaas et al., 2003) ou à des logiciels commerciaux tels que Matlab (Bechrakis et al., 2006 ; Iqbal, 2003a ; Shi et al., 2008) et SIMNON (Iqbal, 2003b).[50]

2.3.5.7 Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

L'inconvénient principal des systèmes hybrides reposant sur une unique source d'énergie réside dans le manque de diversité, ce qui entraîne fréquemment un surdimensionnement des composants afin d'assurer une alimentation ininterrompue. Cela se traduit par un coût initial élevé et un tarif du kilowattheure supérieur, ce qui limite le développement de ces systèmes. L'intégration d'une seconde source d'énergie permet de diminuer, voire d'éliminer, ces désavantages (Diaf et al., 2008 ; Bitterlin, 2006 ; Krauter et al., 2004).

Les recherches se concentrent sur des systèmes déjà en place (Sopian et al., 2009), des bancs d'essai (Lazarov et Zarkov, 2002), ou des études théoriques examinant l'effet de l'ajout d'une seconde source (Lew et al., 1997) ou la conception de nouveaux systèmes hybrides (Azbe et Mihalic, 2006). L'optimisation des configurations s'effectue selon des critères tels que la réduction de la probabilité de perte de charge, le coût minimal du kilowattheure, ou une combinaison des deux (Ai et al., 2003 ; Kaabeche et al., 2006 ; Ekren et Ekren, 2009).

Les techniques d'optimisation employées comprennent les algorithmes génétiques, les méthodes heuristiques, ainsi que divers logiciels commerciaux tels que HOMER, Hybrid 2, Matlab, PSCAD/EMTDC, et ARENA.

Ces systèmes hybrides alimentent une variété d'applications : cellules 3G d'opérateurs mobiles, foyers, bâtiments et villages, et sont déployés sur tous les continents, notamment en Afrique (Algérie, Syrie), en Asie (Chine, Inde, Bangladesh, Malaisie, Turquie), en Europe (Royaume-Uni, France), en Amérique du Nord (Canada, États-Unis) et en Amérique du Sud (Brésil).

Ils fonctionnent principalement en mode autonome, bien que des systèmes connectés au réseau électrique soient également disponibles. Les dispositifs de stockage privilégiés sont souvent des batteries, parfois associées à un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou combinées aux deux (batterie + stockage hydrogène).

Enfin, les modèles de comportement se basent sur des données d'entrée telles que des mesures horaires ou mensuelles du rayonnement solaire et de la vitesse du vent, ainsi que sur des distributions statistiques comme celle de Weibull. [50]

2.4 Les matériaux intelligents

Un matériau intelligent se définit par sa sensibilité, sa capacité d'adaptation et son évolution. Il intègre des fonctions qui lui permettent d'agir comme un capteur (détection de signaux), un actionneur (intervention sur l'environnement) et parfois comme un processeur (traitement, comparaison et stockage d'informations). Ce type de matériau a la capacité de modifier spontanément ses propriétés

physiques telles que la forme, la connectivité, la viscoélasticité ou la couleur — en réponse à des stimuli externes ou internes, qu'ils soient naturels ou artificiels : variations de température, contraintes mécaniques, champs électriques ou magnétiques. Ainsi, il adapte sa réponse, signale toute modification de l'environnement, et peut même, dans certains cas, initier une action corrective. Cela permet par exemple de détecter des faiblesses dans la structure du revêtement d'un avion, de repérer des fissures dans un bâtiment ou un barrage en béton, ou encore de réduire les vibrations des pales d'un hélicoptère ou d'une éolienne grâce à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.[51]

2.4.1 Alliages à mémoire de forme (AMF)

2.4.1.1 Définition

Les alliages à mémoire de forme sont des matériaux métalliques qui possèdent des caractéristiques thermomécaniques spécifiques, telles que la super-élasticité, l'effet mémoire de forme et un fort pouvoir d'amortissement. Les phases de « basse » et « haute » température sont respectivement désignées par les termes martensite et austénite, en référence à la transformation de phase observée dans les aciers lors d'une trempe. Les transformations martensitiques dans les aciers présentent en effet certaines similitudes avec les transformations de phase dans les alliages à mémoire de forme, notamment en ce qui concerne le caractère « displacif » de la modification cristalline. Les plages de température et de contrainte dans lesquelles se produit le changement de phase dans les alliages à mémoire de forme sont adaptées à des applications en ingénierie.[52]

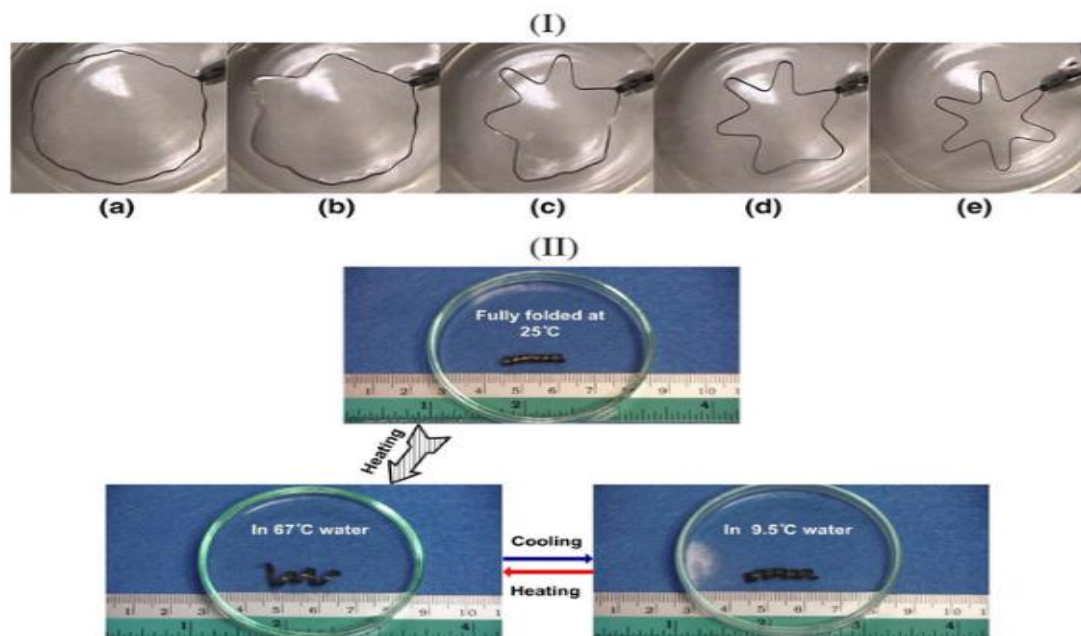


Figure 2.5 (I) Effet mémoire de forme à sens unique dans une bande de NiTi immergée dans de l'eau chaude ; et(II) Effet mémoire de forme bidirectionnel dans un ressort en spirale en alliage à mémoire de forme NiTi. [81]

2.4.1.2 Historique

L'effet de la mémoire a été observé pour la première fois en 1939 sur des alliages de cuivre et d'aluminium par des chercheurs russes. Par la suite, des chercheurs américains ont démontré qu'un alliage d'or et de cadmium change de forme et est capable de retrouver sa configuration initiale sous l'effet de la chaleur. Cette propriété a été identifiée dans les alliages de nickel et de titane. Les recherches se sont considérablement intensifiées dans les années 80 afin de mieux appréhender ce phénomène, et cette découverte a été appliquée pour la première fois dans le traitement des tubes d'avions.

2.4.1.3 Transformation martensitique

Il s'agit d'une transformation qui se produit dans l'espace durant le processus de refroidissement après la conclusion de la phase d'investissement à haute température.

Deux phases sont présentes dans le métamorphisme martensitique : une phase stable à haute température, l'austénite, et une autre phase stable à basse température, la martensite. La transformation martensitique représente une transformation de phase à l'état solide, accompagnée d'une déformation homogène du réseau cristallin. [53]

Le terme déplacement indique que les atomes se déplacent sur de courtes distances, de l'ordre de 1/10 de la distance interatomique, dans un mouvement coopératif. Ainsi, la diffusion des atomes est absente et la transformation s'effectue très rapidement (à une vitesse comparable à celle du son dans le milieu) sans altérer la composition chimique. La déformation homogène du réseau, dans un cas général, résulte d'une combinaison de mesures de composante oblique (maclage) et de dilatation. Concernant les AMF, la transformation martensitique se produit avec une variation de volume très faible, ce qui constitue la principale différence par rapport aux autres alliages métalliques, notamment les aciers, et confère aux AMF leurs propriétés spécifiques. Lors du refroidissement, le processus de transformation de l'austénite en martensite débute à une température de M_s (début de la martensite) et se termine à une température de M_f (fin de la martensite). Lorsque la température augmente, la transformation inverse commence à une température A_s (début austénitique) et se termine à une température A_f (fin austénitique).

Il existe effectivement une hystérésis thermique entre le refroidissement et le chauffage. [53]

2.4.1.4 Les effets des alliages à mémoire de forme

Les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) constituent un groupe d'alliages métalliques dotés de diverses caractéristiques :

La superélasticité : cet alliage a la capacité de se déformer de manière significative (jusqu'à 10 %) de façon réversible sous l'effet d'une contrainte .

L'effet mémoire unidirectionnel : l'alliage peut retrouver sa forme originale par chauffage après avoir subi une déformation mécanique ;

L'effet mémoire bidirectionnel : après un processus d'éducation, l'alliage peut adopter deux positions stables, l'une au-dessus d'une température critique et l'autre en dessous .

L'effet caoutchoutique: l'alliage (sous forme martensitique auto-accommodée) conserve une déformation résiduelle après relâchement suite à une déformation . si le matériau est de nouveau soumis à une contrainte puis déchargé, cette déformation résiduelle augmente .

L'effet d'amortissement: cet alliage a la capacité d'absorber des chocs ou de réduire des vibrations mécaniques. En effet, la super-élasticité, ou même simplement l'élasticité de la phase martensitique, présente un phénomène d'hystérésis qui entraîne une dissipation d'énergie. [54]

2.4.1.5 La superélasticité :

C'est une substance que l'on chauffe à température ambiante et que l'on refroidit afin d'obtenir un effet de mémoire de forme. Lors d'un chargement mécanique et à température constante, on observe une déformation supplémentaire des ions (inélastique). Après décharge mécanique, lorsque le matériau se rétracte et reprend sa forme première, c'est ce qu'on appelle l'effet super élastique. Lors de l'application d'une contrainte (plus la contrainte est élevée, plus la température est élevée), un changement de comportement se produit, c'est-à-dire que lorsqu'une contrainte élevée est appliquée, la température est égale puis supérieure à la température ambiante, ce qui entraîne un changement de comportement du matériau résultant de ce comportement non linéaire, avec une première phase de déformation caractérisée par la dureté élasticité classique, puis une phase dans laquelle la pression reste quasi constante. Le matériau se déforme, cette déformation est limitée à une valeur maximale de la déformation, où le comportement est élastique et est également réversible après retour à une pression nulle, où le matériau retrouve sa forme initiale [55]

Ce comportement superélastique peut être exploité pour la récupération d'énergie mécanique, en particulier lorsqu'il est associé à des transducteurs piézoélectriques qui permettent de transformer cette énergie mécanique, à la fois stockée et libérée, en énergie électrique.

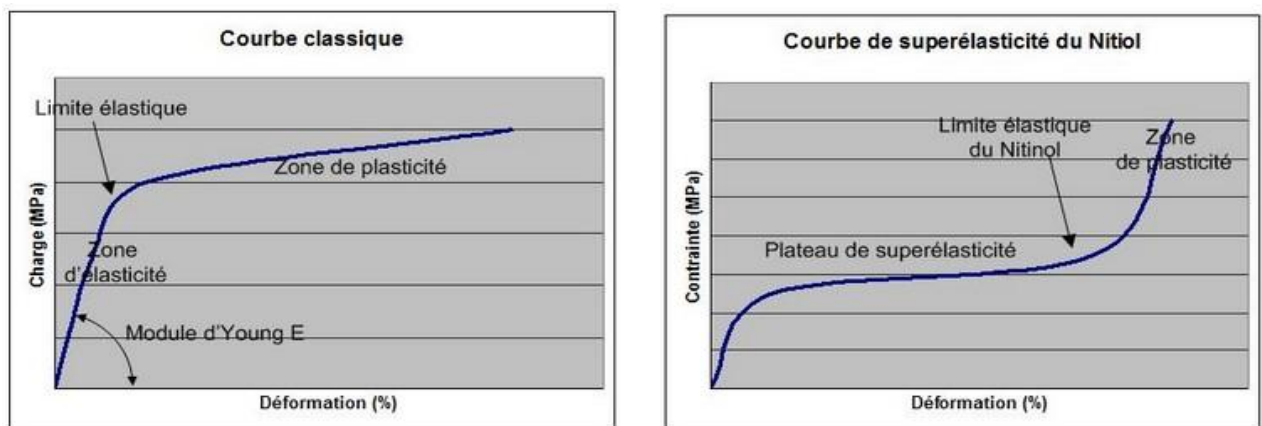


Figure 2.6 Comparaison entre le comportement mécanique classique et la superélasticité du Nitinol [74]

2.4.1.6 Les applications des AMF

Dans le domaine médical

Le bouchon méatique Pour traiter la sécheresse oculaire, l'ophtalmologiste réalise l'obturation des canaux lacrymaux en insérant un bouchon méatique dans le méat lacrymal. De cette manière, le liquide lacrymal n'est plus évacué par ce canal. PolymerExpert a mis en œuvre sa technologie de polymère à mémoire de forme pour concevoir un bouchon en forme de parapluie, d'un diamètre inférieur à 0,1 mm, qui s'ouvre pour obstruer le canal grâce à l'effet de la température. [56]

Dans le domaine industriel

Le changement d'une tige filetée Dans le secteur textile, les travailleurs employaient une tige filetée associée à un système de boulonnerie pour positionner tous les fils avant le démarrage de la machine à tisser. Afin d'améliorer la productivité, PolymerExpert a conçu des tiges à mémoire de forme. De cette manière, les boulons peuvent être facilement enfilés sur la tige de petit diamètre. Lorsqu'elle est chauffée, le diamètre de la tige s'accroît et bloque les boulons. [56]

Dans le domaine aérospatial :

Des bras extensibles Dans un contexte de réduction de poids, des systèmes de déploiement (comme pour les panneaux solaires, par exemple) ont été substitués par des composites à mémoire de forme. Ces matériaux, qui sont conducteurs tant thermiquement qu'électriquement, possèdent la capacité de se déployer simplement grâce à un courant électrique fourni par une batterie ou une résistance. L'intérêt de cette technologie réside dans le fait qu'elle permet d'éviter d'installer sur un nano-satellite un moteur lourd, associé à des bras articulés en métal. [56]

2.4.2 Les matériaux magnétostrictifs

2.4.2.1 Définition

La magnétostriction est une caractéristique des matériaux magnétiques qui provoque une modification de leur forme ou de leurs dimensions lors du processus de magnétisation. [57]

Les alliages magnétostrictifs réagissent au champ magnétique de la même manière que les matériaux piézoélectriques réagissent au champ électrique. Lorsqu'un barreau de fer est soumis à un champ magnétique, il s'allonge tout en subissant une striction dans la direction transversale.

À l'inverse, l'effet Villari se manifeste par l'aimantation du barreau en réponse à un allongement. En fonction de la géométrie considérée, il est également possible d'exploiter des déformations en flexion ou en torsion. [58]

2.4.2.2 Historique

Le physicien anglais Joule a découvert en 1842 qu'un barreau de fer exposé à un champ magnétique longitudinal s'allongeait dans la direction de ce champ, tout en se contractant transversalement, comme s'il était soumis à une traction mécanique. Il a nommé ce phénomène magnétostriction. Depuis cette découverte, d'autres effets mécaniques du champ magnétique ont été

révélés. Lorsqu'ils sont soumis à un champ magnétique, des échantillons de certaines substances ne se contentent pas de se dilater ou de se contracter, mais subissent également des flexions, des torsions, des modifications de densité, et même des variations de leur module d'Young. Suite aux travaux de Joule, tous ces phénomènes magnéto élastiques ont été regroupés sous le terme de magnétostriction. En termes généraux, la magnétostriction représente l'ensemble des relations qui lient les propriétés mécaniques d'un corps à ses propriétés magnétiques. [58]

2.4.2.3 Principaux Phénomènes de magnétostriction

La magnétostriction, également connue sous le nom de piézomagnétisme, fait référence à la capacité des matériaux ferromagnétiques à se déformer sous l'influence d'un champ magnétique. Lorsque le matériau atteint sa saturation magnétique, la déformation maximale causée par la magnétostriction est généralement de l'ordre du micromètre par centimètre de matériau. Par exemple, le fer présente une déformation relative faible, atteignant au maximum $0,2 \mu\text{m}/\text{cm}$, tandis que des alliages de fer avec des terres rares comme le terbium ou le dysprosium peuvent subir des déformations relatives dépassant $15 \mu\text{m}/\text{cm}$ sous un champ magnétique de $1 \text{ MA}/\text{m}$. La magnétostriction est responsable du bruit audible près des transformateurs et des appareils électriques fonctionnant à haute tension, ce bruit ayant une fréquence égale à deux fois celle du courant, c'est-à-dire $2 \cdot 50 \text{ Hz} = 100 \text{ Hz}$ (plus les harmoniques). Un transducteur magnétostrictif est généralement composé d'un solénoïde traversé par un courant d'excitation qui génère un champ magnétique variable, à l'intérieur duquel se trouve un barreau en matériau ferromagnétique, le tout étant enfermé dans un cylindre qui ferme le circuit magnétique. Pour permettre des déplacements bidirectionnels, une magnétisation statique du matériau est réalisée soit à l'aide d'un aimant permanent, soit en faisant circuler un courant continu dans le solénoïde, ce courant se superposant au courant d'excitation variable. De plus, une précontrainte mécanique est souvent appliquée au barreau ferromagnétique à l'aide d'un boulon, afin de faire fonctionner le transducteur en compression et de garantir ainsi la transmission des efforts mécaniques à l'interface entre le transducteur et la charge appliquée. Les matériaux ferromagnétiques utilisés peuvent inclure le fer, le nickel, ou des alliages aluminium-fer (alfenol) ou nickel-cobalt, bien que le matériau le plus couramment employé soit le Terfenol-D, en raison de ses bonnes performances. Les matériaux ferromagnétiques présentent également un effet magnétostrictif inverse, désigné sous le nom d'effet magnéto mécanique, qui se manifeste par une variation de la susceptibilité magnétique lorsque des contraintes mécaniques sont appliquées au matériau. [59]

2.4.2.4 Application

a) Capteur magnétostrictif

Les matériaux ferromagnétiques présentent un effet magnétostrictif inverse, se manifestant par une variation de la susceptibilité magnétique sous l'influence de contraintes mécaniques appliquées au matériau. Cet effet inverse est également exploité dans les capteurs de déplacement. [58]

b) Les actionneurs

Un actionneur représente le composant actif d'une chaîne d'asservissement, contrôlant une grandeur par le déplacement d'une pièce. Les actionneurs, qu'ils soient à mouvement longitudinal ou transversal, sont généralement basés sur des empilements piézoélectriques en PZT. [60]

c) Émetteurs-récepteurs d'ondes élastiques

Un résonateur magnétostrictif peut servir de transducteur, que ce soit comme émetteur ou récepteur d'ondes élastiques. Dans le secteur des projecteurs ultrasonores à basse fréquence (par exemple, 500 Hz) pour des applications sous-marines, le Terfenol-D offre des avantages significatifs par rapport aux céramiques piézoélectriques PZT. La puissance crête ultrasonore qu'un transducteur peut émettre sans compromettre ses performances est limitée par l'énergie volumique élastique de rupture ou le seuil de non-linéarité élastique du matériau, ainsi que par l'énergie volumique magnétique maximale que le matériau peut supporter sans dépolarisation ni non-linéarités magnétiques excessives. [61]

2.4.3 Matériaux Electroactifs

Fairweather a décrit les matériaux intelligents actifs comme des substances ayant la capacité de modifier leurs propriétés géométriques ou matérielles sous l'effet de champs électriques, thermiques ou magnétiques, acquérant ainsi une aptitude intrinsèque à transduire de l'énergie [62]. En général, l'électro-activité d'un matériau est définie par une réponse réversible d'une ou plusieurs propriétés physico-chimiques (déformation, variation de température...) lors de l'application d'un champ électrique, ou inversement, si une sollicitation (mécanique, thermique...) induit une réponse électrique au sein du matériau. Ces matériaux sont au centre d'un large éventail d'applications, allant des actionneurs et capteurs aux dispositifs de stockage et de production d'énergie. Les propriétés distinctives des matériaux électroactifs leur permettent d'être intégrés dans des systèmes et dispositifs intelligents capables d'interagir avec leur environnement ou de s'adapter à des variations de conditions. Les matériaux électroactifs sont généralement classés en plusieurs catégories, y compris les céramiques, les composites, les alliages et les polymères, chacun ayant des caractéristiques uniques et des domaines d'application spécifiques. Parmi ces catégories, les polymères électro actifs suscitent un intérêt particulier en raison de leur flexibilité, de leur légèreté et de leur capacité à adopter des formes complexes grâce à des procédés relativement simples et économiques. Ils sont donc particulièrement adaptés à une multitude d'applications nécessitant une déformation significative ou une flexibilité intrinsèque. Dans ce cadre, les polymères électro actifs

se distinguent par leur comportement actif face à la stimulation d'un champ électrique, ce qui leur permet de se déformer, de modifier leur volume ou d'ajuster leur conductivité électrique [63].

Ces propriétés uniques sont utilisées pour concevoir des dispositifs novateurs tels que des écrans tactiles flexibles, des muscles artificiels, des capteurs extrêmement sensibles et des systèmes de stockage d'énergie avancés. Certains polymères électro actifs possèdent des caractéristiques piézoélectriques et ferroélectriques remarquables, comme le PVDF (poly fluorure de vinylidène) et ses copolymères, ainsi que des polymères conducteurs tels que le poly pyrrole et le polyaniline, qui modifient leur conductivité en réponse à des stimuli externes [64].

2.4.4 Matériaux piézoélectriques

2.4.4.1 Historiques

L'effet piézoélectrique a été observé pour la première fois en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie, qui ont démontré le premier effet piézoélectrique en utilisant des cristaux de normalien et de quartz, à travers lesquels ils ont constaté l'effet piézoélectrique dit direct. Ensuite, en 1881, l'effet piézoélectrique inverse a été découvert, selon lequel les cristaux se déforment lorsqu'ils sont soumis à une polarisation, à une vitesse proportionnelle au champ piézoélectrique [65]. Par la suite, les recherches dans ce domaine ont été mises en œuvre durant la Première Guerre mondiale en 1917. Elles ont été utilisées pour développer des sonars, un dispositif permettant de détecter la position des sous-marins.

En raison de l'intérêt soutenu pour les matériaux piézoélectriques, une attention significative a été accordée à ces matériaux, ainsi qu'à l'importance de développer davantage de dispositifs utilisant des matériaux piézoélectriques synthétiques, qui ont été appliqués durant la Seconde Guerre mondiale, notamment dans les domaines de la télévision et de la radio.

2.4.4.2 Définition de la piézoélectricité

Le terme piézoélectricité provient du mot grec piezein, qui se traduit par pression. La piézoélectricité est constituée de cristaux et de certains matériaux céramiques capables de générer une tension lorsqu'une pression mécanique est appliquée. Lorsqu'une pression mécanique est exercée sur un matériau piézoélectrique, des charges électriques se forment, de sorte que la tension est proportionnelle à la contrainte [66].

2.4.4.3 Effets piézoélectriques

Le terme piézoélectricité fait référence à la capacité de certains matériaux à générer un champ ou une tension électrique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique, ce qui est connu sous le nom d'effet piézoélectrique direct (Figure). De plus, on a également constaté l'existence d'un effet piézoélectrique inverse, où l'application d'un potentiel électrique à un matériau possédant des propriétés piézoélectriques entraîne une modification de ses dimensions (Figure).[67]

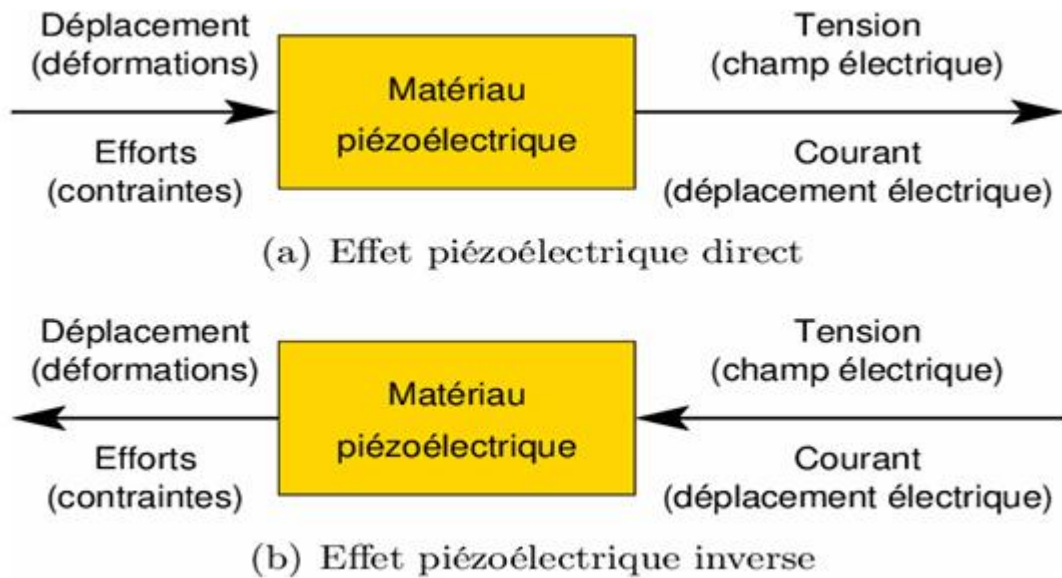


Figure 2.7 Effets piézoélectriques [68]

2.4.4.4 Classes cristallines

Il existe 32 classes cristallines, dont 21 sont non centrosymétriques et 11 centrosymétriques. Parmi ces 21 classes, 1 est non piézoélectrique et 20 sont piézoélectriques, se divisant en 10 pyroélectriques en l'absence de champ extérieur, et sont naturellement polarisées dans une direction. Elles sont qualifiées de thermoélectriques et polaires en raison de la polarisation spontanée liée à la température. Parmi ces 10 classes, 9 sont ferroélectriques, avec un sens automatique, qui peuvent être redirigées ou même inversées sous l'influence d'un champ électrique extérieur.

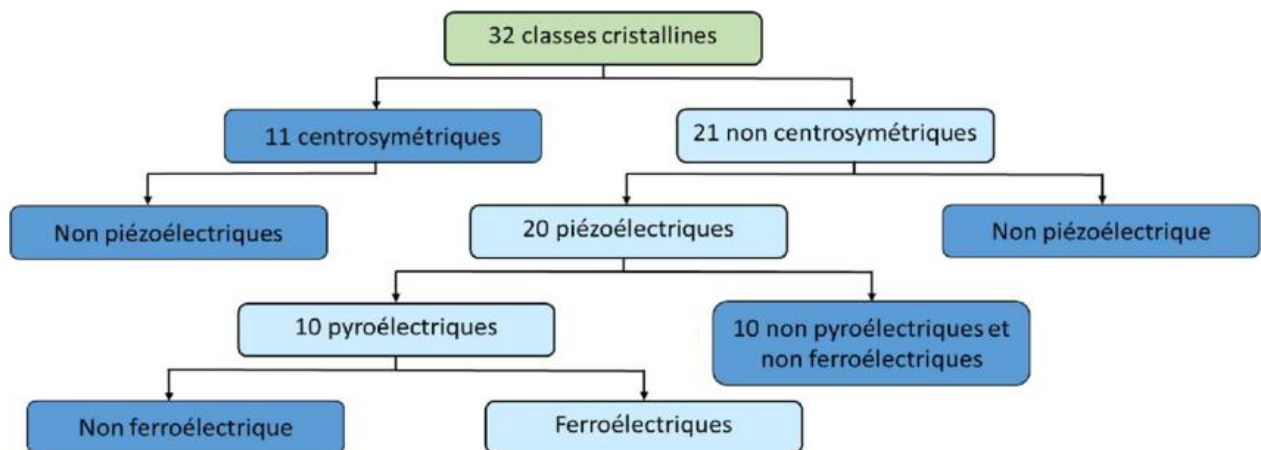


Figure 2.8 Classes cristallines et piézoélectriques [69].

2.4.4.5 Applications des matériaux piézoélectriques

- ❖ Un hydrogel imprimable en 3D qui change de forme à la lumière.
- ❖ Un pansement connecté qui détecte et soigne les infections.
- ❖ Un revêtement caméléon qui change de couleur quand on l'étire.
- ❖ Un écran qui s'auto répare.
- ❖ Une nappe qui reconnaît ce qui est posé sur une table. [67]

2.5 Triboélectricité

2.5.1 Définition

La tribotronique est un concept qui a vu le jour au milieu des années 2010. Elle peut être appliquée aussi bien dans le secteur de la tribologie active que dans celui de la récupération d'énergie les surfaces en contact et leur mouvement relatif fonctionnent comme de véritables sources d'énergie pour alimenter des dispositifs électriques [70].

Ce terme, dérivé du grec "tribein", signifiant frotter, fait référence au phénomène électrostatique par lequel, lorsque deux matériaux de nature différente entrent en contact, une partie des électrons de la surface de contact de l'un des matériaux est transférée à l'autre, et ce transfert se maintient lors de la séparation. L'effet triboélectrique peut être intensifié en apportant de l'énergie mécanique par le frottement des matériaux l'un contre l'autre. [71]

2.5.2 Effet Triboélectrique

L'effet triboélectrique désigne une électrification qui se produit par contact, où un matériau acquiert une charge électrique après avoir été frotté contre un autre matériau différent.

Cet effet constitue une cause fondamentale de l'électrostatique que l'on rencontre dans la vie quotidienne. La nature des charges que peut porter un matériau est déterminée par sa polarité relative par rapport au matériau avec lequel il entre en contact. Des milliers d'années. Bien qu'il s'agisse de l'un des effets les plus courants que chacun d'entre nous utilise inévitablement chaque jour, le mécanisme de la triboélectrification demeure un sujet d'étude, peut-être même de controverse. Il est généralement reconnu qu'après le contact entre deux matériaux distincts, une liaison chimique se crée entre certaines zones des deux surfaces, ce qui est désigné par le terme d'adhérence, et les charges se déplacent d'un matériau à l'autre afin d'équilibrer leur potentiel électrochimique. Les charges qui sont transférées peuvent être des électrons ou des ions/molécules. Lorsqu'ils sont séparés, certains des atomes liés ont tendance à conserver des électrons supplémentaires, tandis que d'autres ont tendance à les céder, ce qui engendre finalement des charges triboélectriques sur les surfaces. Les matériaux qui présentent habituellement un impact significatif sur la triboélectrification sont sans doute moins conducteurs ou isolants. En conséquence, ils ont tendance à retenir les charges transférées et à les conserver sur une durée prolongée, accumulant ainsi des charges électrostatiques, souvent perçues comme ayant un effet néfaste dans notre quotidien et dans les avancées technologiques. Nous pouvons utiliser les exemples suivants pour illustrer les dommages potentiels causés par la triboélectrification. Les avions en vol accumuleront des charges statiques en raison du frottement de l'air sur la cellule, ce qui perturbera la communication par radiofréquence. Les charges électrostatiques représentent une préoccupation majeure pour la sécurité, car elles peuvent entraîner des explosions et enflammer des vapeurs inflammables. Les chariots ou voitures transportant des liquides volatils, des gaz

inflammables ou des produits chimiques explosifs doivent être correctement déchargés afin d'éviter tout risque d'incendie. Certains appareils électroniques, tels que les circuits intégrés complémentaires à semi-conducteur à oxyde métallique (SCOM) et les transistors MOSFET, peuvent être accidentellement endommagés par une décharge statique à haute tension pouvant être transférée par des gants. En conséquence, la triboélectrification est généralement perçue comme un phénomène défavorable dans notre quotidien, notre production industrielle et nos systèmes de transport. Étonnamment, bien que la triboélectrification soit reconnue depuis des millénaires, elle n'a pas été exploitée pour de nombreuses applications bénéfiques. Ce n'est que récemment que l'effet triboélectrique a été largement employé pour transformer l'énergie mécanique en électricité et en tant que capteurs mécaniques actifs autoalimentés. [72]

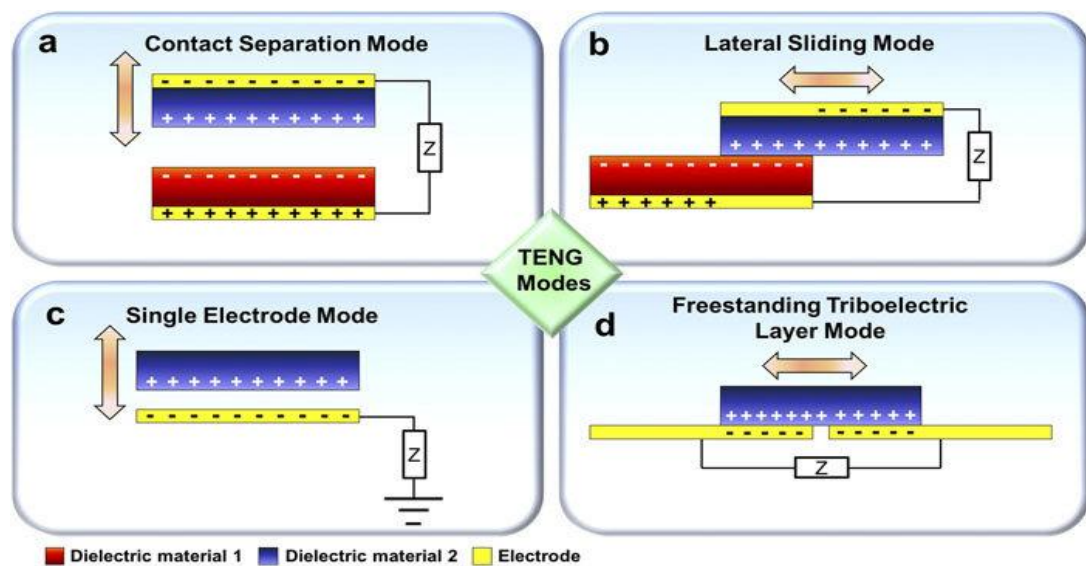


Figure 2.9 Quatre modes de fonctionnement des nano générateurs triboélectriques (TENGs)

(a) Mode de contact et de séparation verticale (b) Mode de glissement par contact (c) Mode à électrode unique (d) Mode à couche triboélectrique autonome. [73]

2.5.3 La nanoénergie une approche durable pour l'alimentation autonome des dispositifs de l'Internet des objets

Au cours des deux dernières décennies, avec l'expansion rapide de l'Internet des objets (IoT), une multitude de petits dispositifs électroniques tels que des capteurs, des actionneurs et des transmetteurs sans fil ont été intégrés dans tous les recoins du monde pour la surveillance de la santé, la détection biochimique, la protection de l'environnement, les commandes à distance, la transmission sans fil et la sécurité.

Chacun de ces dispositifs ne nécessite qu'une faible puissance, de l'ordre du microwatt (μW) au milliwatt (mW), ce qui exige également une source d'énergie caractérisée par sa mobilité, sa durabilité et sa disponibilité. Traditionnellement, les batteries sont couramment utilisées pour alimenter ces dispositifs. Cependant, surveiller, gérer et recycler les grandes quantités de batteries à durée de vie limitée constitue une tâche extrêmement difficile, et les substances chimiques

dangereuses laissées par les batteries usagées représentent une menace cruciale pour l'environnement.

Le domaine de la nano énergie, tel que proposé pour la première fois par notre groupe, vise à fournir des solutions d'alimentation durables à petite échelle pour ces dispositifs. Ce concept de nano énergie est fondamentalement différent de la production d'énergie à grande échelle, de l'ordre du mégawatt (MW) ou du gigawatt (GW), comme celle requise pour un pays, une ville ou un avion (Figure 1(a)). [75]

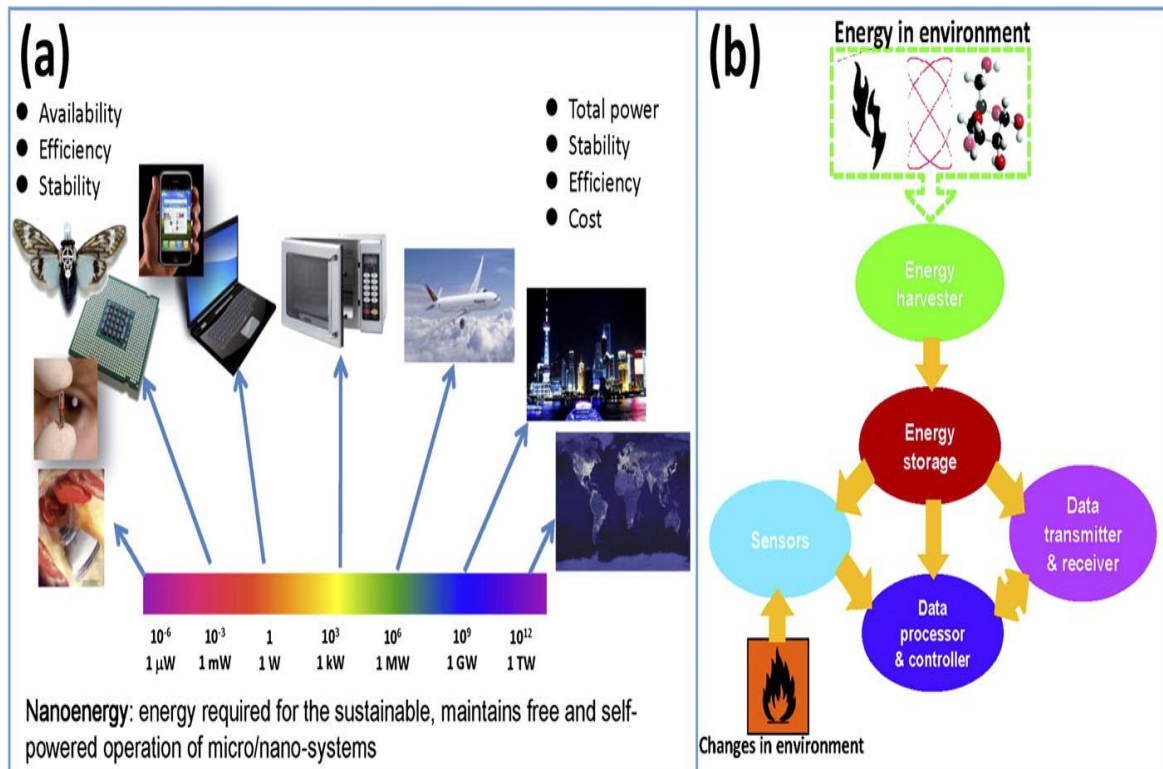


Figure 2.10 (a) Les niveaux de puissance et leurs applications correspondantes
(b) Le processus de conversion de l'énergie, y compris la récolte d'énergie par des nanogénérateurs. [75]

Les méthodes traditionnelles de production d'énergie reposent sur des générateurs électromagnétiques (EMG) qui s'appuient sur la loi de l'induction électromagnétique formulée par Faraday en 1831. Toutefois, cette technologie de génération d'énergie n'est efficace que pour la collecte d'énergies mécaniques à haute fréquence. Une plus grande variété de sources d'énergie présentes dans l'environnement, telles que les énergies mécaniques à basse fréquence y compris les vagues et les mouvements du corps humain ainsi que d'autres formes d'énergie comme l'énergie thermique et l'énergie chimique, ne peuvent pas être efficacement exploitées par les EMG. Pour convertir ces différentes formes d'énergie à petite échelle en électricité de manière efficace, nous avons conçu le premier nano générateur (NG) en 2006 et, au cours de la dernière décennie, nous avons développé divers types de NG basés sur des effets piézoélectriques, triboélectriques, pyroélectriques, thermoélectriques, ainsi que sur les flux ioniques, etc. De plus, un système auto-

alimenté peut être mis en place en associant les NG à des unités de stockage d'énergie telles que des batteries et des super condensateurs, afin d'alimenter des dispositifs fonctionnels. Ainsi, dans ce système, l'énergie récoltée par les NG peut être temporairement stockée dans des unités de stockage, puis utilisée pour des applications telles que la détection environnementale, la transmission de données, le traitement des données et le contrôle (voir Figure 1(b)).[75]

2.5.4 Modes de fonctionnement des TENGs

Un élément essentiel dans la conception d'un TENG est l'utilisation adéquate de la Triboélectrification. Pour garantir une triboélectrification appropriée à une configuration particulière

de TENG, il est impératif de mettre en place un mode de fonctionnement adéquat, afin d'assurer une Exploitation efficace de la source d'énergie mécanique externe issue de l'environnement.

Il y a quatre modes de fonctionnement qui incluent :

le mode de contact-séparation (ou contact vertical), le mode de glissement linéaire, et le mode autoportant.

Le mode de contact vertical s'appuie sur le processus de séparation qui suit le contact entre deux matériaux triboélectriques distincts [76]

2.5.4.1 Mode de séparation de contact verticale

Des matériaux triboélectriques, comme le suggère leur appellation. Lors de leur premier contact, les deux couches demeurent séparées et électriquement neutres ; cependant, en raison de leur jonction,

l'ensemble du système reste neutre, même si les électrons, étant plus positifs sur l'échelle triboélectrique, tendent à migrer vers le matériau plus négatif.

Lorsque les deux parties du dispositif sont à nouveau séparées, elles affichent une charge de surface égale et opposée. Des charges équivalentes et opposées se forment alors sur l'électrode correspondante pour maintenir l'équilibre électrique, ce qui engendre une différence de potentiel entre les électrodes.

Ce même mécanisme peut également se produire entre le diélectrique et l'électrode, comme observé dans la configuration analysée dans le cadre de ce projet de thèse. La différence de potentiel maximale est atteinte [76].

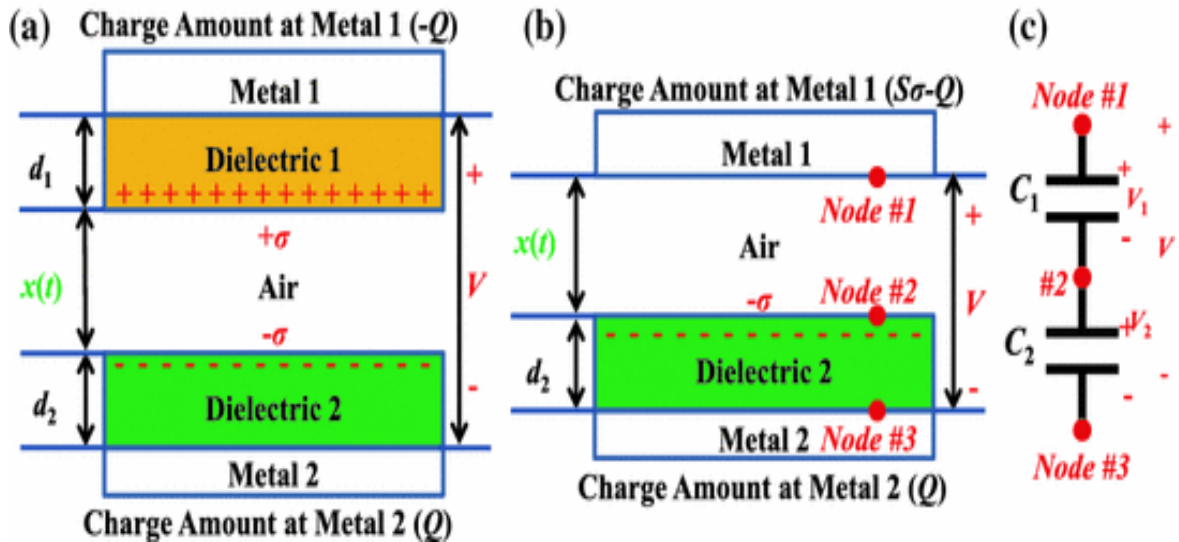


Figure 2.11 Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique-diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (Société Royale de Chimie [77])

2.5.4.2 Mode coulissant latéral

Dans le mode de glissement linéaire, un glissement relatif parallèle entre les deux composants produit des charges à la surface. Il est important de souligner que ce glissement peut également se présenter sous la forme d'une rotation cylindrique ou de disque, en plus d'un mouvement planaire. [78]

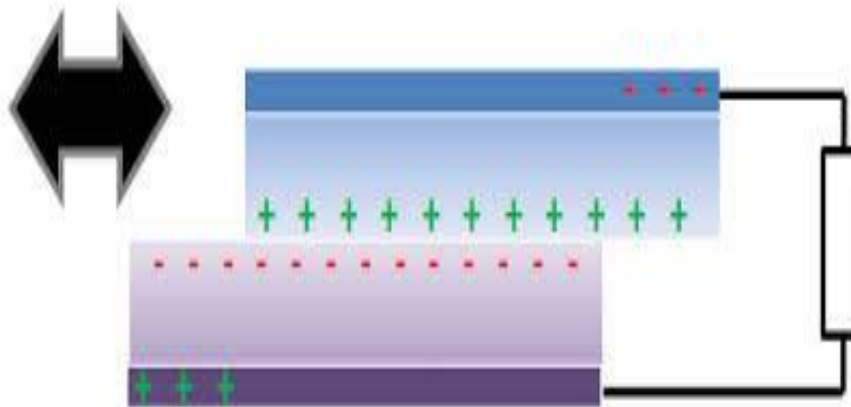


Figure 2.12 Le mode coulissant dans le plan TENG. [78]

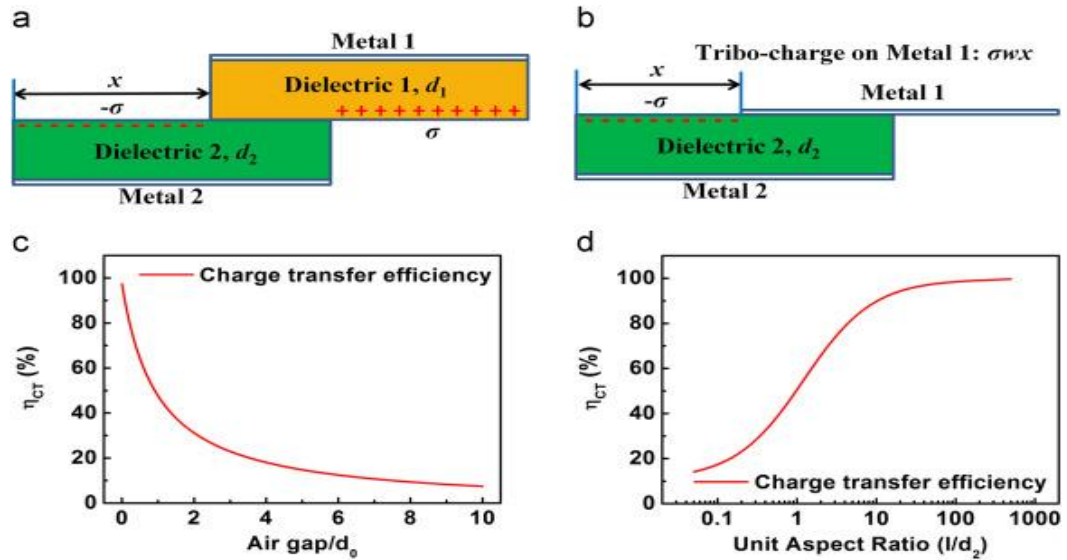


Figure 2.13 Modèles théoriques pour (a) le mode glissant TENG à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique et (b) le mode coulissant à plaque parallèle électrode attachée conducteur à diélectrique TENG. (C and d) Influence de (c) taille de l'entrefer et (d) aspect diélectrique rapport sur l'efficacité de transfert de charge du mode conducteur-diélectrique à glissement TENG lorsqu'une séparation complète a été atteinte. La constante diélectrique est de 2 dans ce calcul. [78]

2.5.4.3 Mode à électrode unique

Dans les deux situations antérieures, les deux matériaux diélectriques étaient branchés à une électrode, alors que dans le mode à électrode unique, un seul des deux diélectriques est connecté à une électrode, l'autre demeurant libre. [78]

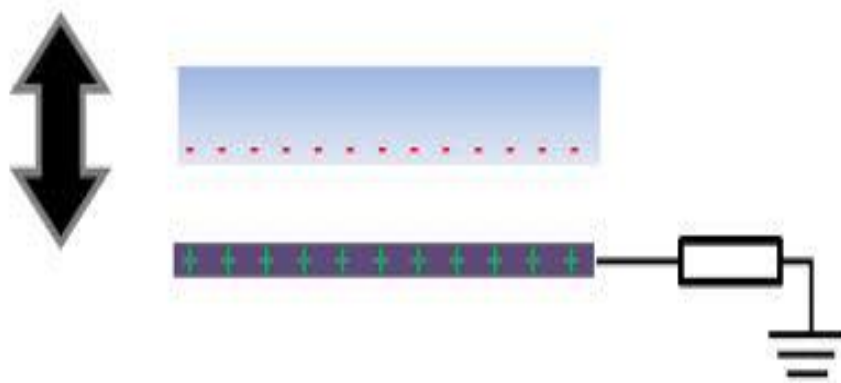


Figure 2.14 Mode TENG à électrode unique [78]

2.5.4.4 Mode triboélectrique autonome

Le mode autoportant emploie une unique feuille de matériau triboélectrique, mobile et libre, pour charger deux éléments distincts en matériau triboélectrique, chacun étant relié à une électrode. En raison de la proximité de ces composants finaux et de la tendance des charges de même signe à se repousser, chaque élément développe une distribution de charge asymétrique lors de sa polarisation.

Chacune de ces configurations peut produire des résultats très variés, et l'une d'elles peut être plus appropriée pour certaines applications que les autres.[76]

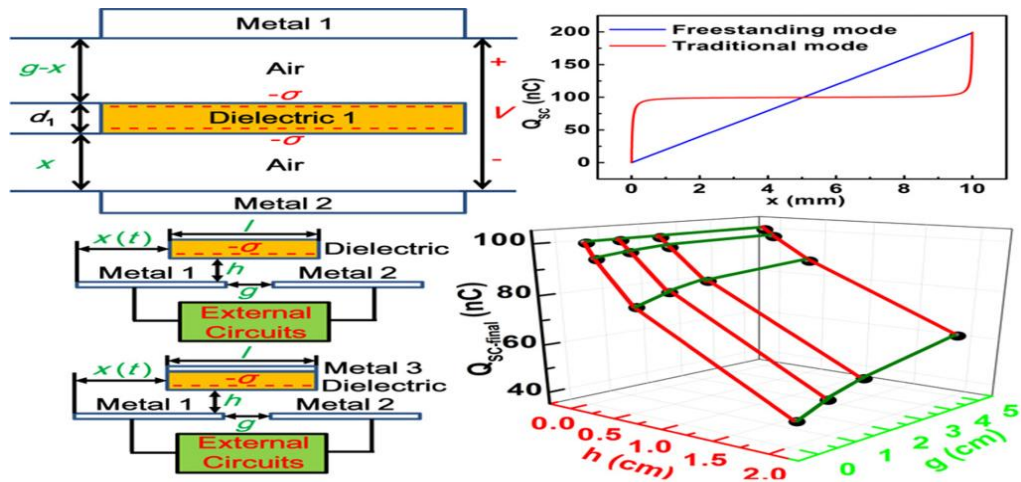


Figure 2.15 Comparaison des performances entre le mode libre et le mode traditionnel d'un nano générateur triboélectrique en fonction du déplacement (x) et de la distance (g, h). [79]

2.5.5 Matériaux et séries triboélectriques

La triboélectricité est généralement perçue comme étant le résultat du transfert d'électrons d'une substance à une autre lors du contact entre deux matériaux.

Une série bien connue, représentée dans la Figure 39, désignée sous le nom de série triboélectrique, a été largement reconnue comme référence.

Ainsi, il semble que les deux objets soient chargés, l'un jouant le rôle d'anode et l'autre de cathode. Les différentes électronégativités, découlant des variations dans les structures moléculaires et/ou matérielles, sont considérées comme la principale cause du chargement triboélectrique.

Cette charge doit demeurer stable à la surface, car les matériaux triboélectriques possèdent une conductivité limitée, ou sont souvent des isolants.

En raison de cette disparité, un côté libère des électrons tandis que l'autre les absorbe.

Si cet état perdure, des charges triboélectriques se forment à la surface.

Par conséquent, il est envisageable d'établir une liste de matériaux ayant tendance à agir comme cathode (+) ou anode (-), comme le montre la Figure 39.

Cette énergie mécanique, qui génère des charges électrostatiques, peut ensuite être transformée en énergie électrique à l'aide d'un générateur. [76]

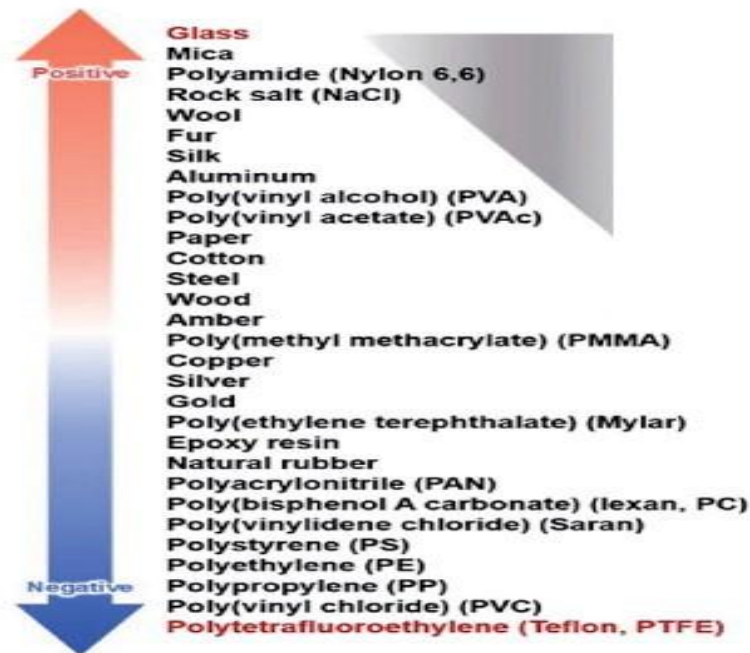


Figure 2.16 La série triboélectrique de certains matériaux. [76]

2.5.6 Système de récupération d'énergie hybride (PV - TENG)

Les énergies mécaniques omniprésentes, telles que l'énergie solaire et les énergies thermiques, constituent également des sources d'énergie propres et abondantes présentes dans la nature, susceptibles d'être exploitées. L'énergie solaire a été largement récupérée grâce aux panneaux photovoltaïques (PV) ces dernières années. Cependant, les performances des PV sont considérablement influencées par les conditions météorologiques, notamment lors des jours pluvieux ou nuageux où l'ensoleillement est absent. Une approche viable pour remédier à ce problème consiste à hybrider les PV avec d'autres dispositifs de récupération d'énergie afin d'assurer une production d'énergie dans des conditions climatiques variées. Les générateurs triboélectriques (TENG) ont prouvé leur efficacité en tant que récupérateurs d'énergie fiables, notamment pour la récupération d'énergie à partir des gouttes de pluie, en s'appuyant sur le mécanisme de triboélectrisation aux interfaces liquide/solide. Par conséquent, les TENG peuvent être intégrés de manière complémentaire aux systèmes photovoltaïques (SC) pour optimiser la production d'énergie solaire durant les jours de pluie. Bien que plusieurs études aient démontré avec succès la faisabilité d'une telle hybridation, la transparence insuffisante des couches supérieures des TENG et le coût élevé des processus antireflet limitent leur application pour une récolte d'énergie efficace et à grande échelle. Pour surmonter ce défi, Wang et al. ont proposé une cellule hybride composée d'un PV en silicone et d'un TENG, intégrant un conducteur ionique hautement transparent à l'aide d'un film composite à points de carbone, comme illustré dans la Figure 40 [80]

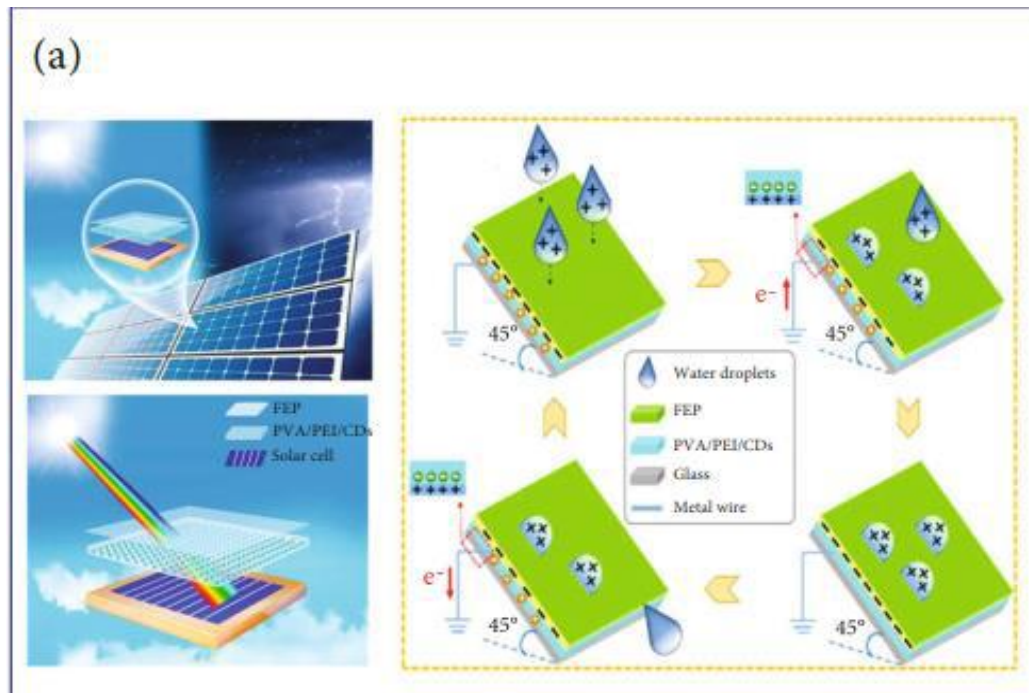


Figure 2.17 Un triboélectrique-photovoltaïque. [80]

2.6 Conclusion

À travers ce chapitre, nous pouvons conclure que les énergies renouvelables représentent une alternative durable pour satisfaire les besoins énergétiques croissants. Toutefois, s'appuyer sur une seule source, qu'il s'agisse de l'énergie solaire, éolienne ou d'une autre, ne garantit pas un approvisionnement énergétique continu et efficace, surtout face aux variations climatiques et saisonnières. C'est pourquoi l'orientation vers des systèmes hybrides apparaît comme un choix incontournable, car elle permet de combiner plusieurs sources d'énergie afin d'assurer une meilleure complémentarité et d'augmenter le rendement global. La combinaison de sources multiples renforce la stabilité du système et diminue les périodes de coupure, offrant ainsi une solution efficace pour un approvisionnement énergétique constant et fiable.

CHAPITRE : 03

Modélisation et simulation d'un système PV-TENG

3.1 Introduction

En fonction de l'objectif visé, nous avons choisi de créer un nouveau système qui intègre deux sources et les utilise simultanément : l'électricité triboélectrique et l'énergie lumineuse. Ces deux sources sont aisément accessibles et mobilisables. Il s'agit d'un système multi-sources fondé sur les énergies renouvelables.

Les recherches menées par l'Agence Spatiale Allemande (ASA), suite à une évaluation par satellites, ont révélé que l'Algérie détient le plus grand potentiel d'énergie solaire de l'ensemble du bassin méditerranéen, avec un potentiel atteignant 13,9 TWh/an pour l'énergie solaire photovoltaïque. Cette production d'énergie équivaut à celle de dix grands gisements de gaz naturel découverts à Hassi R'mel. [80]

En ce qui concerne l'électricité triboélectrique (ou électrostatique), elle repose sur le contact entre deux matériaux de nature différente. Le transfert d'une partie des électrons de la surface de l'un vers l'autre entraîne une charge positive sur l'un et une charge négative sur l'autre, et ce transfert persiste même après leur séparation. Ce phénomène constitue une base pour le développement de dispositifs modernes capables de convertir l'énergie mécanique résultant des mouvements ou des vibrations en énergie électrique.

Le travail de ce chapitre s'inscrit dans cette optique, à savoir une étude visant à combiner deux facteurs fondamentaux au sein d'un même système.

3.2 Modélisation mathématique et électrique d'une cellule photovoltaïque

Nous allons aborder l'étude du modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque, basé sur le modèle à une diode (one-diode model).

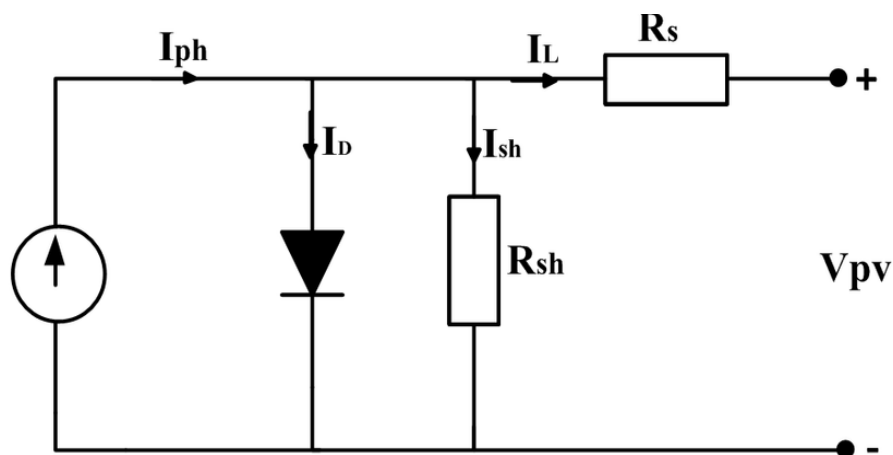


Figure 3.1 - Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

La cellule que nous avons choisie pour la simulation se trouve dans le module photovoltaïque SY-M80W. L'unité se compose de 36 cellules reliées en séquence, nous allons donc trouver les valeurs spécifiques à la cellule comme suit dans le tableau

Tableau 3.1 : Les principales caractéristiques de l'unité

Les caractéristiques	Panneaux	Cellule
Température	25 °C	25 °C
Tension de circuit ouvert	22 V	0.611
Courant de court-circuit	4.85 A	4.85 A
Tension puissance maximale	17.4 V	0.483 V
Courant de puissance maximale	4.61 A	4.61 A
Puissance maximale	78.12 W	2.17 W

I_{ph} : Courant photo-généré par l'irradiation solaire

I_d : Courant de diode

I_{sh} : Courant de fuite à travers la résistance de shunt

I_l ou I_{pv} : Courant de sortie de la cellule PV

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance de shunt

V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule PV

3.2.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) C'est

Courant auquel la tension aux bornes d'une cellule photovoltaïque ou d'un générateur est nulle. Dans le cas idéal ($R_{ser} = 0,01$, qui est très petit, et R_{shu} est infini), ce courant se fond avec le photo courant I_{ph}

Sinon, en annulant la tension V dans l'équation (1.4), on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{CC} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{R_{ser} * I_{CC}}{R_{shu}} \quad (1)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$$I_{sat}[\exp(\frac{e(I_{pv} * R_{ser})}{nKT}) - 1] \quad (2)$$

Devant I_{ph} L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}} \quad (3)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (Pratiquement $I_{CC} = I_{ph}$)

$$V_t = \frac{K * T}{q} \quad (4)$$

Remarque :

K: Constante de Boltzmann = $1.381 * 10^{-23} J / K$

T : Température absolue (en kelvins, K)

q: Charge élémentaire de l'électron = $1,602 * 10^{-19} C$

3.3 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

A partir du circuit équivalent présenté par on peut déduire l'équation

$$I = I_{ph} - I_0[\exp(\frac{V + (I * R_s)}{n_s * V_t}) - 1] \quad (5)$$

$$P(V) = V I_{sc} - V I_0[\exp(\frac{V}{n_s * V_t})] \quad (6)$$

L'équation (6) représente la puissance générée par un système photovoltaïque.

$$\eta = \frac{V}{G * A} * 100\% \quad (7)$$

$G = 1000 W / m^2$: Irradiance solaire reçue

$A = 0,015625 m^2$: Surface de la cellule ou du module

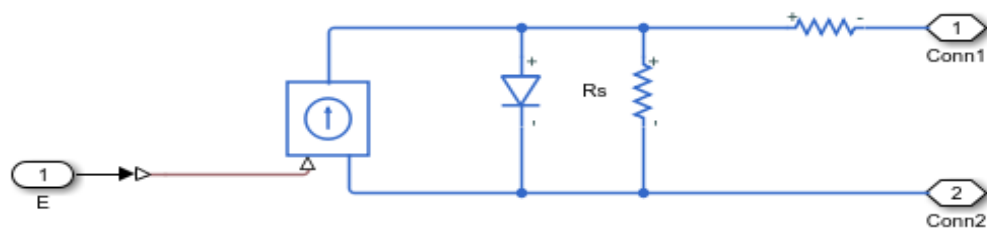


Figure 3.2 - simulation d'une cellule photovoltaïque schéma bloc SIMULINK

3.3.1 Simulation d'une cellule photovoltaïque

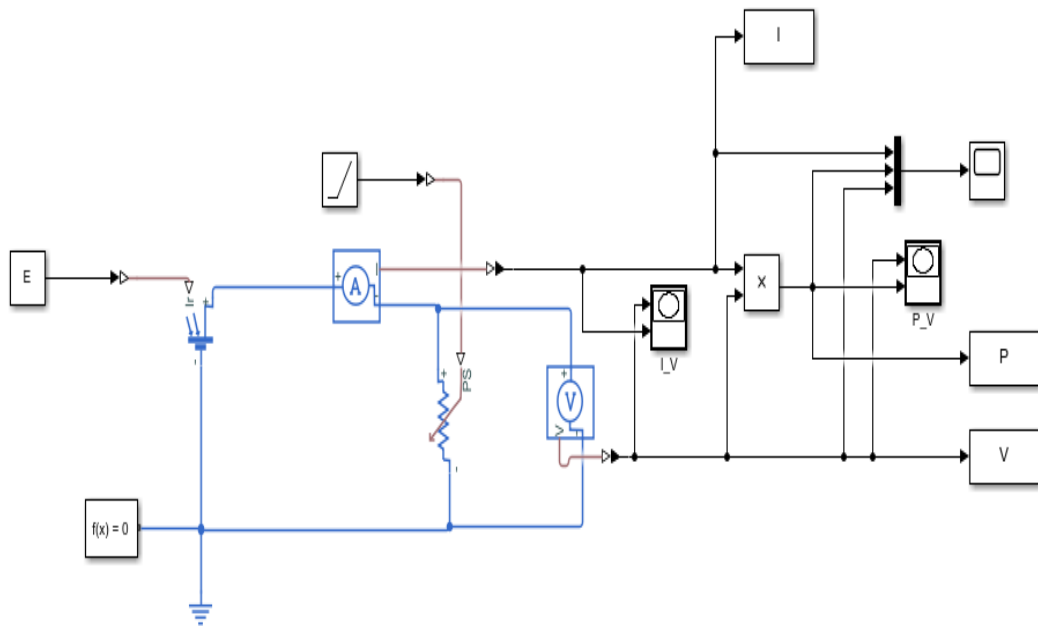


Figure 3.3 - schéma bloc sur Simulink MATLAB d'un circuit PV.

Dans cette étape, nous allons présenter les résultats de la simulation d'une cellule Photovoltaïque:

$I_{pv} = f(V)$:

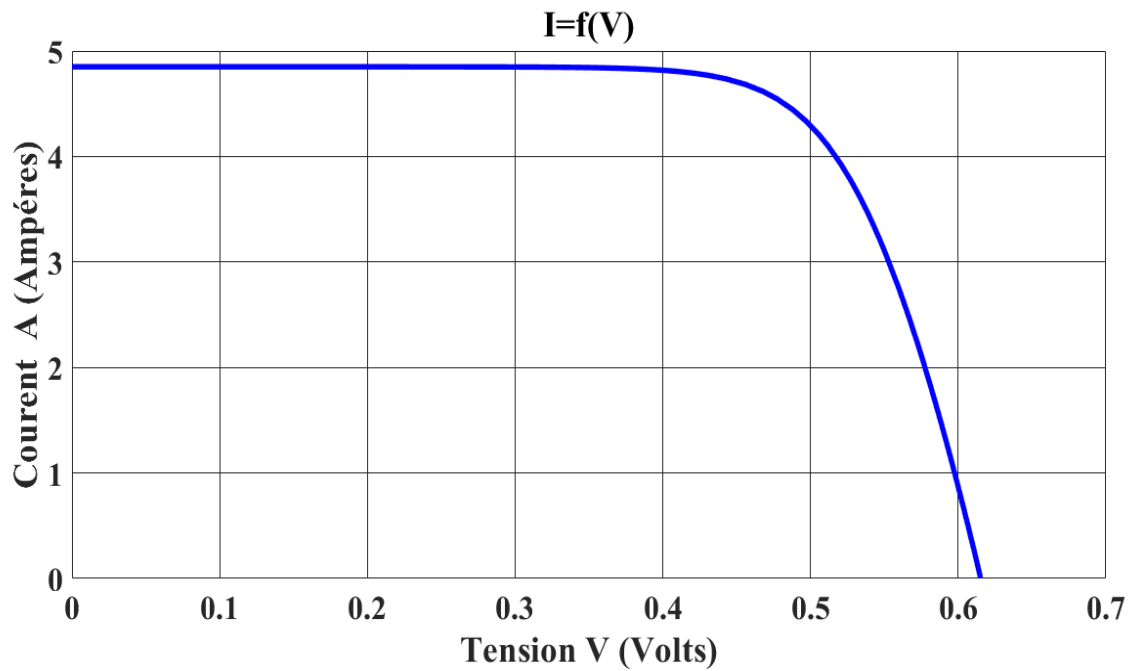


Figure 3.4: la caractéristique $I_{pv} = f(V)$

Le graphique illustre la relation courant-tension ($I-V$) d'un dispositif photovoltaïque, probablement une cellule solaire. On constate un comportement typique d'une cellule photovoltaïque en fonctionnement sous éclairage :

Régime de court-circuit ($V \approx 0 \text{ V}$) : Le courant atteint son maximum, environ 4.8 A, ce qui correspond au courant de court-circuit (I_{sc}). Dans cette zone, la tension est presque nulle, et le courant demeure constant, ce qui est caractéristique du fonctionnement en mode générateur de courant.

Régime linéaire aplati : Pour des tensions faibles allant jusqu'à environ 0.45–0.5 V, le courant reste pratiquement constant, ce qui indique que la cellule fonctionne encore dans une région où la photogénération prédomine sur les effets résistifs ou de recombinaison.

Zone de déclin rapide du courant : À partir d'une tension d'environ 0.5 V, le courant diminue fortement avec l'augmentation de la tension. Cela représente le point de puissance maximale (MPP) suivi de la tension de circuit ouvert (V_{oc}) lorsque le courant chute à zéro (ici autour de 0.62 V).

$P_{pv} = f(V)$:

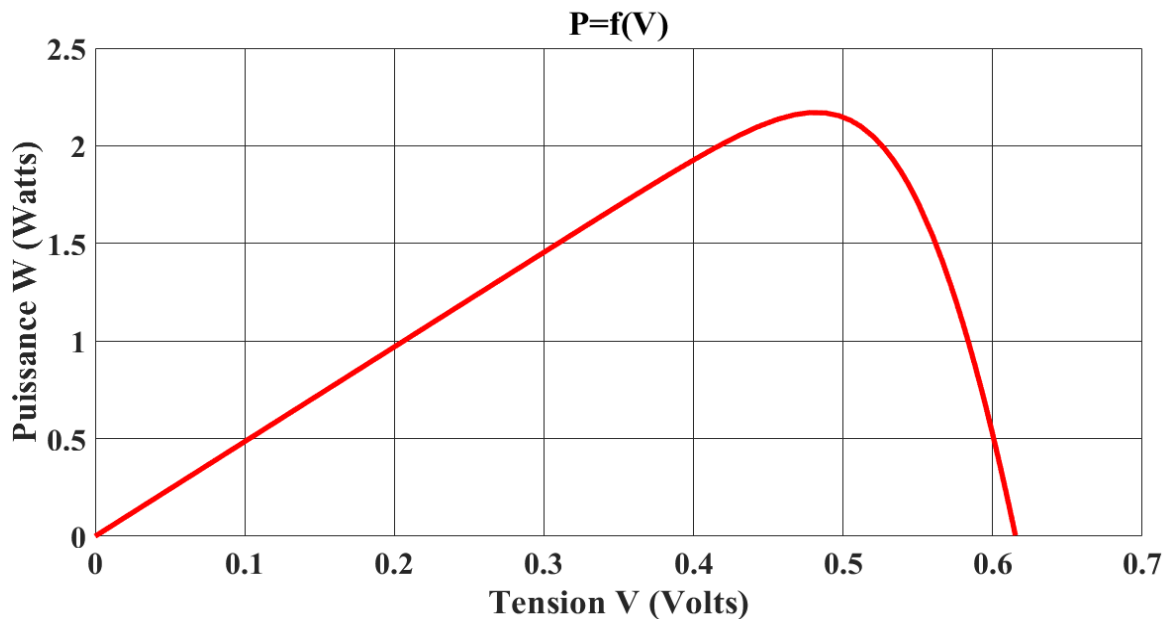


Figure 3.5 : la caractéristique $P_{pv} = f(V)$

Le graphique représente l'évolution de la puissance de sortie (P), mesurée en watts, en fonction de la tension (V) d'une cellule photovoltaïque. Ce type de courbe est essentiel pour l'analyse des performances énergétiques d'un générateur solaire.

Phase de croissance linéaire ($V < 0.45 \text{ V}$) : Au début, la puissance augmente presque de manière linéaire avec la tension, ce qui est attendu puisque la puissance est définie par le produit $P=I \times V$. Dans cette zone, le courant reste à peu près constant tandis que la tension augmente.

Point de puissance maximale (MPP) : Le sommet de la courbe, situé autour de $V \approx 0.49V$, représente le Maximum Power Point. C'est à ce point que le produit du courant et de la tension atteint son maximum. Il s'agit d'un paramètre crucial pour le dimensionnement et le contrôle des systèmes photovoltaïques, notamment pour les algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Déclin rapide ($V > 0.5 V$) : Après le MPP, la puissance diminue rapidement. Cette chute est causée par la réduction rapide du courant lorsque la tension se rapproche de la tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le système devient de moins en moins efficace au-delà de ce point.

3.4 Présentation du modèle mathématique et circuit électrique d'un générateur triboélectrique

Dans le cadre de cette étude, quatre modèles fondamentaux ont été examinés afin de mieux comprendre le fonctionnement des générateurs nano triboélectriques (TENGs) en mode contact-séparation :

Modèle de Niu : Ce premier modèle numérique repose sur l'hypothèse de plaques infinies chargées uniformément. Bien qu'utile pour poser les bases théoriques, il présente une limite majeure : la tension augmente indéfiniment avec la distance de séparation, ce qui n'est pas réaliste.

Modèle des bandes d'énergie (Energy Band Model) : Ce modèle s'appuie sur la théorie des bandes pour expliquer le transfert de charges entre matériaux lors du contact. Deux cas sont étudiés : métal-diélectrique et diélectrique-diélectrique. Les paramètres déterminants sont la différence des niveaux de Fermi, la densité d'états de surface, et la permittivité des matériaux.

Modèle dépendant de la charge (Load-Dependent Model) : Ce modèle introduit l'effet de la rugosité des surfaces et du contact réel entre les matériaux, dépendant de la force appliquée. En utilisant la théorie de Persson, il permet d'estimer la surface réelle de contact, influençant directement la densité de charge triboélectrique.

Modèle du champ électrique dépendant de la distance (DDEF) : Proposé pour corriger les limites du modèle de Niu, ce modèle prend en compte la taille finie des plaques et décrit l'évolution du champ électrique et du potentiel en fonction de la distance de séparation. Il prédit une saturation du voltage à grande distance .

La performance de sortie d'un TENG est en réalité influencée par de nombreux facteurs, tels que la rugosité de surface, les épaisseurs, la distance de séparation et les propriétés des matériaux de contact. La tension en circuit ouvert est générée par la différence de potentiel entre les électrodes lors de la séparation. En même temps, ces champs électriques intégrés entraînent la polarisation du matériau diélectrique et engendrent les charges induites sur les électrodes. En mode court-circuit, la charge est transférée d'une électrode à l'autre. Par conséquent, la distance de séparation entre les paires d'interfaces constitue l'un des paramètres les plus cruciaux. Différentes tensions en circuit

ouvert seront produites en fonction des distances de séparation. La formation du potentiel sur les électrodes est également liée à l'intensité du champ électrique interne des TENGs. Cela dépend à la fois de la densité de charge triboélectrique σT et de la permittivité ε comme

$$E = \frac{\sigma t}{2\varepsilon} \quad (8)$$

Où : E représente le champ électrique qui est perpendiculaire à la surface chargée, σT est la densité de charge triboélectrique, et ε désigne la permittivité du milieu. Toutefois, ce modèle de champ électrique est plus adapté à un condensateur conventionnel qu'à un CS-TENG, car le modèle classique de condensateur à plaques parallèles repose sur l'hypothèse de surfaces chargées infiniment grandes. En conséquence, ce modèle ne parvient pas à expliquer de manière exhaustive la polarisation des diélectriques ni l'induction de charges libres sur les électrodes d'un TENG. C'est pour cette raison que le modèle du champ électrique dépendant de la distance (DDEF) a été introduit pour enrichir l'explication des variations du champ électrique entre des plaques de taille finie portant des charges opposées, en tenant compte de leur mouvement de séparation après contact.

$$Ez = \frac{\sigma t}{\pi\varepsilon} f(Z) \quad (9)$$

$$f(x) = \arctan\left(\frac{\frac{l}{w}}{\frac{2z}{w} \sqrt{4\left(\frac{z}{w}\right)^2 + \left(\frac{l}{w}\right)^2 + 1}}\right) \quad (10)$$

Où L et W sont respectivement la longueur et la largeur de la surface de contact, et z est la distance entre le point considéré et la surface de contact. Étant donné que les charges triboélectriques équivalentes et opposées sont situées de part et d'autre des surfaces de contact, l'intensité totale du champ électrique superposé sur une électrode d'un côté peut être exprimée comme suit :

$$E_{total} = \frac{\sigma t}{\pi\varepsilon_0} (f(x) - f(x+z)) \quad (11)$$

Où x représente la distance qui sépare la surface du matériau de celle de l'électrode (c'est-à-dire l'épaisseur de la couche triboélectrique). Le potentiel électrique peut être exprimé par la relation qui existe entre la distance et le champ électrique total superposé à travers l'électrode comme suit :

$$Q1 = \frac{\sigma t}{\pi\varepsilon_1} \left(\int_{x1}^{x1+z} f(x) dx \right) \quad (12)$$

$$Q2 = -\frac{\sigma t}{\pi\varepsilon_2} \left(\int_{x2}^{x2+z} f(x) dx \right) \quad (13)$$

Où $\varphi_{1,2}$ représentent les potentiels des deux électrodes, $x_{1,2}$ désignent les épaisseurs des couches triboélectriques, tandis que $\varepsilon_{1,2}$ correspondent aux permittivités des matériaux diélectriques. Étant donné l'absence de charges libres induites sur les électrodes, le potentiel électrique des électrodes

peut faire abstraction de l'influence de ces charges libres induites. La tension en circuit ouvert (V_{oc}) peut être déterminée comme suit :

$$V_{oc} = Q_1 - Q_2 \quad (14)$$

De surcroît, si l'appareil est jugé en état de court-circuit, les charges libres générées sur les électrodes influenceront le potentiel de celles-ci. Par conséquent, le potentiel des électrodes peut-être formulé de la manière suivante :

$$Q_1 = \frac{-\sigma U}{\pi \varepsilon_1} \left(\int_0^{x_1+x_2+z} f(x) dx \right) + \frac{\sigma t}{\pi \varepsilon_1} \left(\int_{x_1}^{x_1+z} f(x) dx \right) \quad (15)$$

$$Q_2 = \frac{-\sigma U}{\pi \varepsilon_2} \left(\int_0^{x_1+x_2+z} f(x) dx \right) + \frac{\sigma t}{\pi \varepsilon_2} \left(\int_{x_2}^{x_2+z} f(x) dx \right) \quad (16)$$

Où σi est la densité des charges libres générées sur les électrodes. En raison de la condition de court-circuit, $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$. Par conséquent, la densité des charges libres générées peut être déterminée de la manière suivante :

$$\sigma U = \frac{\sigma t \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \int_{x_1}^{x_1+z} f(x) dx + \frac{1}{\varepsilon_2} \int_{x_2}^{x_2+z} f(x) dx \right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} \right) \int_0^{x_1+x_2+z} f(x) dx} \quad (17)$$

Le courant de court-circuit (I_{sc}) peut être déterminé de la manière suivante :

$$I_{sc} = A \frac{d\sigma U}{dt} \quad (18)$$

Où A représente la surface de l'appareil. La distance de séparation (z) obéit à une fonction sinusoïdale pour le fonctionnement de l'appareil, qui est définie comme :

$$z = H \sin(2\pi ft + \frac{3\pi}{2}) + H \quad (19)$$

Un CS-TENG diélectrique-diélectrique, utilisant le PDMS et le PET comme paire d'interface, a été choisi pour la simulation numérique. Les films de PDMS et de PET avaient des épaisseurs respectives de 20 μm et 200 μm , et une autre feuille de PET de 100 μm a été employée comme substrat sous le film de PDMS. De plus, la permittivité relative du PDMS et du PET était respectivement de 2,72 et 3,3. Il est à noter que la permittivité relative de la couche tribo supérieure peut être calculée comme 3,24 selon le modèle du condensateur parallèle. La densité de charge tribo utilisée était de 40,7 $\mu C/m^2$ selon :

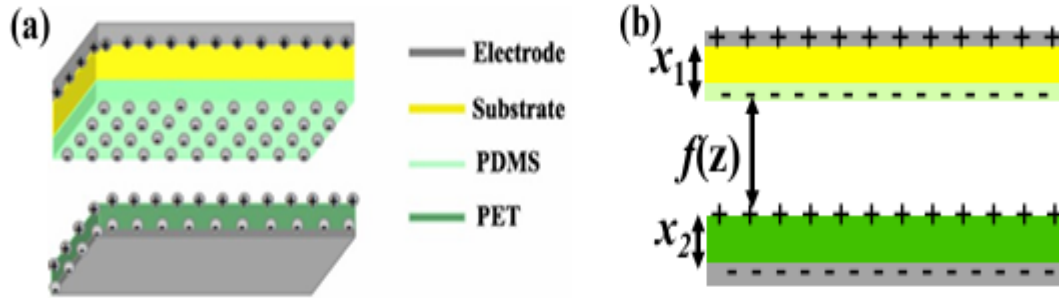


Figure 3.6 - Schéma du CS-TENG employé pour l'analyse numérique en (a) format 2D (b) format 3D

1. La tension en circuit ouvert en fonction de z

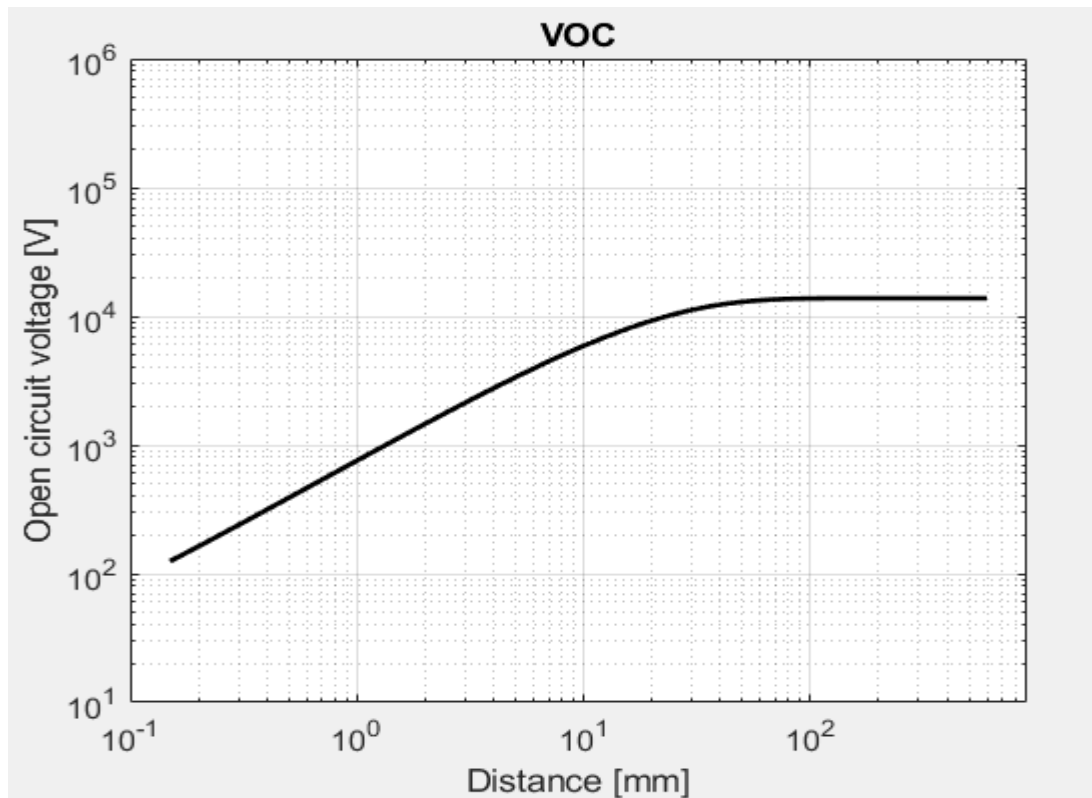


Figure 3.7- Analyse du graphique de la tension en circuit ouvert (VOC) en fonction de la distance de séparation

La figure ci-dessus illustre l'évolution de la tension en circuit ouvert (VOC) d'un générateur triboélectrique (TENG) en fonction de la distance de séparation entre les deux électrodes, représentée sur une échelle logarithmique.

On observe une augmentation rapide de la tension lorsque la distance augmente dans la plage de 0,1 mm à environ 10 mm. Cette croissance suit une tendance quasi-exponentielle dans la première phase, traduisant l'accumulation efficace de charges triboélectriques à mesure que les plaques s'éloignent.

Cependant, à partir d'une certaine distance critique (autour de 10 mm), la tension atteint un plateau, indiquant un phénomène de saturation. Ce comportement est cohérent avec les prédictions du modèle DDEF (Distance-Dépendent Electric Field), qui considère la taille finie des électrodes et la décroissance du champ électrique avec la distance.

Ce résultat met en évidence une limite physique intrinsèque à la performance des TENGs : au-delà d'une certaine distance, l'augmentation de la séparation ne contribue plus significativement à la génération de potentiel, probablement en raison de la diminution du couplage électrostatique

2. Densité La charge en fonction du temps

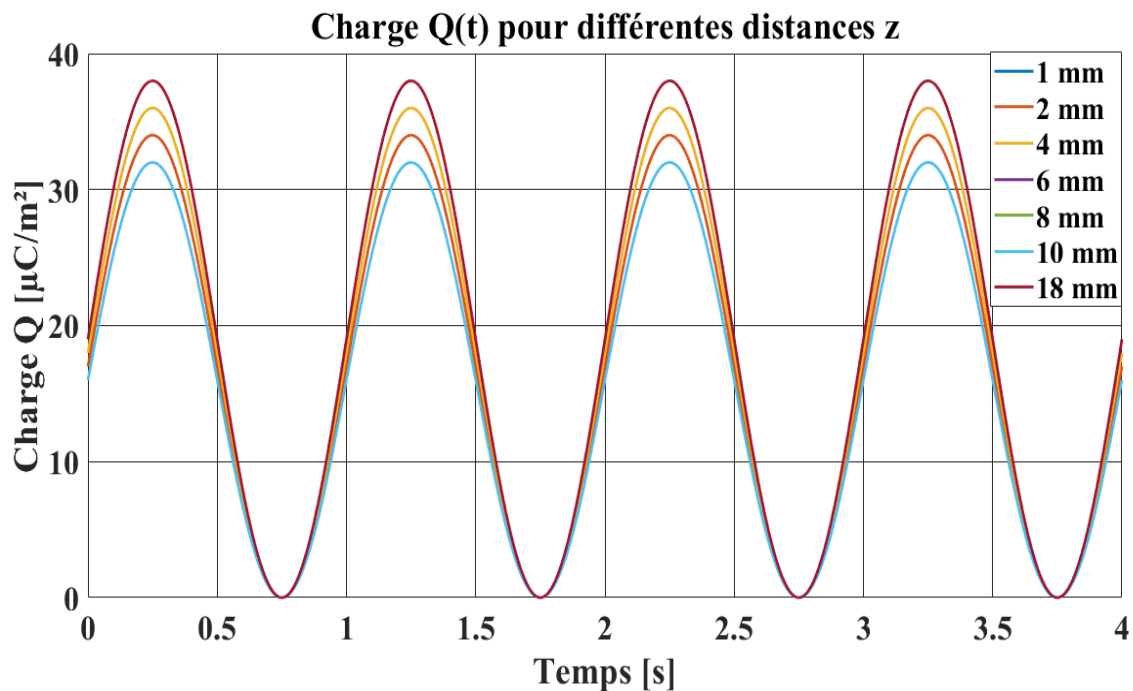


Figure 3.8 - densité de charge de sortie

La courbe montre l'évolution de la densité de charge de surface en fonction du temps pour différentes distances. Toutes les courbes présentent un comportement périodique régulier, indiquant une réponse stable du système dans le temps.

Avec l'augmentation de la distance, les valeurs maximales de la densité de charge augmentent, ce qui suggère une accumulation plus importante de charge aux distances plus grandes.

Ce comportement reflète l'effet de la distance sur le stockage de la charge, et il est essentiel pour comprendre les systèmes électriques ou biomédicaux basés sur une stimulation ou un chargement périodique.

3. Densité de courant en court-circuit

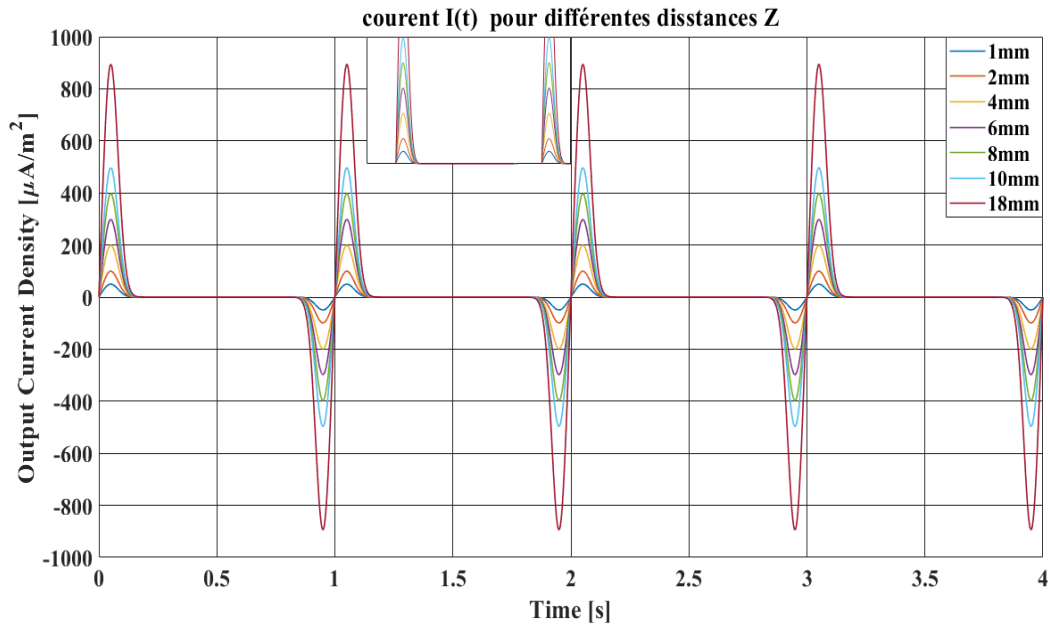


Figure 3.9 - densité de courant en court-circuit

La courbe montre une réponse périodique de la densité de courant de sortie en fonction du temps pour différentes distances (1 mm à 18 mm). On observe que l'amplitude du courant diminue à mesure que la distance augmente, ce qui indique une efficacité de transfert électrique plus faible avec des distances plus grandes. La forme du signal reste symétrique et constante, ce qui reflète une stabilité du système malgré la variation d'intensité. Ce comportement est essentiel à considérer dans les applications biomédicales ou électrotechniques nécessitant un contrôle précis du courant en fonction de la géométrie du système.

3.4.1 Circuit équivalent d'un générateur triboélectrique :

D'abord, nous avons : Point de transition vers la saturation à une distance de $Z=18$ mm alors la tension maximale $V_{max}=8729V$.

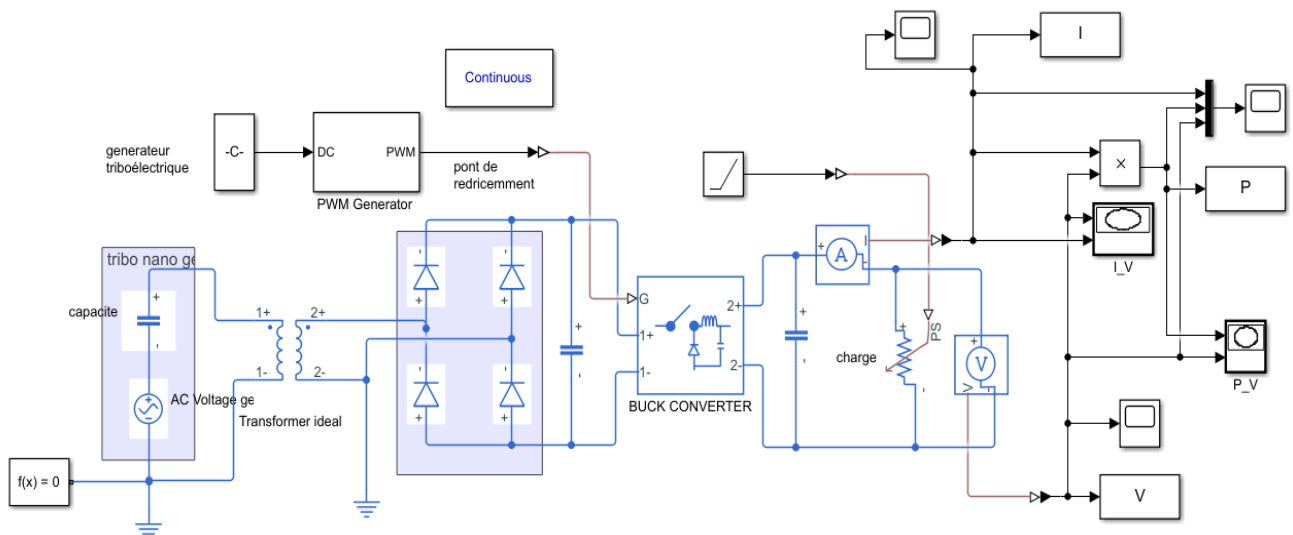


Figure 3.10 - Chaîne de Conversion TENG (AC) sous MATLAB/Simulink.

L'équation ci-dessous fournit une estimation analytique de la capacité électrique C entre deux plaques parallèles, qui sont séparées par un milieu diélectrique dans un nano générateur triboélectrique.

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (21)$$

Le rapport cyclique, noté d , est la fraction de la période de commutation pendant laquelle l'interrupteur (tel qu'un transistor) est en conduction (état ON).

$$V_{out} = d * V_{in} \quad (22)$$

$$V_d = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (22.1)$$

Le coefficient de transformation k

$$K = \frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2} = \frac{I2}{I1} \quad (23)$$

3.4.2 Présentation et Analyse des Résultats de la Simulation du Système Triboélectrique

Le circuit modélise une chaîne de conversion pour une source triboélectrique simplifiée. Il se compose de :

- **Source triboélectrique (AC + condensateur)** : simule le signal de sortie d'un TENG.
- **Transformateur idéal** : utilisé ici pour réduire la tension avant le redressement.
- **Redresseur (4 diodes)** : transforme l'AC en DC.
- **Convertisseur Buck** : abaisse et régule la tension à l'aide d'un MOSFET, d'une diode, d'une inductance et d'un condensateur.
- **Contrôle PWM** : produit des signaux de commande en fonction de la tension de sortie.
- **Charge résistive** : consomme l'énergie générée.

À cette étape, nous allons présenter les résultats de la simulation d'un générateur triboélectrique (TENG).

1. La courbe du courant en fonction de la tension $I_{\text{teng}} = f(V)$:

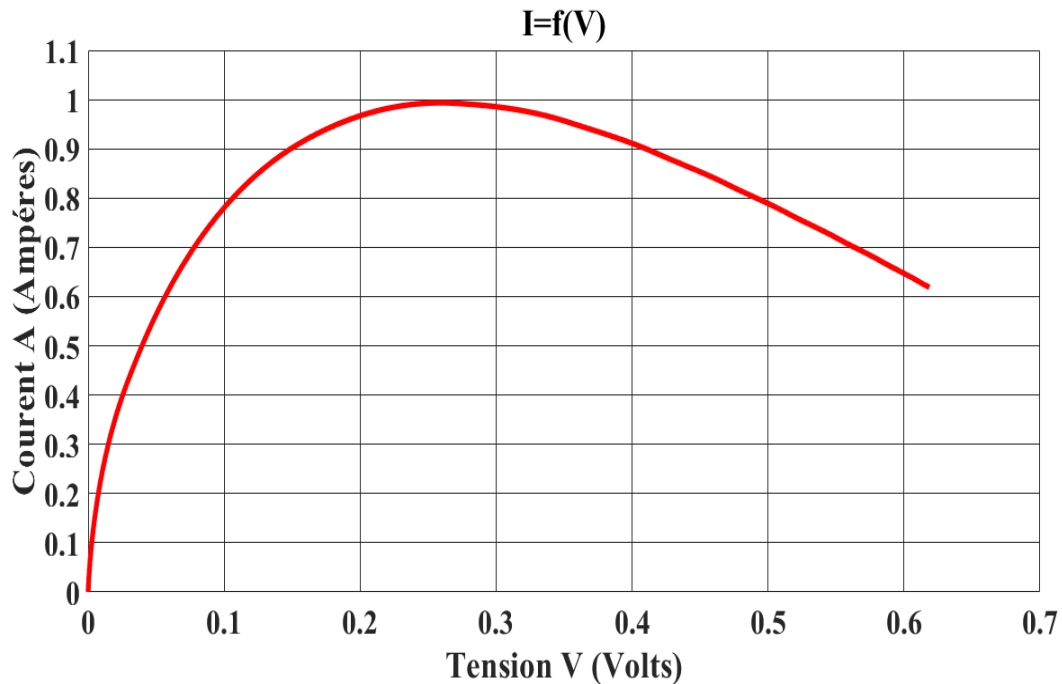


Figure 3.11 : la caractéristique $I_{\text{teng}}=f(V)$

La courbe illustre la relation entre le courant I (en ampères) et la tension V (en volts) d'un générateur triboélectrique opérant en mode contact-séparation. On constate que cette relation n'est pas linéaire, mais adopte une forme non linéaire avec un pic clairement défini, ce qui reflète la complexité du comportement du système électromécanique.

Description de la courbe :

Au début ($V \approx 0 - 0.2 \text{ V}$) : Le courant croît rapidement avec la tension. Cette zone indique une efficacité de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique très satisfaisante. Cela peut être attribué à une séparation rapide des surfaces, entraînant une charge élevée en un temps réduit.

Au point optimal ($V \approx 0.25 \text{ V}$) : Le courant atteint sa valeur maximale ($I_{\text{max}} \approx 1 \text{ A}$). Ce point représente la condition idéale d'adaptation d'impédance, où la puissance générée par le TENG est à son maximum.

Au-delà de ce point ($V > 0.25 \text{ V}$) : Le courant diminue progressivement malgré l'augmentation de la tension. Ce comportement peut signaler une perte d'efficacité, résultant d'une charge inadaptée ou d'un effet de contre-force électrostatique. Il indique également que le générateur requiert une charge précisément définie pour un fonctionnement optimal.

2. La courbe du puissance en fonction de la tension $P_{\text{teng}} = f(V)$

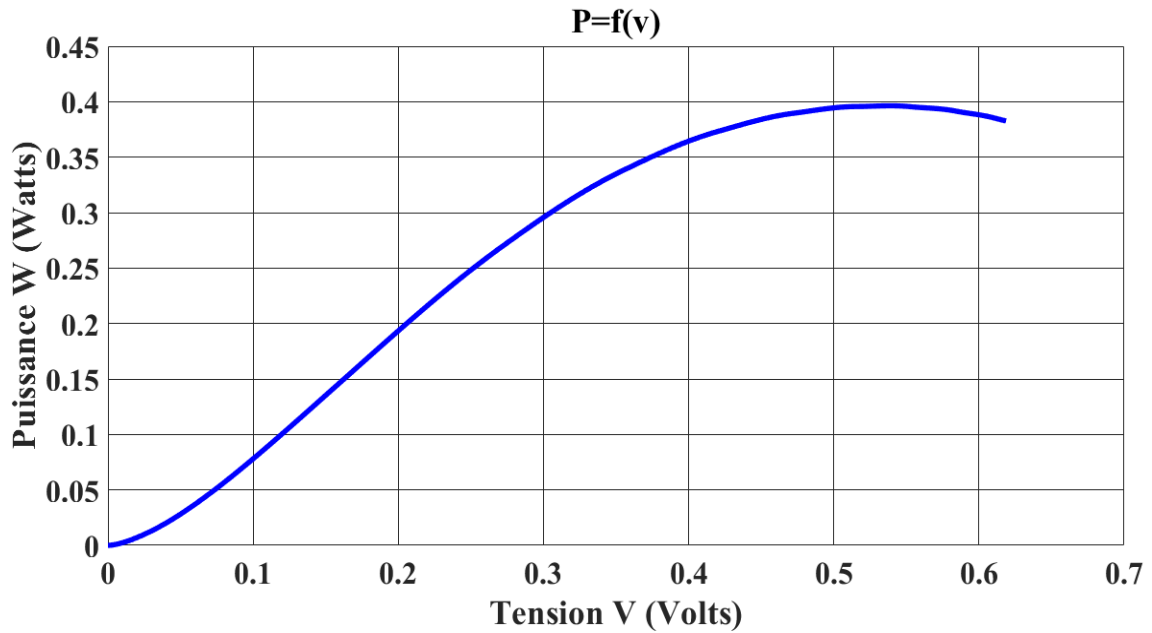


Figure 3.12 - la caractéristique $P_{\text{teng}} = f(V)$

La courbe présentée ci-dessus illustre l'évolution de la puissance électrique P (en watts) en fonction de la tension V (en volts) pour un générateur triboélectrique opérant en mode contact-séparation. Cette relation est non linéaire, ce qui reflète le comportement dynamique du processus de conversion d'énergie dans ce type de générateur.

Description de la courbe

Au début ($V \approx 0 - 0.25$ V) : La puissance croît avec la tension. Cela indique que le générateur commence à convertir l'énergie mécanique en énergie électrique de manière plus efficace à mesure que la tension augmente.

Au point de crête ($V \approx 0.3 - 0.35$ V) : La puissance atteint sa valeur maximale (P_{max}), correspondant à la condition optimale de charge. Il s'agit de la tension idéale de fonctionnement pour maximiser l'extraction d'énergie.

Au-delà de ce point ($V > 0.35$ V) : La puissance diminue malgré l'augmentation continue de la tension. Ce phénomène s'explique par la réduction du courant généré à des tensions plus élevées (comme observé sur la courbe $I(V)$). Poursuivre l'augmentation de la tension au-delà de ce point réduit donc le rendement global.

3.5 Simulation d'un système hybride PV + TENG

3.5.1 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque +générateur triboélectrique

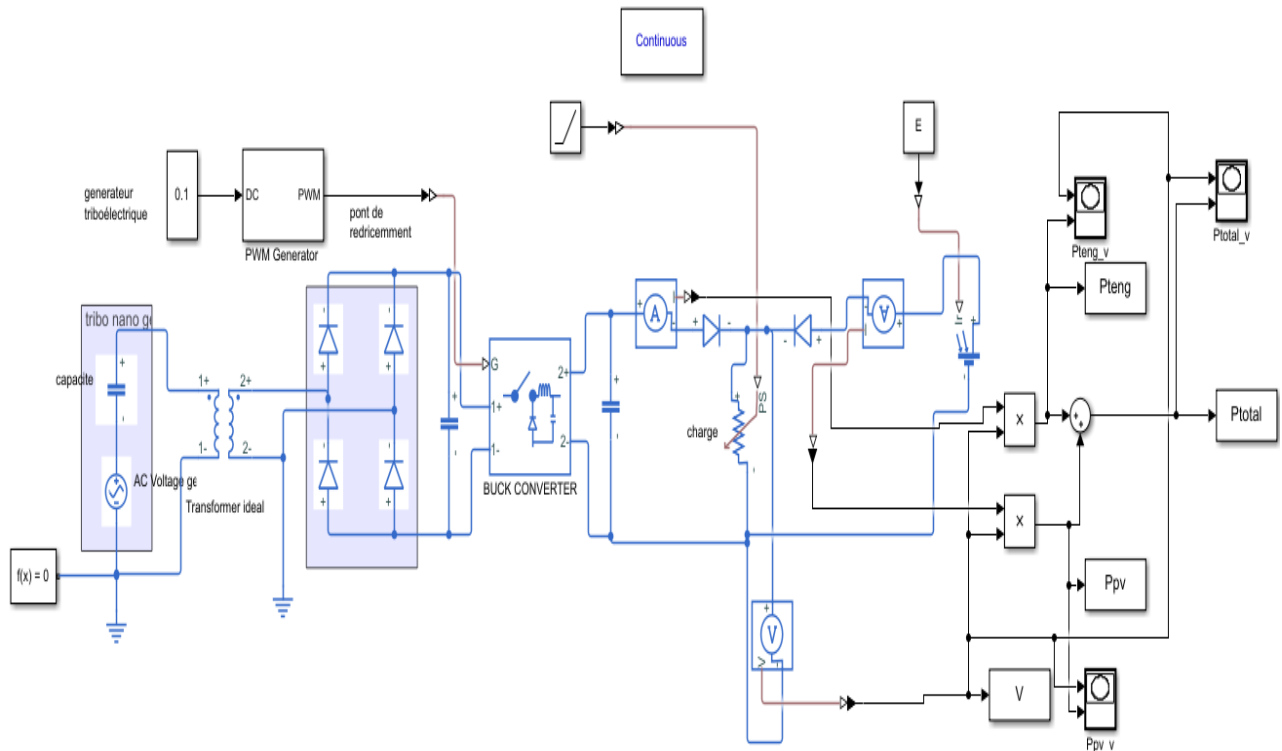


Figure 3.13 : schéma bloc sur Simulink MATLAB d'un système hybride cellule photovoltaïque +générateur triboélectrique

3.5.2 Présentation des résultats de la simulation du système hybride (cellule photovoltaïque + générateur triboélectrique)

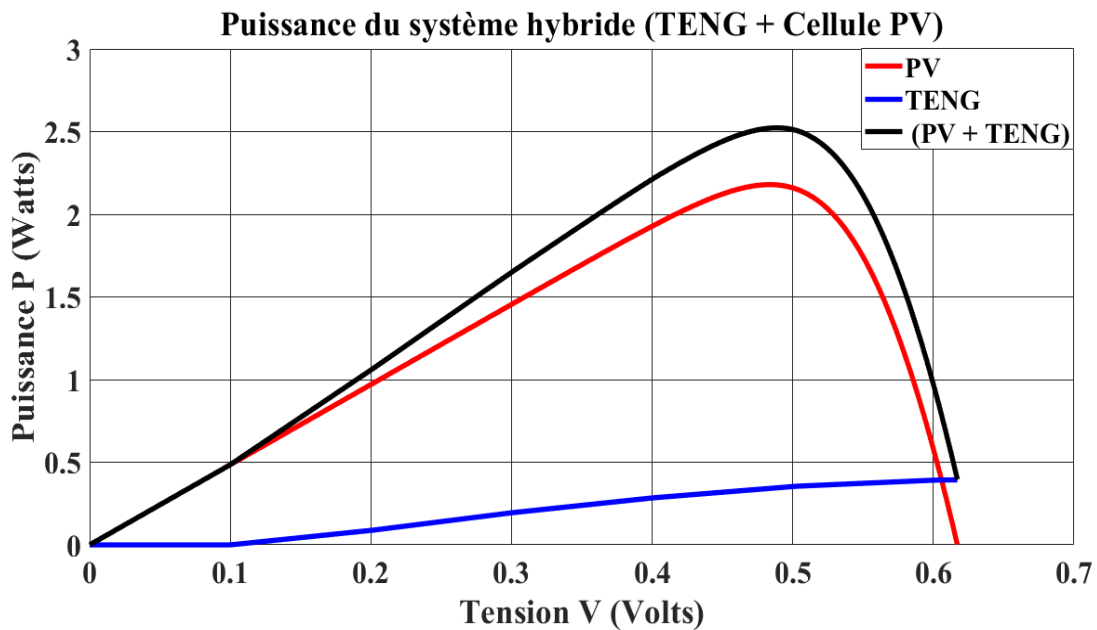


Figure 3.14 - Puissance de la cellule PV, puissance du générateur triboélectrique, et puissance du système hybride (cellule photovoltaïque + TENG).

Générateur triboélectrique (TENG) – Courbe bleue : La puissance commence à croître à partir d'une tension très faible, atteint un maximum modeste (environ 0,4 W) puis décroît. Ce comportement illustre le fonctionnement habituel des TENG, qui produisent de faibles courants avec des tensions variables, en réponse à des mouvements mécaniques périodiques (vibrations, pressions...). Le générateur opère donc à basse tension, ce qui est utile pour le démarrage de circuits à faible consommation.

Cellule photovoltaïque (PV) – Courbe rouge : La puissance augmente rapidement avec la tension jusqu'à atteindre un point de puissance maximale (environ 2.17 W), puis diminue malgré l'augmentation de la tension. Cela correspond au comportement typique des cellules PV avec un point de puissance maximale (MPP). Elle fonctionne à des tensions plus élevées que le TENG et fournit une puissance relativement stable.

Système hybride (PV + TENG) – Courbe noire : Représente la somme des puissances des deux générateurs. Il affiche une puissance maximale supérieure à celle de chaque source individuellement (près de 2.57 W). Ce système tire parti des avantages de chaque source : Le TENG améliore les performances à basse tension. La cellule PV prédomine à tension moyenne et élevée. Le résultat est une plage de fonctionnement élargie et une efficacité énergétique globale améliorée.

On peut conclure que l'idée d'associer une cellule photovoltaïque à un générateur triboélectrique représente une approche novatrice et judicieuse pour optimiser la performance des systèmes de production d'énergie autonome. Cette association présente de nombreux avantages, parmi lesquels:

- Garantir une production d'énergie continue dans des conditions environnementales changeantes
- Accroître la puissance maximale extraite du système
- Étendre la plage de tension de fonctionnement efficace
- Renforcer la stabilité et la fiabilité du système
- Fournir une grande compatibilité avec les applications mobiles et autonomes (telles que l'IoT et les capteurs)

Tableau 3.2: Développement de l'apport du **Ppv** à la puissance totale **Pt** selon l'irradiance solaire **G**

G (W/m²)	Ppv max (W)	Pt max (W)	Ppv / Pt (%)
0	0.0000	0.3963	0.00 %
100	0.2006	0.5969	33.61 %
200	0.4182	0.8145	51.35 %
300	0.6396	1.0359	61.71 %
400	0.8620	1.2583	68.47 %
500	1.0836	1.4799	73.22 %
600	1.3048	1.7011	76.68 %
700	1.5239	1.9202	79.37 %
800	1.7422	2.1385	81.50 %
900	1.9572	2.3535	83.17 %
1000	2.1700	2.5663	84.53 %
1100	2.3907	2.7870	85.76 %
1200	2.5884	2.9847	86.72 %

Le tableau illustre que la contribution de la cellule photovoltaïque (Ppv) à la puissance totale du système hybride augmente de manière significative avec l'intensité du rayonnement solaire (E). En l'absence de rayonnement (E = 0), la puissance totale est entièrement fournie par la source TENG, représentant 100 %. À mesure que le rayonnement s'intensifie, la puissance produite par la cellule photovoltaïque croît progressivement, entraînant ainsi une diminution relative de la contribution du TENG.

Ce phénomène met en évidence l'efficacité du système hybride pour garantir une production d'énergie même dans des conditions climatiques défavorables (telles que les jours nuageux ou la nuit), grâce à l'intégration du TENG, tout en permettant une amélioration de la performance globale lorsque les conditions solaires sont optimales, ce qui renforce la stabilité et le rendement du système.

3.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons effectué une analyse détaillée du système hybride PV–TENG. Au commencement de ce chapitre, nous avons examiné les différentes configurations possibles de ce système et analysé séparément chacun de ses composants (la cellule photovoltaïque et le générateur triboélectrique de type CS-TENG).

Par la suite, nous avons traité la modélisation du système ainsi que la simulation numérique, ce qui nous a permis d'observer la différence entre un système à source unique et un système à sources multiples PV–TENG. Cette distinction met en lumière la possibilité d'une augmentation significative de la production d'énergie photovoltaïque. À partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la combinaison de deux sources d'énergie distinctes au sein d'un même système améliore la stabilité de l'alimentation électrique et représente une avancée efficace vers le développement de systèmes énergétiques plus performants et durables.

Parmi les résultats les plus notables, on constate que le système hybride maintient sa capacité à produire de l'énergie même en l'absence de rayonnement solaire, le générateur triboélectrique (TENG) continuant à fonctionner de manière autonome. Cette complémentarité souligne la flexibilité du système et son efficacité à garantir une alimentation électrique stable dans diverses conditions de fonctionnement, notamment durant les périodes d'obscurité.

Il est également important de souligner que la puissance extraite du générateur triboélectrique peut être augmentée par l'intégration de matériaux intelligents tels que le polymère PVDF, reconnu pour ses excellentes propriétés électroactives. Par conséquent, toute amélioration des performances du TENG se traduit directement par une amélioration de la performance globale du système hybride PV–TENG, renforçant ainsi sa capacité à répondre aux besoins énergétiques dans des contextes variés.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale :

Compte tenu des limitations croissantes des ressources énergétiques traditionnelles et de l'instabilité observée dans la production d'électricité, notamment dans les régions isolées ou mal desservies en infrastructures, il devient essentiel de développer des solutions innovantes et efficaces qui garantissent à la fois la continuité de l'approvisionnement énergétique et le respect des normes environnementales. Dans ce contexte, ce travail a permis d'explorer un ensemble de concepts théoriques ayant contribué à établir une base de connaissances solide sur la nature de l'énergie, ses sources, ainsi que l'évolution des technologies d'exploitation, en mettant particulièrement l'accent sur les alternatives renouvelables et l'efficacité des systèmes multi sources. Pour répondre à la problématique soulevée, une solution hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable – la cellule photovoltaïque et le générateur triboélectrique – a été proposée dans la phase finale de cette étude. Ce système a fait l'objet d'une modélisation et d'une simulation approfondies afin d'évaluer ses performances et sa capacité à compenser les limites de chaque source prise individuellement, tout en garantissant une production énergétique stable même dans des conditions de fonctionnement non idéales. Les premiers résultats obtenus indiquent que cette approche de couplage intelligent des sources énergétiques peut représenter une alternative prometteuse aux systèmes classiques, dans un contexte mondial orienté vers une transition énergétique propre et flexible. Ainsi, cette étude constitue une base théorique et pratique pour de futures recherches visant à optimiser l'efficacité des systèmes hybrides et à élargir leur champ d'application dans des contextes réels à forte valeur ajoutée technique et économique.

Ce travail va bien au-delà d'une simple analyse théorique, il représente une étape cruciale vers la création de systèmes énergétiques hybrides plus durables et fiables, en phase avec les exigences contemporaines de la transition énergétique. Les résultats obtenus ont prouvé que l'intégration judicieuse des sources d'énergie renouvelable peut constituer une alternative efficace aux systèmes traditionnels, même dans des conditions de fonctionnement sous-optimales. En outre, ce type de solution participe à l'atteinte des objectifs de développement durable, notamment par la diminution de l'empreinte carbone et le renforcement de l'autonomie énergétique dans les régions isolées. Dans cette perspective, la mise en œuvre d'un prototype expérimental du système représente une opportunité prometteuse pour évaluer ses performances dans un contexte d'application réel, fournissant ainsi une base solide pour des recherches futures visant à optimiser l'efficacité des systèmes hybrides et à élargir leurs domaines d'application à des contextes à forte valeur ajoutée technique et économique.

Bibliographie

- [1] Ngô, C. (2004). L'énergie : Ressources, technologies et environnement. Dunod
- [2] EA. (s.d.). L'essentiel sur les énergies.
- [3] Connaissance des Énergies. (s.d.). L'énergie en physique.
- [4] HEIA-FR / Institut de recherche appliquée en systèmes énergétiques. (2022, janvier). [ENERGY]
- [5] Planète Énergies. (s.d.). Les différentes formes d'énergie.
- [6] Arlonsenergie. (2013, juin 8). Les transformations de l'énergie.
- [7] Rénovation Énergétique. (s.d.). Quelles sont les sources d'énergie sur Terre.
- [8] Sciences Physiques. (s.d.). Chapitre 4 : de la centrale à l'habitation.
- [9] AIEA. (2024, 17 avril). Qu'est-ce que l'énergie nucléaire ? La science de l'électronucléaire.
- [10] Equonet. (2019, 30 janvier). La transition énergétique examinée par secteur, régions et combustibles.
- [11] Alloprof. (s.d.). Les énergies non renouvelables.
- [12] DRIEAT Île-de-France. (s.d.). Énergies renouvelables et de récupération.
- [13] Pierre Pétrequin, Rose-Marie Arbogast, Anne-Marie Pétrequin, Samuel Van Willigen, Maxence Bailly, Premiers chariots, premiers araires : La diffusion de la traction animale en Europe pendant les IV^e et III^e millénaires avant notre ère, CNRS, coll. « Recherches Archéologiques », 16 novembre 2006, 397 p. (ISBN 2-271-06426)
- [14] Connaissance des Énergies. (2024, 14 mai). Production mondiale d'électricité : une « révolution » en cours mais un mix toujours très carboné.
- [15] Insee. (2025, 11 février). Part des énergies renouvelables dans l'Union européenne.
- [16] Le Vert. (2019, 4 janvier). Les énergies renouvelables sont devenues les principales sources d'énergie en Allemagne.
- [17] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec. (2016, février). Les aventures de Rafale – Documentaire sur les éoliennes.
- [18] Wind Works. (2012, décembre). Photos of wind turbines around the world.
- [19] Centre de Développement des Energies Renouvelables. (n.d.).
- [20] Lithosphère et Ressources énergétiques. (s.d.). Les ressources énergétiques de l'hydrosphère.
- [21] Alternative Energy News. (2010). Hydro power. Retrieved January 2013,
- [22] Energie-Renouvelable.tv. (n.d.). Les sources d'énergie renouvelable : une solution pour un avenir durable.

- [23] WTS Energie. (n.d.). *Biomasse Énergie*.
- [24] Connaissance des Énergies. (n.d.). *Géothermie haute température: définition, principe, fonctionnement*.
- [25] EDF-solutions-solaires/ Panneaux photovoltaïque
- [26] Alterna Énergie. (2022, 24 octobre). *Panneau solaire thermique fait maison : comment procéder*.
- [27] Quentin. (2024, 18 octobre). *Panneau solaire sur toiture métallique : notre gamme de supportage et fixation*. Würth France.
- [28] Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. (s.d.). *Chapitre 3 : Énergie solaire thermique*. Plateforme e-learning UMMTO.
- [29] MERSAlaric. (2015, 18 décembre). *L'énergie solaire*. Le journal numérique des collégiens de Capendu
- [30] hellowatt.fr/ Les panneaux solaires photovoltaïques
- [31] GeeksforGeeks. (n.d.). *Solar cell*. Récupéré le 2 juin 2025, de
- [32] Wikipedia contributors. (n.d.). *Solar cell*
- [33] Warner, J. (2014). *Figure 1: Schematic diagram of a solar cell showing n-type and p-type silicon layers and depletion zone* [Illustration]. *ChemMatters*, April/May 2014. Reprinted with permission from American Chemical Society; copyright 2014.
- [34] TotalEnergies. (s.d.). *Les différents types de cellules photovoltaïques*.
- [35] Planète Énergies. (s.d.). **Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque**. Récupéré
- [36] Acsolue Énergie. (2021, 16 août). **Processus de fabrication d'un panneau photovoltaïque cristallin et des cellules de silicium*
- [37] Tuco Énergie. (2024, 7 novembre). *Les dernières avancées technologiques sur le photovoltaïque et leur impact sur la rentabilité*. Récupéré
- [38] dsnsolar.com. (s.d.). [Les panneaux solaires bifaciaux augmentent le potentiel de puissance].
- [39] CoolTec. (s.d.). *Capteurs solaires hybrides PV-T*.
- [40] Action France Habitat. (s.d.). *Panneaux solaires photovoltaïques*.
- [41] Bellini, E. (2020, 25 novembre). Une cellule solaire pérovskite efficace à 25,17 % grâce à une nouvelle couche photoactive. *pv magazine France*.
- [42] Gomez, G. (s.d.). *Cellules photovoltaïques organiques*. Académie de Montpellier.
- [43] GeePs. (s.d.). *Structures à multijonctions*. CentraleSupélec.
- [44] IBM. (s.d.). *Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables*.

- [45] Marzencki, M., Basrour, S., & Charlot, B. (s.d.). *Conception de micro générateurs piézoélectriques intégrés pour systèmes sur puce autonomes*. Laboratoire TIMA, projet VIBES (Vibration Energy Scavenging).
- [46] Mounir Meddad : (Etude de l'énergie renouvelable dans l'environnement humain pour alimenter les systèmes électroniques portables), thèse de doctorat université Sétif 2012.
- [47] iSuppli. (2013). *Étude de marché sur les MEMS et leur intégration dans l'électronique grand public*.
- [48] Yole Développement. (n.d.). *Yole Développement*.
- [49] Diversegy. (2024, December 19). *Optimizing power with hybrid energy solutions: Merging renewables, storage, and traditional sources for reliability*.
- [50] L.Stoyanov, '' Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables '', 'thèse de doctorat de l'université technique de Sofia, 2011.
- [51] Rosnay, J. D. (2000, octobre 4). *Les matériaux intelligents : Définition et exemples d'applications* (p. 1).
- [52] Adoum, W. (2016, septembre 12). *Thèse de doctorat : Création de structures actives à l'aide d'alliages à mémoire de forme – État de l'art* (p. 5).
- [53] Taillard, K. (2007, décembre 21). *Étude du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme sous sollicitations multiaxiales complexes* [Thèse de doctorat, Université].
- [54] Techno-Science. (s.d.). *Alliage à mémoire de forme*.
- [55] Peultier, B. (2005, juillet 11). *Alliages à mémoire de forme : modélisation et calcul de structures* [Thèse de doctorat, Université].
- [56] Dolatkhani, D. (2022, 25 avril). *Le guide complet des matériaux à mémoire de forme et leurs applications*. PolymerExpert.
- [57] Wikipédia. (2024, 22 avril). *Alliage*. Wikipédia.
- [58] Fournet, G. (1985). *Électromagnétisme à partir des équations locales*. Masson
- [59] Techno-Science. (2025, 22 mai). *Magnétostriction*. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Magnetostriktion.html>
- [60] Claeysen, F., Letty, R. L., Lhermet, N., Barillot, F., Fabbro, H., & Maillard, T. (2001). Actionneurs piézoélectriques pour du positionnement précis et rapide. In *2e Colloque sur les Matériaux Electroactifs et leurs Applications en Génie Électrique (MAGELEC)* (pp. 157–162). Toulouse.

- [61] Monturet, V. (2002). *Conception optimale des actionneurs piézoélectriques à l'aide d'une méthodologie de type « problème inverse » – Application au cas des actionneurs répartis* [Thèse de doctorat, INP Toulouse].
- [62] Ping, Z. (1996). In situ FTIR–attenuated total reflection spectroscopic investigations on the base–acid transitions of polyaniline: Base–acid transition in the emeraldine form of polyaniline. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 92(17), 3063–3067.
- [63] Eskizeybek, V., Sari, F., Gülce, H., Gülce, A., & Avcı, A. (2012). Preparation of the new polyaniline/ZnO nanocomposite and its photocatalytic activity for degradation of methylene blue and malachite green dyes under UV and natural sun lights irradiations. *Applied Catalysis B: Environmental*, 119, 197–206.
- [64] Somani, P. R., Marimuthu, R., Mulik, U. P., & Amalnerkar, D. P. (1999). High piezoresistivity and its origin in conducting polyaniline/TiO₂ composites. *Synthetic Metals*, 106(1), 45–52.
- [65] Nanomotion. (n.d.). *Precision motion systems using piezo technology*.
- [66] Mohammadi, S. (2008). *Semi-passive vibration control using shunted piezoelectric materials*
- [67] Futura-Sciences. (2002, février 22). [Titre de l'article ou de la page].
- [68] Pierre Desproges, modèle électromécanique.
- [69] Mouhoud, S., Bouguelia, A., & Hamou, A. (2022). *Mise en œuvre des procédés potentiels d'évacuation des charges pyroélectriques sur n*. ResearchGate.
- [70] Techniques de l'Ingénieur. (s.d.). *Triboélectricité : Définition*. Techniques de l'Ingénieur
- [71] Techno-Science.net. (s.d.). *Triboélectricité – Définition*
- [72] Wang, Z. L., et al. (2016). *Triboelectric nanogenerators*. In *Green Energy and Technology* (Chapter 1).
- [73] Khan, U., Hinchet, R., Ryu, H., & Kim, S.-W. (2017). *Figure 5: Four operational modes of TENG (vertical contact-separation, contact sliding, single-electrode, freestanding)* [Illustration]. In *Research Update: Nanogenerators for self-powered autonomous wireless sensors*. APL Materials.
- [74] Renard, P. (2010, 30 mai). *La superélasticité du Nitinol*. DeviceMed. .
- [75] Zi, Y., & Wang, Z. L. (2017). Nanogenerators: An emerging technology towards nanoenergy. *APL Materials*, 5(7), 074103.
- [76] Moscufo, M. (2022). *Triboelectric harvester for sensor system in smart tires* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).

- [77] S.M. Niu, Z.L. Wang, Theoretical systems of triboelectric nanogenerators. *Nano Energy* 14,161–192 (2015)
- [78] Benalia, N. (2020). Modélisation et Simulation d'un Système de Récupération d'Energie à partir d'un Effet Triboélectrique pour les Implants Intelligents du Genou.
- [79] Wang, Z. L., & Wang, A. C. (2015). On the origin of contact-electrification. *Nano Energy*, 10, 322–328.
- [80] Guessabi, A., & Bedhane, Y. (2021). *Contribution à l'étude de la conversion d'énergie photovoltaïque-triboélectrique*
- [81] Huang, W. M., Song, C., Fu, Y. Q., & Zhang, J. L. (2006). *Shaping tissue with shape memory materials* [Figure]. ResearchGate.