

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
**Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique**



Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

Filière : Electrotechnique

Option : Commande Electrique

*Thème*

*Contribution a l'étude de la conversion d'énergie  
Photovoltaïque -triboélectrique*

Présenté par : -GUESSABI ACHRAF

- BEDHANE YASSER

Devant le jury :

Président	: BENHADOUGA SEDDIK	<b>Université de Bordj Bou Arreridj</b>
Examineur 1	: KHANFER RIADH	<b>Université de Bordj Bou Arreridj</b>
Examineur 1	: CHERIF AIDA	<b>Université de Bordj Bou Arreridj</b>
Rapporteur	: MEDDAD MOUNIR	<b>Université de Bordj Bou Arreridj</b>

Année Universitaire 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Filière : Electrotechnique  
Option : Commande Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

***Thème***

*Contribution a l'étude de la conversion d'énergie  
Photovoltaïque -triboélectrique*

Présenté par :

- GUESSABI ACHREF

- BEDHANE YASSER

*signature*

Avis favorable du Président du Jury

BENHADOUGA SEDDIK

*Signature*

Année Universitaire 2020/2021



Nous dédions ce modeste travail à :

En premier lieu ceux que personne ne peut compenser les sacrifices qu'ils ont

Consentis pour notre éducation et notre bien-être à nos parents qui se sont

Sacrifiés pour nous prendre en charge tout au long de notre formation et qui

Sont l'origine de notre réussite que dieu les garde et les protèges.

A notre famille et nos chers amis qui nous ont accordé leur soutien dans les

Instants les plus difficiles.

Tous nos formateurs et toute l'équipe pédagogique et administrative de département  
électromécanique

Pour l'aide qu'ils ont toujours porté aux étudiants.

Toute personne qui de près ou de loin a participé à notre formation.

*Guessabi achraf*

*Bedhane yasser*

# 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 :

Dr :BENHADOUGA SEDDIKE

Dr :KHANFER RIAD

Dr :CHERIF AIDA

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.

## Liste des figures :

Figure 1 : production d'électricités renouvelable par région ,2018-2040.....	4
Figure 2 : Production mondiale d'électricité renouvelable par région [3] .....	5
Figure 3 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [6].....	6
Figure 4 : Géothermie haute énergie. ....	8
Figure 5 : schéma de principe d'une usine biomasse .....	9
Figure 6 : Éolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b) [8] .....	11
Figure 7 : Éléments constituant une éolienne à axe horizontal [9]. ....	12
Figure 8: Les types de rayonnement solaire. ....	13
Figure 9: Les types de rayonnement solaire. ....	15
Figure 10: Les types de rayonnement solaire.....	16
Figure 11: Schéma de principe d'une cellule organique. ....	17
Figure 12: Cellule solaire tout organique sur substrat souple. [24] .....	18
Figure 13: classification des systèmes hybrides.....	21
Figure 14: système hybride source photovoltaïque et un générateur diesel a un pont de redressement.....	24
Figure 15: système hybride source photovoltaïque et un générateur diesel a un pont de redressement.....	24
Figure 16: Système hybride à connexion parallèle. ....	25
Figure 17: Schéma synoptique du système hybride étudié. ....	26
Figure 18 : Schéma de principe du système hybride photovoltaïque- éolien. ....	26
Figure 19: Schéma physique de la chaîne de conversion d'énergie électrique hybride (photovoltaïque- éolienne- groupe électrogène) . ....	28
Figure 20: Capteurs solaires hybride PV/T à eau.....	29
Figure 21: Coupe transversale dans un capteur hybride PV/T à air .....	30
Figure 22 : Exemple de série triboélectrique (construite d'après [81]).....	33
Figure 23: Illustrations du cycle triboélectrique (ici à deux diélectriques) pour chacun des deux modes, (a) « vertical » et (b) « horizontal ». ....	34
Figure 24: Récupération triboélectrique par surfaces glissantes – Intérêt de la segmentation. ....	35
Figure 25 : 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 .....	35
Figure 26: Le mode coulissant dans le plan TENG. [3] .....	36
Figure 27: Mode TENG à électrode unique [3] . ....	37
Figure 28: Modèles et caractéristiques de sortie de base des TENG libres en mode coulissant (a) Modèle FEM d'un SFTENG diélectrique typique. (b) Modèle FEM d'un SFTENG métallique typique. (c – e) Influence du matériau de la couche autoportante sur le caractéristique .....	37
Figure 29: Un triboélectrique-photovoltaïque.....	38
Figure 30: Un module unifié triboélectrique-photovoltaïque pour la récolte simultanée de gouttes de pluie, d'énergie solaire et éolienne .....	39
Figure 31: Une source d'alimentation hybride triboélectrique-photovoltaïque tout-en-un pour récolte des gouttes de pluie, de l'énergie solaire et éolienne. ....	40

Figure 32 : panneau photovoltaïque sous les pluies. ....	42
Figure 33 : système hybride des couches de polymère une électrode commune au TENG et à la cellule photovoltaïque .....	42
Figure 34: structure d'une cellule hybride PV-TENG planté sur les vêtements.....	45
Figure 35 : modèle panneau solaire hybride .....	46
Figure 36: Circuit équivalent d'un système PV-TENG.....	46
Figure 37: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque. ....	47
Figure 38: schéma bloc sur simulink MATLAB d'un circuit PV. ....	48
Figure 39: simulation d'un système photovoltaïque schéma bloc SIMULINK.....	48
Figure 40: la caractéristique OPV / $I=f(V)$ . ....	49
Figure 41: la caractéristique $V=f(R)$ .....	50
Figure 42: la structure d'un générateur triboelectrique mode coulissant latéral. ....	50
Figure 43: Circuit équivalent d'un générateur triboélectrique. ....	51
Figure 44: la fenêtre d'entrée du logiciel comsol. ....	56
<b>Figure 45:</b> les étapes de la simulation triboélectrique a l'aide de logiciel comol . ....	57
<b>Figure 46:</b> la surface de propagation du potentiel électrique. ....	57
<b>Figure 47:</b> simulation d'un TENG par comsol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de $x=10$ .....	58
<b>Figure 48:</b> simulation d'un TENG par comsol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de $x=50$ .....	58
<b>Figure 49:</b> simulation d'un TENG par comsol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de $x=90$ .....	58
<b>Figure 50:</b> simulation d'un TENG par comsol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de $x=90$ . ....	59
<b>Figure 51:</b> Représentation schématique de la fabrication et du mécanisme de travail du TENG en mode deux électrodes verticaux. ....	60
<b>Figure 52:</b> courbe Performances de sortie électrique du TENG optimisé avec une résistance. ..	61
<b>Figure 53:</b> caractéristique d'un système hybride PV-TENG $V/f(R)$ .....	62

### Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> caractéristiques de la cellule photovoltaïque. ....	49
<b>Tableau 2:</b> Caractéristique de 25 cellules photovoltaïque $v, f(R)$ .....	49
<b>Tableau 3:</b> Performances de sortie électrique du TENG optimisé avec une résistance. ....	60

## Abréviations et Nomenclature

Symbole	sens
PV	Photovoltaïque
$I_{PV}$	courant de la cellule photovoltaïque (A)
$V_{PV}$	tension de la cellule photovoltaïque (v)
E	Éclairement ( $W \cdot m^{-2}$ )
$I_{cc}$	courant de court-circuit (A)
$V_{co}$	tension de circuit ouvert (v)
$I_p, I_{ph}$	photo courant généré (A)
FF	facteur de forme
H	Rendement
E	La charge de l'électron (C)
$I_D$	courant de diode (A)
$I_0$	Le courant de saturation
K	La constante de Boltzmann
T	température ( $k^\circ$ )
$R_s$	Résistance série ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	Résistance parallèle (ou shunt) ( $\Omega$ )
E	Epaisseur (m)
I	Courant électrique(A)
TENG	Nano-générateur triboélectrique
CA	Courant alternatif
CO	Circuit ouvert
CC	Court-circuit

## ملخص:

استند العمل في هذه المذكرة على جمع مصدرين من الطاقة الكهربائية وحصد أكبر استطاعة ممكنة من خلال خلق نظام هجين يعتمد أساساً على الطاقة الشمسية التي تكون متقدمة عادة وذات نفع لكن ذلك يتوقف في الظل لذلك من الممكن أن يتغير هذا بفضل الخلية الهجينة التي تستطيع إنتاج الكهرباء من ضوء الشمس ومن نظام الاحتكاك النانوي للكهرباء الساكنة المسمى Triboélectrique nanogenerateur أو اختصاراً TENG هذا الأخير يمكنه إنتاج الطاقة من كل احتكاك كاحتكاك الملابس ببعضها أو مع جسم الإنسان احتكاك إطارات السيارات أو في هذه الحالة فوق اللوح الشمسي من تدرج قطرات المطر وسقوطها المباشر على اللوح وهذا يجعلنا أقرب من أي وقت مضى إلى إنتاج ألواح لا تحتاج إلى ضوء الشمس فقط لتعمل

**كلمات مفتاحية :** الكهرباء الساكنة , المولد النانوي , الطاقة الشمسية , الخلية الهجينة , الطاقة الكهربائية

## Résumé :

Le travail dans ce mémoire était basé sur la collecte de deux sources d'énergie électrique et la récolte de la plus grande capacité possible en créant un système hybride qui dépend principalement de l'énergie solaire, qui est généralement avancée et utile, mais cela dépend de l'ombre, donc cela peut être changé grâce à la cellule hybride qui peut produire de l'électricité à partir de la lumière du soleil et à partir du système de nano-frottement d'électricité statique appelé Triboélectrique nano générateur, ou TENG en abrégé, ce dernier peut produire de l'énergie à partir de chaque frottement, comme le frottement des vêtements entre eux ou avec le corps humain, le frottement des pneus de voiture, ou dans ce cas, sur le panneau solaire du roulement des gouttes de pluie et leur chute directe sur le panneau, et cela nous rend plus proches que jamais des panneaux qui n'ont pas besoin de la lumière du soleil juste pour fonctionner

**Les mots clés :** nano générateur ,triboélectrique ,énergie photovoltaïque ,cellule hybride

## Abstract :

The work in this memo is based on collecting two kinds of electrical energy and collecting the largest possible capacity by creating a hybrid system that mainly relies on solar energy. This is usually advanced and useful, but it depends on the shade, so this can be changed due to the hybrid battery Can generate electricity from sunlight and electrostatic nano friction system, called Treboelectrique nanogenerateur (TENG )for short, the latter can generate energy from each friction, such as the friction between clothes or the human body, the friction of car tires, or in this case, above the solar panel, from raindrops rolling and falling directly On panels, this brings us closer than ever to producing panels that don't require sunlight

**key words :** Nanogenerator ,solar cells ,hybrid cells ,energy scavenging, Triboelectric



## Sommaire

Introduction général : .....	1
Chapitre 01 .....	
Les énergies renouvelables.....	3
1. Introduction : .....	4
1.1. Notions et principe sur les énergies renouvelables : .....	5
1.2. Définition d'énergie renouvelable : .....	5
1.3. Types d'énergies renouvelables : .....	5
1.3.1. L'hydraulique : .....	5
□ Les centrales dites gravitaires : .....	6
□ Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P.) : .....	6
□ Les usines marémotrices : .....	7
1.3.1.1. Avantage des centrales hydrauliques : .....	7
1.3.1.2. Inconvénients des centrales hydrauliques .....	7
1.3.2. Énergie de la géothermie : .....	7
1.3.2.1. Les avantages d'énergie géothermie : .....	8
1.3.2.2. Les inconvénients d'énergie géothermie : .....	8
1.3.3. L'énergie Biomasse : .....	8
1.3.3.1. Les Avantages d'énergie biomasse .....	9
1.3.3.2. Les Inconvénients d'énergie biomasse .....	9
1.3.4. L'énergie éolienne : .....	9
1.3.4.1. Les différents types des turbines éoliennes : .....	9
1.3.4.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne : .....	11
1.3.5. Le solaire .....	12
1.3.5.1. L'énergie solaire thermique : .....	12
1.3.5.2. Le rayonnement solaire : .....	13
1.3.5.3. Panneaux photovoltaïques .....	13
1.3.6. Conclusion : .....	18
Chapitre 02 .....	19
Système d'énergie multi source.....	19
INTRODUCTION : .....	20
2. Systèmes hybride : .....	20

2.1.	Définition D'un système hybride :	20
2.2.	Classification :	21
2.3.	Le régime du fonctionnement :	21
2.4.	La structure du système hybride :	21
2.5.	Les différents types de systèmes PV-hybride :	22
2.6.	Études des structures de systèmes hybrides :	22
2.6.1.	Système hybride avec source d'énergie conventionnelle :	22
2.6.2.	Système photovoltaïque/source conventionnelle :	22
2.6.3.	Système hybride photovoltaïque-éolien	25
2.6.3.2.	Système de conversion d'énergie hybride	26
2.6.3.3.	Principaux composantes du Système d'énergie hybride photovoltaïque – éolien	27
2.6.3.4.	Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel :	27
2.6.3.5.	Système hybrides PV-T:	28
2.6.3.5.1.	Concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique :	28
2.6.3.5.2.	Concept hybride PV/T à eau :	29
2.6.3.5.3.	Étude d'un capteur hybride PV/T à air :	29
2.6.3.6.	Hybridations photovoltaïques-matériaux intelligents :	30
2.7.	Triboélectricité :	31
2.7.1.	Phénomène triboélectricité :	31
2.7.2.	Matériaux et séries triboélectriques :	32
2.7.3.	L'exploitation de l'effet triboélectrique :	33
2.7.4.	Mode de séparation de contact verticale :	35
2.7.5.	Mode coulissant latéral [1] :	36
2.7.6.	Mode à électrode unique [1] :	36
2.7.7.	Mode triboélectrique autonome [1] :	37
2.8.	Système de récupération d'énergie hybride (PV-TENG) :	38
2.9.	Cellule hybride pour la récolte des gouttes de pluie et de l'énergie solaire :	38
2.9.1.	Expérience chinois d'un système hybride PV-TENG :	40
2.9.2.	Une technologie encore à optimiser :	42
2.10.	Conclusion :	43
3.	Introduction :	45
3.1.	La structure de L'idée :	45
3.2.	Aspect technique de cette technologie :	45
3.3.	Circuit équivalent d'un système hybride triboélectrique photovoltaïque :	46

3.4. Présentation du modèle mathématique et circuit électrique d'une cellule photovoltaïque :	47
3.4.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :	47
3.4.1.1. Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) C'est :	47
3.4.1.2. Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) :	47
3.4.2. Modélisation d'un système photovoltaïque :	48
3.5. Simulation d'une cellule photovoltaïque :	48
3.6. Présentation du modèle mathématique et circuit électrique d'un generateur triboélectrique :	50
3.6.1. Circuit équivalent d'un générateur triboélectrique :	51
3.6.2. Le model mathématique d'un générateur triboélectrique.....	51
3.7. Simulation par comsol multi physique :	55
3.7.1. Présentation du logiciel :	55
3.8. Simulation d'un générateur triboélectrique :	56
3.8.1. Simulation triboélectrique en mode coulissant latéral:	56
3.8.2. Simulation triboélectrique en mode deux électrodes verticaux [71] :	59
3.9. Model mathématique d'un système hybride photovoltaïque triboélectrique.....	61
3.9.1. Modélisation d'un système hybride :	61
3.9.2. Simulation d'un système hybride PV-TENG :	61
3.9.3. Conclusion :	62
Conclusion général :	64

# **INTRODUCTION GENERALE**

### **Introduction général :**

Le soleil, le vent, les chutes d'eau et la biomasse sont autant de ressources naturelles utilisables pour générer de l'énergie électrique, grâce aux différentes technologies que l'on peut regrouper par filières économiques en fonction de la ressource considérée. Disponibles en quantité supérieure aux besoins énergétiques actuels de l'humanité, les ressources d'énergie renouvelable n'augmentent pas la quantité de gaz à effet de serre de l'atmosphère lors de leur exploitation. Elles représentent par ailleurs une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

Parmi les systèmes les plus prometteurs pour l'utilisation des énergies renouvelables, il y a les Systèmes d'Energie Hybrides (SEH). Pour les régions isolées ou solaire, le prix d'extension du réseau électrique s'avère prohibitif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement. Le terme « Système d'Energie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. Dans cette notion, on exclut les grands réseaux interconnectés dans lesquels les sources peuvent aussi être de plusieurs types. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels utilisés généralement pour la génération d'électricité dans les régions isolées ou avec source récupération énergie matériaux intelligents. Les SEH sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'électrification complète de villages ou de petites îles. . Enfin, nous ne nous intéresserons seulement qu'au système hybride PV-triboélectrique

Certaines filières des énergies renouvelables, déjà mûres, peuvent fournir des composants fiables et économiquement rentables pour l'intégration dans les systèmes d'énergie électrique. Cependant, des améliorations dans la conception et le fonctionnement des SEH sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitives ces filières technologiques et permettre leur essor

Ce travail a été effectué en trois étapes ou bien chapitre Chacun complète l'autre dans une première partie on a parlé d'abord généralement de les énergies renouvelables traditionnelles ou on a touché le fond

On a également travaillé dans deuxième chapitre sur les systèmes hybrides leur composition et sa structure tour à tour.

## INTRODUCTION GENERAL

Finalemment on a traité principalement un système multi source que se base de triboélectrique photovoltaïque.

**Chapitre 01**  
**Les énergies renouvelables**

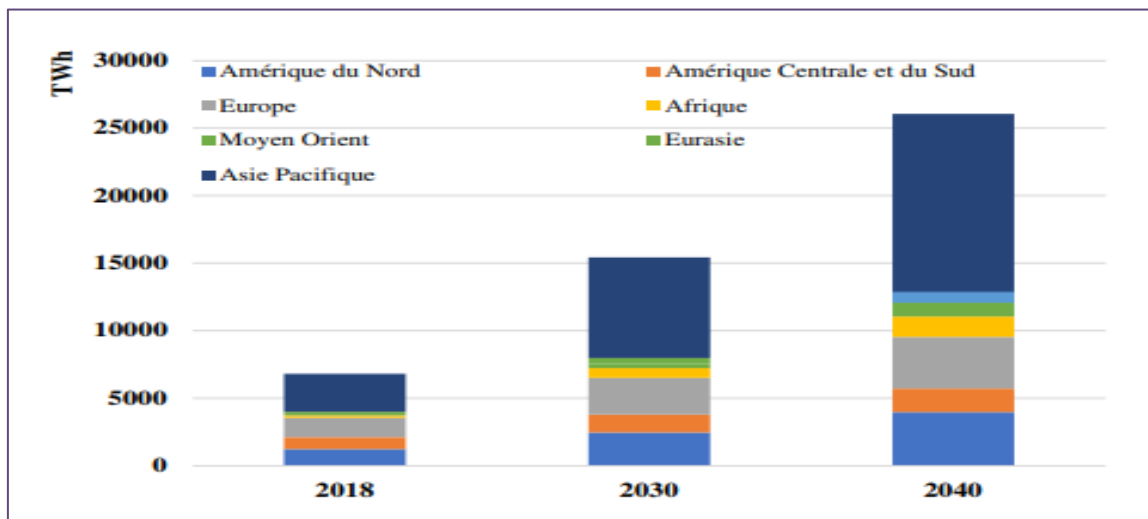
### 1. Introduction :

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermique .....etc .

Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux

Les énergies renouvelables sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles. Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie solaire qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement

En 2018, la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables a augmenté de 450 TWh, soit 7 % par rapport à 2017, ce qui représente plus d'un quart de la production mondiale d'électricité 2 . La quantité produite d'énergie renouvelable passera de 6777 en 2018 à 25 258 TWh en 2040, estime l'agence internationale de l'énergie (AIE) dans le scénario du développement durable, comme le montre la figure 1 [1].



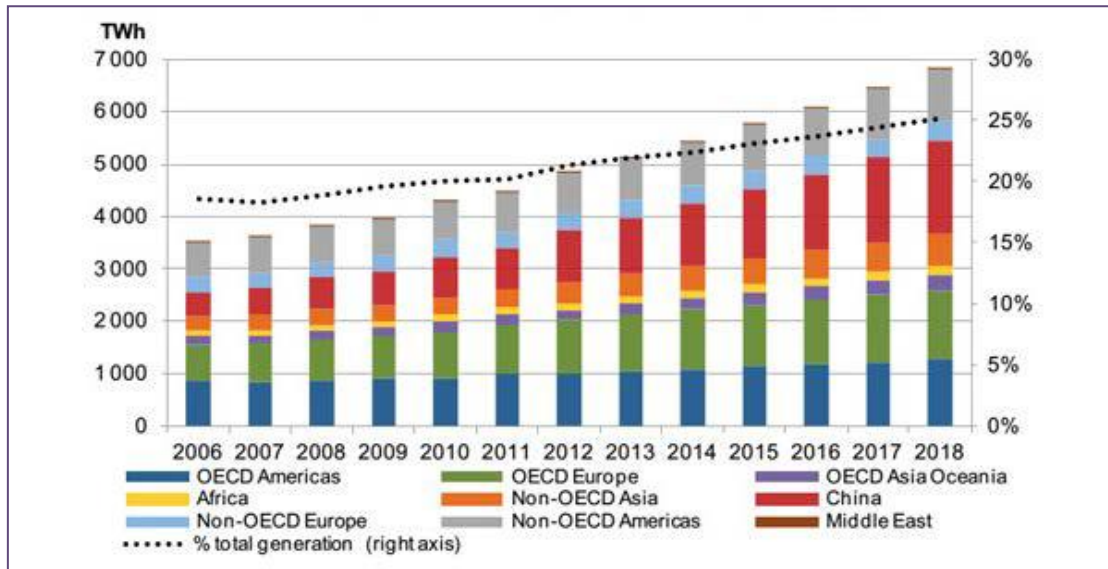
**Figure 1** : production d'électricités renouvelable par région ,2018-2040



### 1.1. Notions et principe sur les énergies renouvelables :

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.



**Figure 2 :** Production mondiale d'électricité renouvelable par région [3]

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, notamment, l'énergie solaire, éolienne, marine, biomasse, hydroélectrique et géothermique.

### 1.2. Définition d'énergie renouvelable :

L'énergie renouvelable représente l'ensemble des énergies qui sont extraites de sources de nature illimitée car elle ne disparaît pas avec le temps et elles sont renouvelables tels que la lumière du soleil, le vent, l'énergie hydraulique, etc. Ce type d'énergie est souvent disponible dans la nature et à la portée des humains[4]

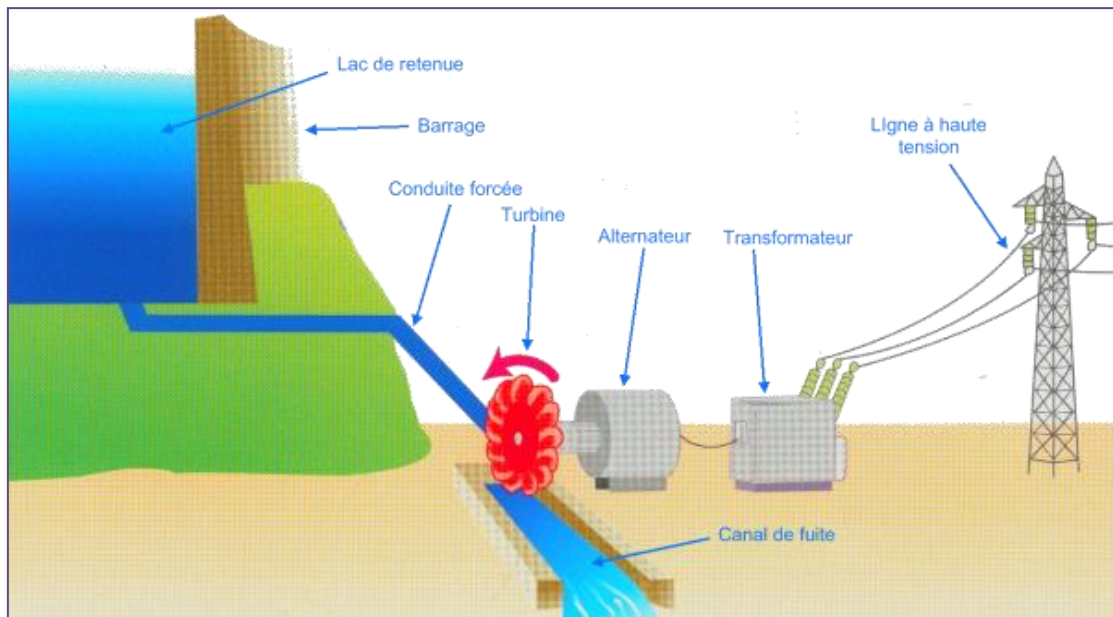
### 1.3. Types d'énergies renouvelables :

#### 1.3.1. L'hydraulique :

L'énergie hydraulique utilise la force du courant qui passe à travers une centrale afin de faire tourner une turbine qui entraîne à son tour un générateur électrique qui injecte de l'électricité sur le réseau. Contrairement à l'éolien et au solaire, l'énergie hydroélectrique est relativement peu dépendante des conditions climatiques. Selon les saisons, les débits enregistrés au niveau des centrales sont toutefois fort différents. Si l'on parle peu de ce type

d'énergie en Belgique, son exploitation étant moins récente que celle du vent et du soleil, elle s'avère pourtant importante à l'échelle mondiale, puisqu'elle est à l'origine d'un peu plus de 16 % de la production d'électricité totale et d'environ deux tiers de la puissance électrique attribuée au renouvelable pour l'année 2013 [5]

La figure en bas exprime le travail des centrales hydrauliques qui transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques Fig. 3



**Figure 3** : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique [6]

La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques :

❖ **Les centrales dites gravitaires :**

Pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation,

❖ **Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (S.T.E.P.) :**

Aussi connues sous l'appellation centrale hydraulique à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage : pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base (nucléaire) et production d'électricité par turbinage durant la pointe, en substitution ou en complément à celle, plus coûteuse, des équipements de pointe,

**❖ Les usines marémotrices :**

Au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (dites aussi hydroliennes) ou du mouvement des vagues. Les centrales gravitaires et celles de transfert d'énergie par pompage peuvent aussi être classées en trois types selon la hauteur de la chute de l'eau : - chute haute (> 200 m)

Chute moyenne (entre 50 et 200 m), - chute basse (< 50 m). Malgré des coûts de réalisation généralement élevés, les coûts de maintenance sont raisonnables, les installations sont prévues pour fonctionner longtemps et l'énergie de l'eau est gratuite et renouvelable si elle est bien gérée. Donc le bilan est plutôt positif, et les centrales hydrauliques sont parmi les systèmes de production d'électricité les plus rentables. Les impacts environnementaux varient avec le type et la taille de la structure mise en place : ils sont faibles s'il s'agit des barrages de taille modérée, des courants marins, des vagues, mais ils peuvent devenir importants s'il s'agit de créer des grands barrages. Dans ce dernier cas, la critique est généralement sur la disparition de terres agricoles et de villages, ainsi que la perturbation du déplacement de la faune (pas seulement aquatique) et globalement de l'écosystème environnant.

**1.3.1.1. Avantage des centrales hydrauliques :**

- source d'énergie renouvelable, production d'énergie locale
- contrôle des inondations, création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations

**1.3.1.2. Inconvénients des centrales hydrauliques**

- bloque les passes à poissons
- modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température)
- dégrade la qualité d'eau (accumulation de contaminants)

**1.3.2. Énergie de la géothermie :**

Une énergie produite grâce à la chaleur de la terre, elle est contenue à l'intérieure de réservoir souterrains de vapeur d'eau chaude et des roches chaudes, est utilisée comme ressource générant de l'électricité, l'eau chaude ou la vapeur extraite des réservoirs géothermiques de la croûte de la terre, fait tourner les turbines électriques qui alimentent les générateurs pour produire de l'électricité.

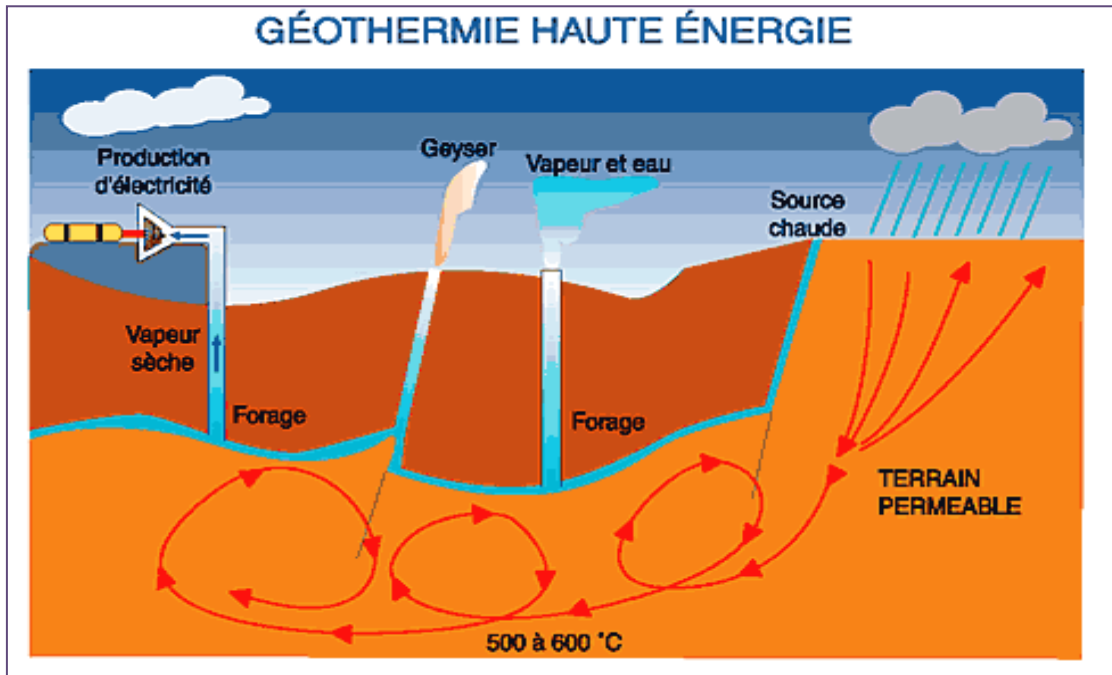


Figure 4 : Géothermie haute énergie.

#### 1.3.2.1. Les avantages d'énergie géothermie :

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermique présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse.

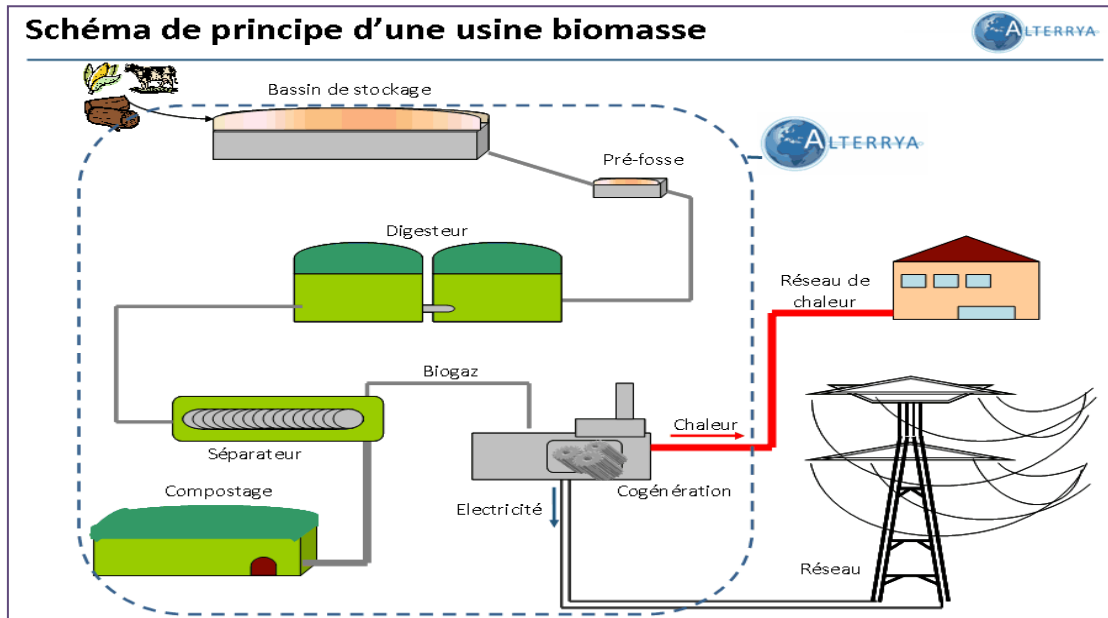
#### 1.3.2.2. Les inconvénients d'énergie géothermie :

Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul

. Risque de pollution existants sont rejetés à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol

#### 1.3.3. L'énergie Biomasse :

Énergie produite grâce aux déchets et grâce à la combustion des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, ou après méthanisation (biogaz), et aussi après de nouvelles transformations chimique.



**Figure 5 :** schéma de principe d'une usine biomasse

### 1.3.3.1. Les Avantages d'énergie biomasse

C'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée.

Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

### 1.3.3.2. Les Inconvénients d'énergie biomasse

Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols eaux (en cas de production intensive de biocarburant)

### 1.3.4. L'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [7].

Le SCE (Système de Conversion Éolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique.

#### 1.3.4.1. Les différents types des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- ❖ Les éoliennes à axe verticale.
- ❖ Les éoliennes à axe horizontale

#### ***1.3.4.1.1. Les éoliennes à axe verticale :***

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonnais et le rotor de Darrieux. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent les avantages et les inconvénients suivants :

##### ***1.3.4.1.1.1. Les Avantages de la structure à axe vertical :***

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol. •

Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.

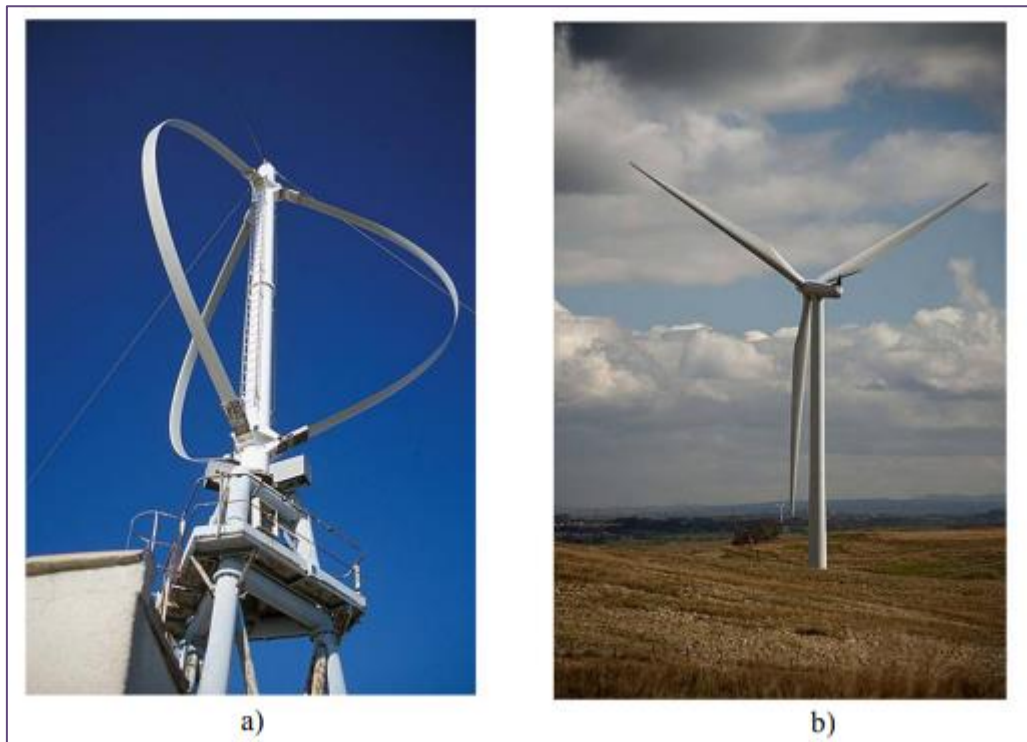
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

##### ***1.3.4.1.1.2. Les Inconvénients de la structure à axe vertical :***

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

#### ***1.3.4.1.2. Les éoliennes à axe horizontale :***

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

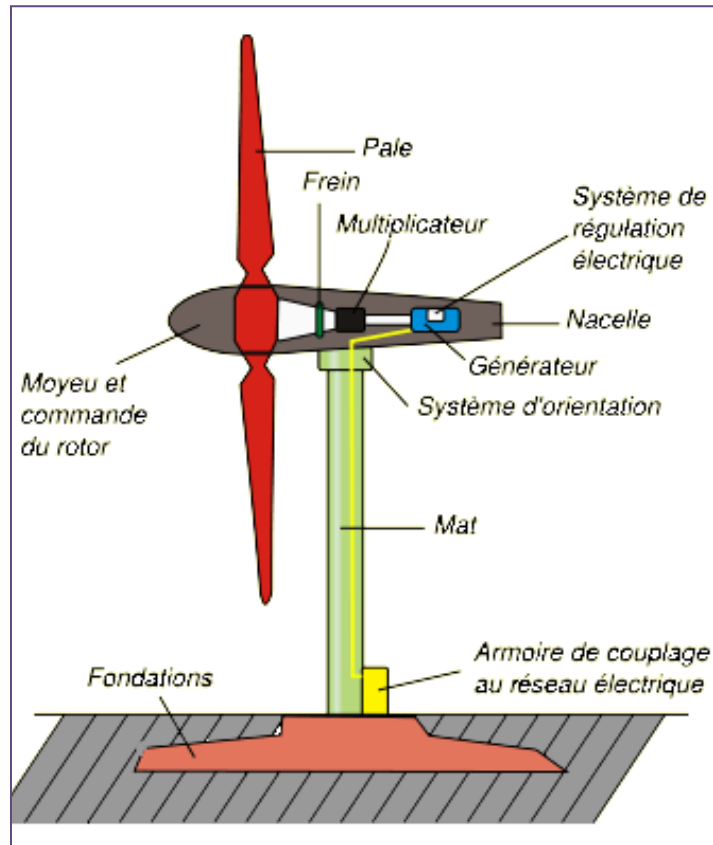


**Figure 6 :** Éolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b) [8]

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important.

#### **1.3.4.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne :**

Les instruments de mesure de vent placés au-dessus de la nacelle conditionnent le fonctionnement de l'éolienne. Grâce aux informations transmises par la girouette qui détermine la direction du vent, le rotor se positionnera pour être continuellement face au vent .Les pales se mettent en mouvement lorsque l'anémomètre (positionné sur la nacelle) indique une vitesse de vent d'environ 10 km/h et c'est seulement à partir de 12 km/h que l'éolienne peut être couplée au réseau électrique. Le rotor et l'arbre dit « lent » transmettent alors l'énergie mécanique à basse vitesse (entre 5 et 20 tr/min) aux engrenages du multiplicateur, dont l'arbre dit « rapide » tourne environ 100 fois plus vite que l'arbre lent. Certaines éoliennes sont dépourvues de multiplicateur et la génératrice est entraînée directement par l'arbre « lent » lié au rotor. La génératrice transforme l'énergie mécanique captée par les pales en énergie électrique La puissance électrique produite varie en fonction de la vitesse de rotation du rotor. Dès que le vent atteint environ 50 km/h à hauteur de nacelle, l'éolienne fournit sa puissance maximale. Cette puissance est dite « nominale » [8]



**Figure 7** : Éléments constituant une éolienne à axe horizontal [9].

### 1.3.5. Le solaire

Au sein de l'énergie solaire, il faut différencier le solaire photovoltaïque et le solaire thermique. Le premier génère de l'électricité grâce à la conversion de la lumière du jour. Ce sont les photons, des composants de cette lumière, qui libèrent les électrons des cellules photovoltaïques présentes sur les panneaux solaires. Ces cellules sont constituées de matériaux semi-conducteurs dont le plus communément utilisé est le silicium. Le courant continu ainsi produit est transformé ensuite en courant alternatif grâce à un onduleur. Quant à lui, le solaire thermique permet la production d'eau chaude grâce à des capteurs solaires. Il existe également des centrales électriques solaires, qui utilisent un procédé thermique à très haute température, ce qui induit la transformation de l'eau en vapeur pour alimenter une turbine et produire *in fine* de l'électricité.

#### 1.3.5.1. L'énergie solaire thermique :

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée), s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

Les formes d'utilisation finale de cette énergie sont :



- A basse température (30à100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- A moyenne température (100à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation,...
- A haute température (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques,

Pour atteindre des températures élevées, on utilise des héliostats (miroirs orientables) dans fours solaires (comme à odeillo en France). Plus la température à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie de transformation sont complexes et le prix élevé.

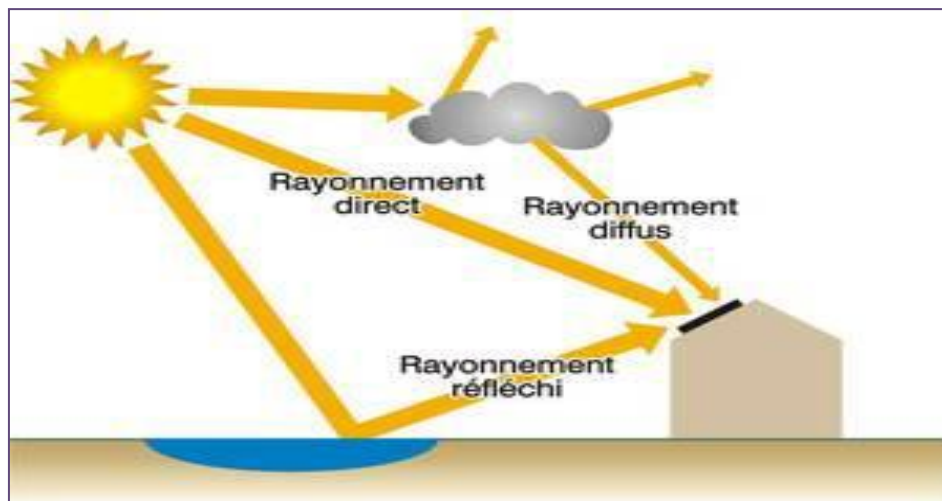
### 1.3.5.2. Le rayonnement solaire :

Nombre d'ondes électromagnétiques qui sont envoyées par le soleil sous la forme de faisceaux lumineux, où ces derniers contiennent des ondes qui peuvent être vues et certaines d'autres ne peuvent pas être vues, le spectre visible ayant une couleur allant du rouge au violet [10].

#### 1.3.5.2.1. Types de rayonnement :

Les rayons solaires traversant l'atmosphère terrestre sont répartis en [11] :

- ❖ Rayonnement direct : Ce sont des rayons qui tombent directement sans avoir aucune barrière (nuages, bâtiments ...).
- ❖ Rayonnement diffus : ce sont les rayons du soleil réfractés par les nuages.
- ❖ Rayonnement réfléchi : ce sont les rayons résultant de la réflexion de la lumière de solaire par les différents sols.



**Figure 8:** Les types de rayonnement solaire.

### 1.3.5.3. Panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque est un dispositif permettant de convertir une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Ceci est faisable grâce à de nombreuses cellules photovoltaïques qui constituent le panneau [12].

### ***1.3.5.3.1. Cellule photovoltaïque***

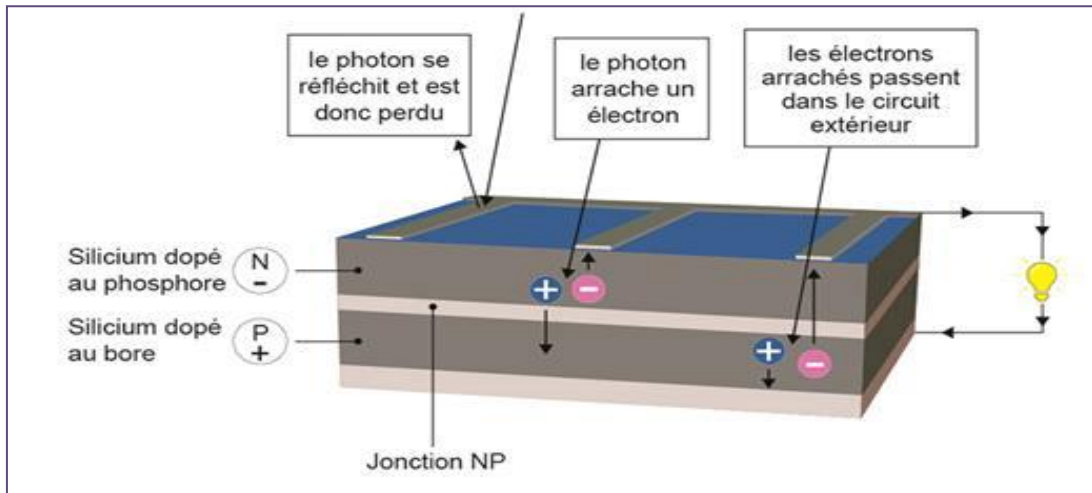
Une cellule photovoltaïque est définie comme étant un dispositif électronique constitué de semi-conducteurs qui permet de produire une différence de tension et générer un courant électrique lorsqu'il est exposé à la lumière [13]. Domaines d'application des panneaux photovoltaïques Les panneaux solaires sont appliqués dans plusieurs domaines tels que :

- ❖ L'usage domestique
- ❖ Les satellites
- ❖ Éclairage publique
- ❖ Agronomie

#### ***1.3.5.3.1.1. Fabrication des cellules photovoltaïques***

Les cellules photovoltaïques sont constituées de plusieurs couches, les plus importantes étant les deux couches principales sont N et P :

- N la substance de silicium dans laquelle le nombre d'électrons est prédominant (le matériau électronique).
- P représente la substance de silicium dans laquelle le nombre d'espaces est le
- la surface de contact entre P et N appelée la jonction PN.
- Une couche transparente est ajoutée à la surface avant de la cellule pour augmenter l'intensité d'absorption de la lumière.
- Une couche métallique est ajoutée à la surface avant et arrière de la cellule pour former les pôles de la cellule photovoltaïque ; la surface de la couche métallique ne dépassant pas les 5% de la totalité de la surface avant du panneau [11].



**Figure 9:** Les types de rayonnement solaire.

### 1.3.5.3.1.2. Les différents types des cellules photovoltaïques

#### a) Les cellules photovoltaïques monocristallins

Les panneaux solaires monocristallins sont utilisés dans les zones où l'intensité d'éclairage est élevée. Les cellules des panneaux solaires monocristallins sont en silicium pur dont le rendement énergétique se situe entre 18% et 24%, ce qui est le meilleur en termes de rentabilité [13].

Sachant que le Rendement énergétique est défini comme suit ;

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule  $P_{max}$  ( $I_{opt}$ ) et la puissance solaire incidente. Il est donné par [14]

$$\eta = P_{max}/P_{inc} = I_{opt} \times V_{opt}/P_{inc}$$

Avec  $P_{inc}$  égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des générateurs PV. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

#### b) Les cellules photovoltaïques poly cristallins

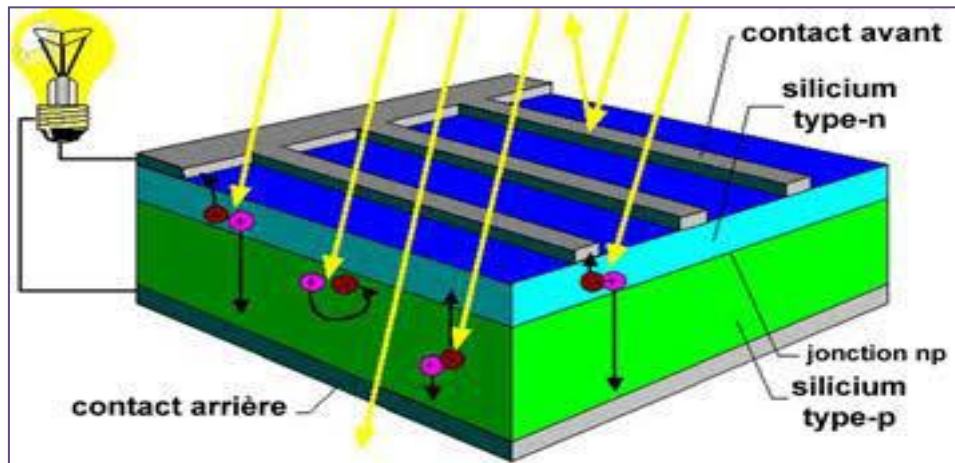
La cellule des panneaux solaires poly cristallins est formée d'un groupe de cristaux de silicium de taille diverse. Ce type de plaque est le plus utilisé au monde, car li présente le meilleur apport prix-rendement sachant que son rendement varie entre 14% et 18% [13].

#### c) Les cellules solaires amorphes

Enfin, il y a les panneaux photovoltaïques à base de cellules amorphes. Ce type de plaque est utilisé dans les endroits où l'intensité lumineuse est faible. Les cellules de ce type de plaque sont en silicium gazeux avec un rendement compris entre 5% et 7%. Ces plaques se distinguent par leur couleur grise [13].

### 1.3.5.3.1.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lors de l'absorption d'une quantité suffisante de photons de lumière ou de rayonnement solaire, une génération de paires électrons trous se produit. En effet, la présence d'un champ électrique interne dans une jonction P-N et qui est dû à l'ionisation des atomes va permettre aux paires électroniques de se déplacer et par conséquent de générer un courant continu. Le courant du panneau est la somme des courants de différentes cellules [15].



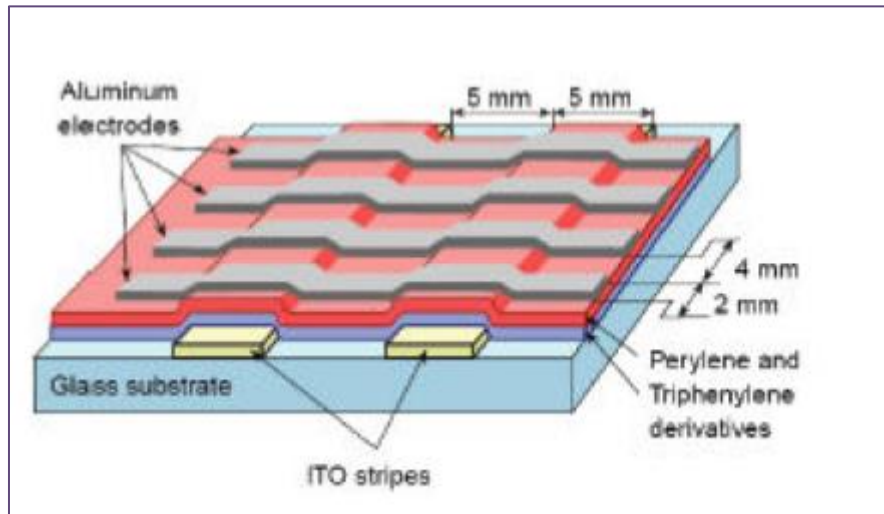
**Figure 10:** Les types de rayonnement solaire.

### 1.3.5.3.2. Nouvelles technologies photovoltaïques :

On utilise de plus en plus de matériaux organiques dans le domaine de l'optoélectronique, avec des perspectives d'électronique organique voire moléculaire, pour l'éclairage à l'aide de diodes électroluminescentes organiques (OLED : Organic Light- Emitting Diode). Bien que les optimisations des matériaux à mettre en œuvre ne soient pas les mêmes, le domaine du photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques de l'optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre.

Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits HOMO (Highest occupied molecular orbital) et des niveaux dits LUMO (Lowest unoccupied molecular orbital). En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante (fluorescence, luminescence) plutôt que se convertir en chaleur comme vu précédemment pour les filières inorganiques. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants pour être effectuée efficacement. Si elles peuvent être séparées et transportées vers

un circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type tel que celle présentée en Figure 11.



**Figure 11:** Schéma de principe d'une cellule organique.

Pour en faire des cellules organiques PV à part entière dans le futur, il faut améliorer les propriétés de création de paires électron-trou dans des molécules organiques ou des polymères mais également développer des méthodes de séparation des paires en associant un matériau accepteur et un matériau donneur, grâce à des positions différentes des bandes énergétiques. On parle dans ce contexte de matériaux LUMO et HOMO. Un des points les plus difficiles est la séparation de ces deux phases qui ont tendance à se mélanger car les matériaux sont solubles l'un avec l'autre.

Cependant une avancée importante a permis de séparer spontanément les donneurs et les accepteurs en rendant les matériaux non solubles [19, 20]. Dans le cas des polymères, tout se passe comme si on avait deux catégories de fibres intimement mélangées, l'une conduisant les électrons et l'autre les trous [21].

D'autres recherches se sont orientées vers un modèle de cellule photovoltaïque à la fois organique et inorganique (cellules hybrides) qui offre de nombreux avantages par rapport aux cellules traditionnelles. Ainsi, il a été élaboré une cellule nanocristalline qui imite la photosynthèse des plantes. Utilisées depuis longtemps dans les lasers à colorants ou les matériaux pour l'optique, l'utilisation efficace des molécules de colorants organiques dans le domaine du photovoltaïque, fut découvert en 1991 par Michael Graetzel. Des molécules organiques pigmentées (colorant), absorbent la lumière et libèrent ainsi des électrons. Les électrons sont véhiculés vers l'anode par une couche poreuse de dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), un

matériau semi-conducteur inorganique. A l'anode, les électrons sont dirigés vers un circuit externe où leur passage produit de l'énergie électrique [24]



**Figure 12:** Cellule solaire tout organique sur substrat souple. [24]

Le rendement de ces cellules solaires organiques est encore inférieur à 3% à cause justement de la nature du mélange et des problèmes de recombinaisons électroniques [24].

L'oxydation de la cellule est encore un autre problème auquel il faut se pencher en recherche pour trouver des solutions viables à long terme. Malgré tous ces inconvénients, le développement de ces cellules risque de persister à l'avenir car elles présentent une grande facilité de fabrication. En effet, les matériaux actifs peuvent s'étaler sur de grandes surfaces. Comme ces cellules peuvent facilement se développer sur matériaux souples, leur flexibilité quasi naturelle comme le montre la Figure 12 est également un atout. Le coût de ces cellules organiques est inférieur à celui des cellules à colorants et elles peuvent même être biodégradables. Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques de production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des candidates sérieuses à fort potentiel de développement photovoltaïque à long terme.

#### **1.3.6. Conclusion :**

Tout au long de ce chapitre on a définies différentes énergies renouvelables, leur avantages et inconvénients ou nous nous sommes rendus compte qu'ils pénètrent dans le système électrique actuel avec des rôles substantielles, l'un de ces derniers consiste atténuer le réchauffement planétaire et la pénurie d'énergie pour pallier la carence D'autant plus qu'elles deviendront inévitables à utiliser plus on se rapprochera de l'épuisement des énergies fossiles

**Chapitre 02**  
**Systeme d'énergie multi source**

## INTRODUCTION :

Pour un développement durable, le recours à l'utilisation des systèmes énergétiques à sources d'énergies renouvelables est devenu indispensable. Les solutions technologiques nouvelles proposées par les générateurs hybrides, même si elles sont très complexes comparativement aux solutions courantes mono source, présentent par

Contre un intérêt évident considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient vraiment attractif. Cependant, ces solutions exigent au préalable un dimensionnement laborieux basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation à l'amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval et un savoir faire que seule l'expérience dans l'ingénierie des systèmes énergétiques pourra assurer.

Dans ce chapitre, nous exposerons les différentes caractéristiques des systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables- conventionnelle. Enfin, nous nous ne nous intéresserons seulement qu'au système hybride PV-triboélectrique

## 2. Systèmes hybride :

### 2.1. Définition D'un système hybride :

Un système hybride est un système qui fait intervenir au moins deux sources d'énergie renouvelable comme un panneau photovoltaïque, une éolienne, une pompe hydraulique,... etc.

Souvent, ces sources renouvelables sont associées à une source conventionnelle comme un générateur diesel, un matériaux intelligents ou capteur thermique, nécessaire pour délivrer une puissance en continue/alternatif. En plus des sources d'énergies renouvelables, les systèmes hybrides associent des dispositifs de stockage comme les batteries, les super condensateurs, les piles à combustible,...etc. Les systèmes hybrides dits "isolés" fonctionnent en autonomie par rapport aux réseaux de distribution électriques.

L'objectif principal d'un système hybride est de répondre à la demande de la charge en favorisant l'énergie produite par les sources renouvelables par rapport à celle fournie par les sources auxiliaires comme le groupe Diesel.....

La performance d'un système hybride en termes de rendement et de durée de vie, est influencée d'une part par la conception, c'est-à-dire par le dimensionnement des différentes



composantes qui le constitue, la technologie de ces composantes, l'architecture,...etc. D'autre part, cette performance dépend aussi du choix de la stratégie de gestion considérée.

## 2.2. Classification :

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues.

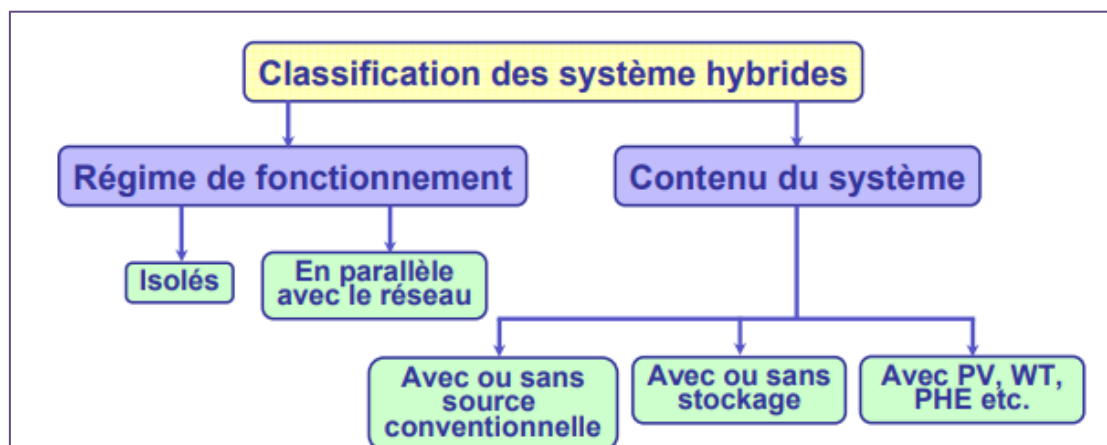


Figure 13: classification des systèmes hybrides.

## 2.3. Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc.

## 2.4. La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière. Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc ... La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une

combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

Mais actuellement les développements sur les systèmes hybrides ont été basés sur de nouvelles technologies (sources renouvelables-matériaux intelligents). Les matériaux intelligents sont des matériaux possédant une ou plusieurs propriétés qui peuvent être considérablement modifiées de manière contrôlée par des stimuli externes tels que des contraintes mécaniques, la température, l'humidité, le pH, la lumière, les champs électriques ou magnétiques, etc. C'est la raison pour laquelle les matériaux intelligents sont aussi appelés matériaux sensibles aux stimuli.

### **2.5. Les différents types de systèmes PV-hybride :**

On appelle « centrale PV hybride », la combinaison d'un générateur solaire avec un ou plusieurs générateurs utilisant d'autres sources d'énergie primaire pour la production d'électricité décentralisée en vue de palier aux carences de l'énergie solaire et de réduire son coût d'installation.

Il existe plusieurs types de systèmes PV hybrides pour la production d'électricité décentralisée. Dans cette étude, nous ne nous intéresserons qu'à différents systèmes hybrides (PV-diesel, PV-EOLIENNE, PV avec les matériaux intelligents...)

### **2.6. Études des structures de systèmes hybrides :**

#### **2.6.1. Système hybride avec source d'énergie conventionnelle :**

C'est une structure dotée d'une source d'énergie conventionnelle définie généralement par un générateur diesel et une autre source d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne,...etc.).

#### **2.6.2. Système photovoltaïque/source conventionnelle :**

C'est un système doté d'une source photovoltaïque et un générateur diesel défini comme source conventionnelle. Il est utilisé très souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud où le potentiel solaire est important.

Le principe de ces systèmes a été décrit dans les travaux de [16] et [17] qui ont cité le cas de l'Arabie saoudite. Le cas du Maroc a été cité par [18], le cas des Maldives a été abordé par [19] et la Corse par [20].

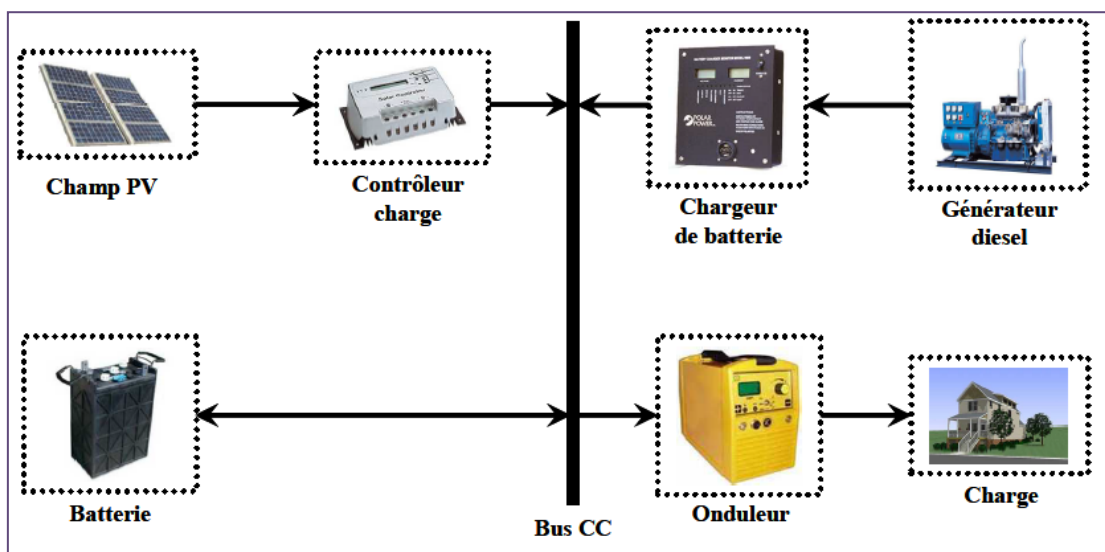
En mode de fonctionnement autonome, l'objectif de ces systèmes est d'alimenter sans interruption une maison [20], un bâtiment de logements [16] ou administratif [17] ou un village [21][22], D'autres systèmes alimentent des centres de recherche [25] où sont également connectés au réseau électrique [19].

Dans [24][18][22], ces systèmes autonomes contiennent souvent des batteries et d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesel peuvent entrainer des générateurs continus ou alternatifs. Les consommateurs demandent souvent du courant alternatif ; on distingue alors différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel. Dans les travaux de [24] ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques.

La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur.

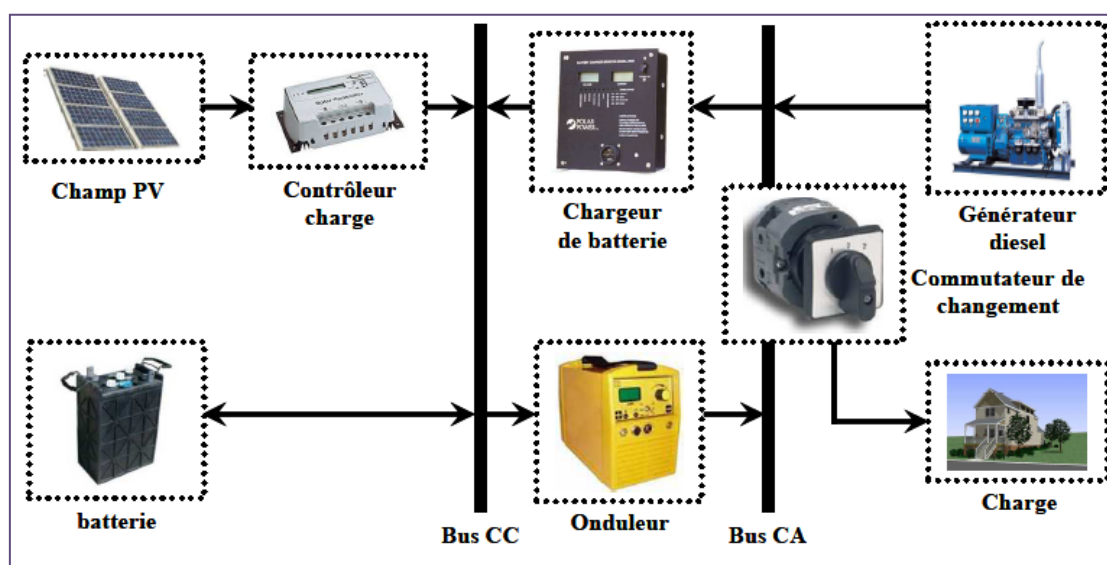
Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie. Des systèmes de ce type ont été étudiés par différents chercheurs [25][20][23].

Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la Figure 14



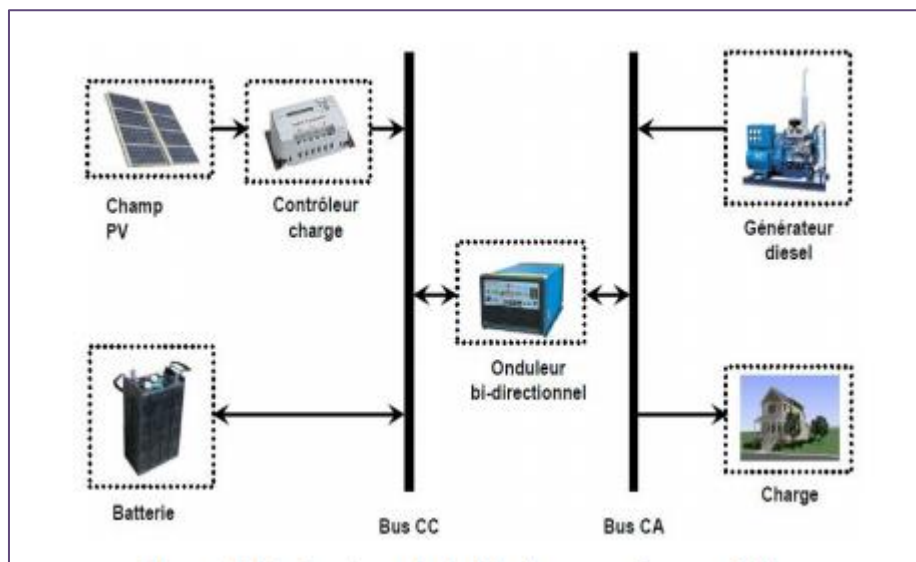
**Figure 14:** système hybride source photovoltaïque et un générateur diesel a un pont de redressement.

La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques inconvénients. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur. L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur diesel peut charger la batterie par l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride. Un tel système fut étudié par [18]. Le schéma du système est présenté sur la Figure 15



**Figure 15:** système hybride source photovoltaïque et un générateur diesel a un pont de redressement.

La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure 16



**Figure 16:** Système hybride à connexion parallèle.

Des systèmes hybrides avec une telle structure ont été étudiés par [23][24] [Sha 03][Old 04][ Kli 06].

Les travaux de [27][25][20] sont consacrés aux résultats issus de systèmes existants et installés hybrides photovoltaïques/source conventionnelle.

D'autres chercheurs examinent la possibilité d'implantation de panneaux photovoltaïques comme source d'énergie supplémentaire dans des installations existantes avec une source conventionnelle [22][27].

Dans [16] et [26], des études théoriques sur l'analyse des processus qui prennent place au sein du système, par contre [28]et [20] ont consacré leurs travaux sur l'optimisation du dimensionnement du système hybride et [29] sur celle de la stratégie de gestion de l'énergie.

### 2.6.3. Système hybride photovoltaïque-éolien

#### 2.6.3.1. Présentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Fig.17), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit. En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

\*Exploitation du système sans interruption

\*Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système

\*Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

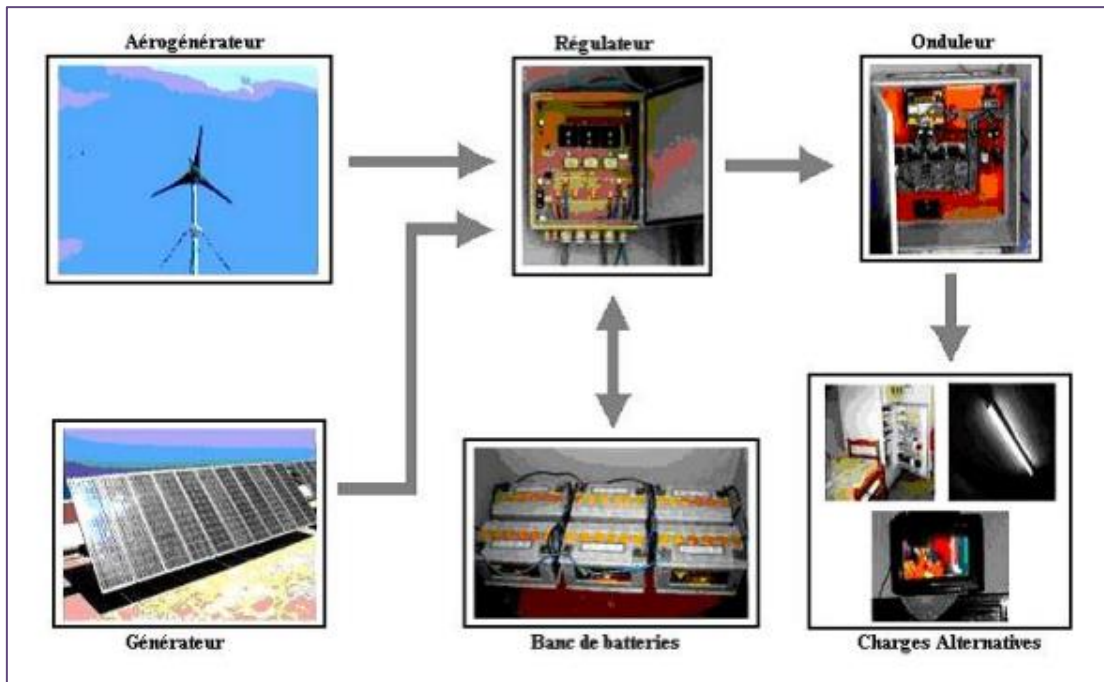


Figure 17: Schéma synoptique du système hybride étudié.

### 2.6.3.2. Système de conversion d'énergie hybride

Ce système est caractérisé par deux sources énergétiques (photovoltaïque et éolienne) : le générateur photovoltaïque (PV) est connecté à la charge par un convertisseur DC/DC commandé en MPPT (Maximal Power Point Tracking), et la turbine éolienne (WT) entraîne un générateur à aimants permanents (GSAP) qui lui même est connecté à la charge par un convertisseur AC/DC commandé. Le couplage des deux systèmes est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, comme l'indique la figure 18.

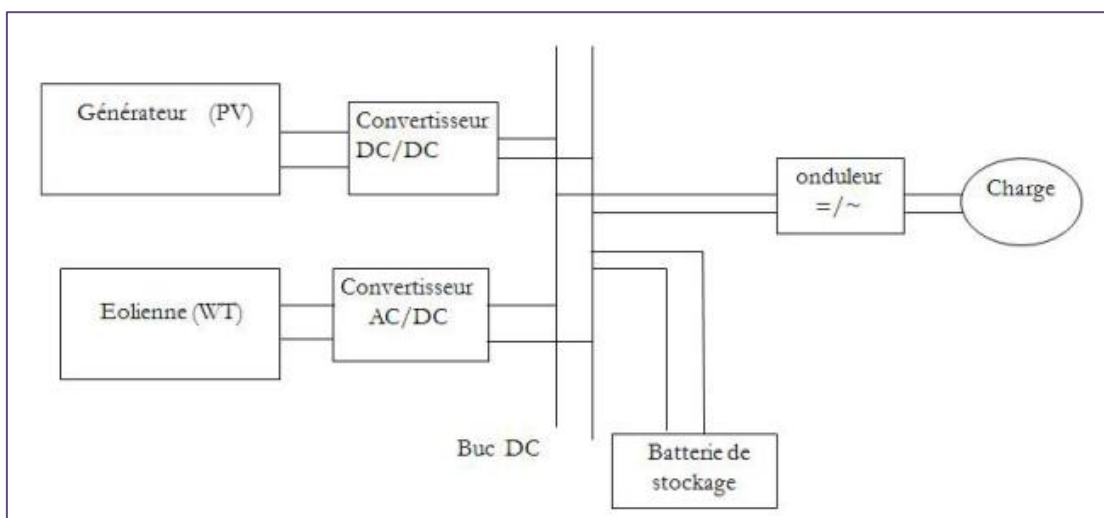


Figure 18 : Schéma de principe du système hybride photovoltaïque- éolien.

### 2.6.3.3. Principaux composants du Système d'énergie hybride photovoltaïque – éolien

Les systèmes hybrides photovoltaïque-éolien comprennent généralement :

- ❖ un système générateur.
- ❖ un système de régulation.
- ❖ un système de stockage.
- ❖ des équipements de puissance.
- ❖ une charge.

Le système générateur est composé par les modules photovoltaïques et les aérogénérateurs.

Il est indispensable que les deux fonctionnent à la même tension nominale 12 ou 24 V et en courant continu. La régulation doit tenir compte du fait qu'il s'agit de deux courants de nature différents :

- ❖ Le photovoltaïque assez constant et d'un seuil bas .
- ❖ L'éolien, très variable.

Le système de régulation se chargera donc de faire fonctionner le système générateur en un point optimal pour la charge des batteries

### 2.6.3.4. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel :

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergies renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie

Une partie des travaux existants dans la littérature est orientée vers des systèmes installés [30][31][Phu 07][32] et l'autre partie vers la conception de nouveaux systèmes [33].

On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York [34] ou en Arabie saoudite [35].

D'autres auteurs ont consacré leurs travaux à l'optimisation de la configuration du système selon divers critères : probabilité de perte de charge [36], combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles [37] auxquels s'ajoute la charge non satisfaite minimale [39].

Pour trouver le système optimal, les chercheurs ont utilisé plusieurs méthodes : [37] ont utilisé les algorithmes de Pareto, [39] des algorithmes génétiques et évolutifs et [36] de la logique floue.



**Figure 19:** Schéma physique de la chaîne de conversion d'énergie électrique hybride (photovoltaïque-éolienne- groupe électrogène) .

Ces systèmes sont conçus pour alimenter des maisons et des refuges [38] ou des villages [30]. Ils peuvent être autonome [35][31][37] ou interconnectés avec le système électrique du pays[36].

Le stockage peut être sous forme de batteries [33][37], de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible [38] ou d'une combinaison des deux [39]. Dans leurs travaux, développent une stratégie optimale de gestion du dispositif de stockage.

### 2.6.3.5. Système hybrides PV-T:

Un capteur photovoltaïque thermique (PV-T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue, en chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau, air ou bi-fluide) et selon le type d'absorbeur (plan, concentrateur ...).

#### 2.6.3.5.1. Concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique :

Le concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Il est caractérisé par une combinaison sandwich séparant air et eau. Le fluide caloporteur est canalisé, ce qui permet une circulation forcée. La face inférieure est isolée et ne comporte pas d'absorbeur



### 2.6.3.5.2. Concept hybride PV/T à eau :

Le module photovoltaïque, qui a pour rôle la conversion des rayons solaires en une énergie électrique et se compose de trois couches: la première est une couche de verre, dont la face avant est exposée au rayonnement, la seconde couche qui contient les cellules photovoltaïques et la troisième couche représente la face arrière du module, réalisé en tedlar. une plaque en acier galvanisé qui a pour rôle d'absorber la chaleur, une tuyauterie sous forme de radiateur ou de serpentin, soudé à la plaque absorbante garantissant un bon contact thermique entre les deux éléments, et où circule un fluide caloporteur qui a pour rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la plaque absorbante. Enfin, pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolation.

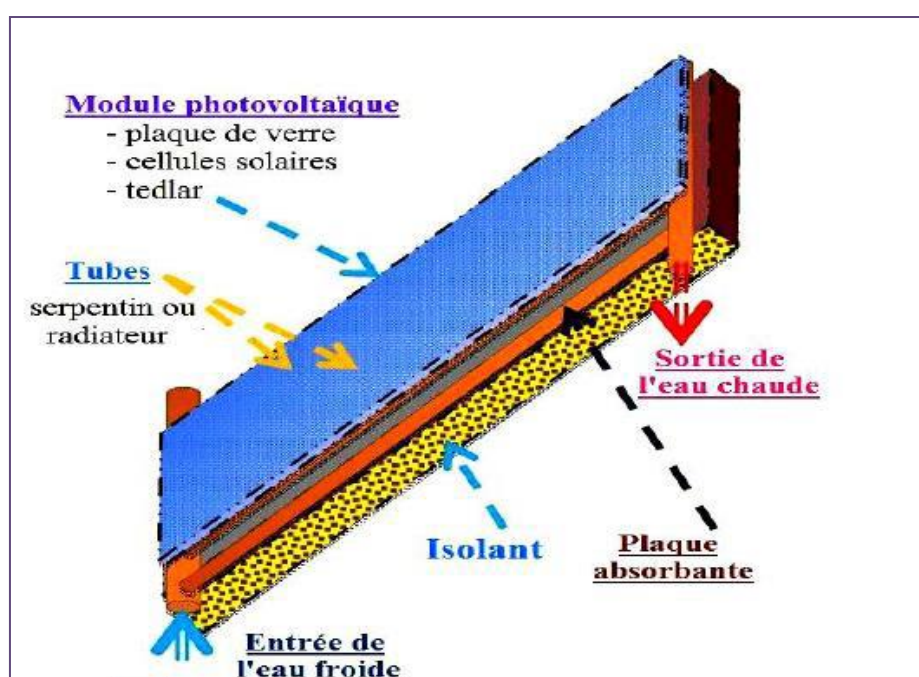
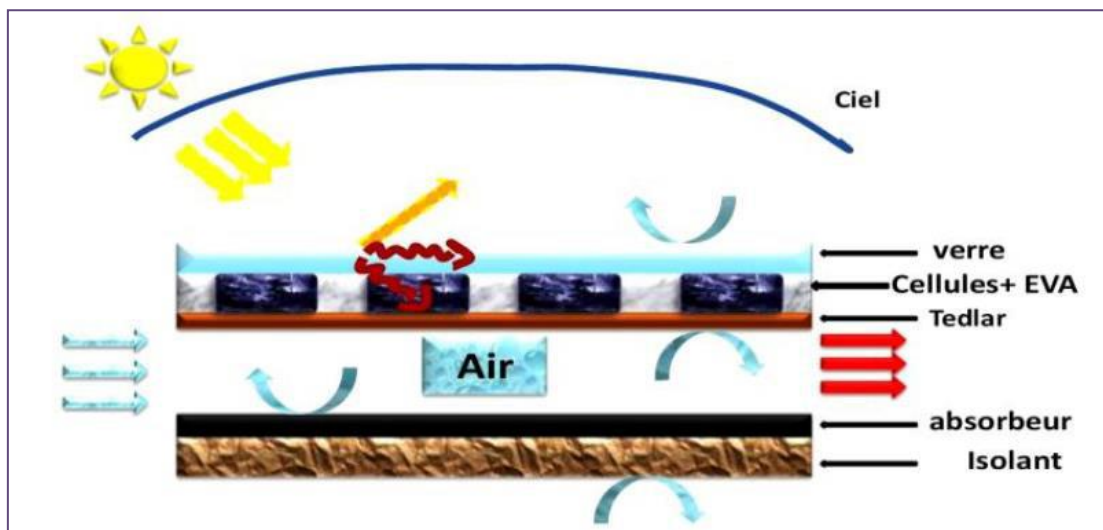


Figure 20: Capteurs solaires hybride PV/T à eau.

### 2.6.3.5.3. Étude d'un capteur hybride PV/T à air :

Le système hybride photovoltaïque/thermique à air regroupe un module photovoltaïque, qui produit de l'électricité, à un capteur thermique, disposé derrière ce panneau. La chaleur résiduelle qui vient du capteur photovoltaïque, se transfère par conduction et convection à l'intérieur du canal du capteur thermique, si bien, qu'une ventilation du capteur photovoltaïque permet d'améliorer sa productivité électrique. L'utilisation de ces capteurs hybrides ne se limite pas à l'usage comme chauffage, mais ils peuvent être utilisés comme moyen de ventilation. Il faut noter aussi, la grande adaptabilité de ces systèmes aux différentes configurations dans les bâtiments



**Figure 21:** Coupe transversale dans un capteur hybride PV/T à air

### 2.6.3.6. Hybridations photovoltaïques-matériaux intelligents :

Technologie de récupération d'énergie capable de convertir efficacement l'énergie renouvelable dans l'environnement à l'électricité est essentielle pour alimenter l'électronique portable à petite échelle de la prochaine génération [40][41]. Par conséquent, développement de systèmes de récupération d'énergie, y compris photovoltaïques [42][43], dispositifs piézoélectriques, triboélectriques et pyroélectriques[44][45] a impliqué des efforts de recherche intensifs. Actuellement, avec l'émergence de l'Internet des objets (IoT), énergie durable et fiable des fournitures sont nécessaires pour les appareils électroniques intérieurs hors réseau à faible consommation d'énergie. Les cellules photovoltaïques représentent une source d'énergie idéale pour l'électronique intérieure de faible puissance, car ils peuvent convertir efficacement éclairage intérieur de faible intensité en énergie électrique [46][47]. Par rapport au silicium et autres cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs inorganiques, organiques les cellules photovoltaïques (OPV) présentent des perspectives prometteuses car la puissance source d'appareils basés sur l'IoT en intérieur en raison de ses avantages attrayants, tels que faible coût, temps de récupération d'énergie rapide, poids léger, flexibilité, aptitude au traitement de la solution et semi-transparente [48]. De plus, comme les matériaux actifs dans les OPV ont une accordabilité facile de l'absorption spectres, il est très facile de les faire correspondre avec les lumières intérieures [49]. Et semi-transparente. Cependant, les performances des OPV sont en retard par rapport au silicium et d'autres cellules photovoltaïques à base de semi-conducteurs inorganiques qui doivent être amélioré pour des applications intérieures viables. Une solution pour la limitation des performances consiste à intégrer des cellules OPV dans d'autres collectes

d'énergie cellules, un concept appelé récolte d'énergie hybride. Le système hybride compense les aspects vulnérables de chaque cellule, augmentant ainsi la puissance production [50][51].

Compte tenu de sa capacité et de sa faisabilité pour la récupération d'énergie à l'intérieur des activités humaines, le nano générateur triboélectrique (TENG), impliquant l'effet de couplage de l'électrification de contact et électrostatique l'induction, semble convenir à un système hybride avec des cellules OPV vers les applications intérieures [52] En plus de développer différents Systèmes autonomes basés sur TENG, de nombreux systèmes hybrides incorporant TENG et d'autres cellules de récupération d'énergie ont été signalés [53][54]. Cependant, sur la base de nos connaissances, aucun rapport n'est disponible sur un hybride Système de récupération d'énergie OPV – TENG.

Dans cette étude, nous introduisons d'abord un système hybride OPV-TENG comprenant un hétérojonction en vrac non fullerène à base de PM6: IT4F (BHJ) OPV et un TENG à base de billes de Cu pour récolter simultanément et individuellement l'énergie solaire et l'énergie mécanique. La production d'électricité les performances du système OPV – TENG intégré en série sont améliorées par la combinaison TENG et OPV, comme en témoignent les tests utilisant des mouvements léger et humain. En outre, nous démontrons également efficace et charge rapide d'un condensateur et d'une batterie lithium-ion (LIB) par un hybride Dispositif d'auto chargement basé sur OPV – TENG. Cette étude met en évidence une méthode prometteuse pour collecter simultanément de l'énergie à partir de plusieurs sources associé à la vie intérieure humaine.

## **2.7. Triboélectricité :**

### **2.7.1. Phénomène triboélectricité :**

Mentionnée pour la première fois par Thalès de Milet, l'un des Sages de la Grèce Antique qui l'observa entre l'ambre et la lodestone (pierre magnétique), la triboélectricité est un phénomène par lequel certains matériaux acquièrent une charge électrique statique de surface au contact de matériaux de natures différentes.

De nombreux facteurs peuvent jouer un rôle dans cet effet. Mécaniquement, il est généralement amplifié par la friction des surfaces (dans le cas où l'une au moins est isolante électrique), les contacts locaux se multipliant. Les conditions ambiantes ont aussi une influence. Par exemple, il a été constaté qu'une exposition aux rayons ultraviolets pouvait avoir un effet non négligeable [55]. La présence d'eau entre les deux matériaux peut diminuer l'importance des charges de surface induites, car elle permet la conduction électrique entre les deux surfaces et donc leur décharge, mais aussi les recombinaisons électroniques au sein d'une même surface

isolante : des électrons piégés dans des zones (états) de hautes énergies peuvent alors se déplacer vers des états de plus basses énergies disponibles ailleurs sur la surface [56]. D'un autre côté, l'humidité relative peut également entraîner l'apparition d'ions participant à l'échange triboélectrique [57].

La nature des charges échangées lors du contact est une question complexe, et dépend des matériaux en présence. Par exemple, Diaz et Felix-Navarro [58] ont étudié la corrélation entre les charges de surface induites d'une part, et les potentiels d'ionisations ou les équilibres acido-basiques. Leurs résultats suggèrent que :

- dans le cas du contact entre deux métaux, les charges transitant sont en majorité les électrons, du fait de la différence de travail de sortie de ces métaux ;
- dans le cas de deux polymères, il s'agirait plutôt d'un échange ionique

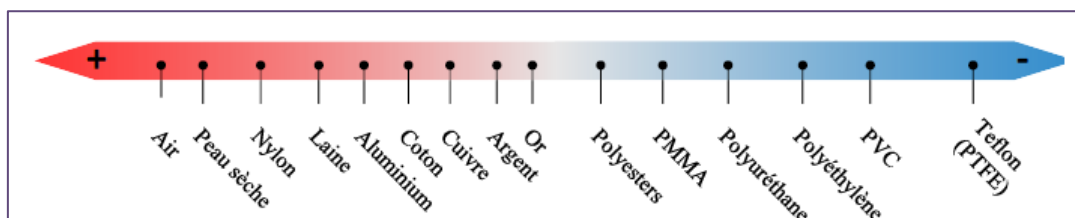
Pour des schémas de contact hybrides (par exemple métal/polymère), les charges sont donc probablement partagées entre ces deux types de porteurs, d'autant que les conditions ambiantes (humidité, pH...) peuvent favoriser l'un ou l'autre. Il a de plus été montré [59] que la charge induite entre un métal et un polymère est souvent quasi-linéaire par rapport au niveau de Fermi du métal utilisé, ce qui indiquerait la possibilité d'associer aux polymères (hormis quelques exceptions) un « travail de sortie effectif », grandeur locale dépendant des impuretés, de l'état de surface et des défauts dans la structure cristalline du polymère, afin d'expliquer le transfert d'électrons lors du contact entre les deux matériaux.

L'effet triboélectrique découle donc d'une multitude de paramètres liés à la nature des matériaux utilisés, à l'état des surfaces ou aux conditions d'environnement, ce qui le rend difficile à modéliser et à contrôler. Il est cependant présent dans de nombreuses situations ordinaires. Généralement considéré comme un phénomène parasite et néfaste dans plusieurs industries (aéronautique, électronique, chimie), il peut aussi représenter une source de polarisation exploitable par des structures électrostatiques adaptées.

### **2.7.2. Matériaux et séries triboélectriques :**

Il n'existe pas de liste exhaustive des matériaux triboélectriques. Traditionnellement, un certain nombre sont répertoriés dans des échelles empiriques appelées « séries triboélectriques » (FIGURE 22), qui classifient les matériaux suivant leur propension à se charger plus ou moins positivement ou négativement [58][60]. Cette approche semi-quantitative est commode pour pouvoir choisir les matières à employer, même si son caractère macroscopique ne suffit pas à caractériser proprement le phénomène triboélectrique (il a par exemple été observé des charges

induites entre deux surfaces planes de même nature, ce qui devrait être impossible du point de vue des séries triboélectriques mais s'explique par la non-uniformité microscopique des surfaces [61]). Précisons également que ces échelles sont relatives, et généralement constituées vis-à-vis d'un matériau de référence. Ainsi, un matériau plutôt « positif » (par exemple la laine) peut se charger négativement au contact d'un matériau au caractère « tribopositif » plus important (la peau).



**Figure 22** : Exemple de série triboélectrique (construite d'après [81])

On voit qu'un certain nombre de matières à caractère triboélectrique sont d'ores et déjà utilisées dans l'industrie textile (nylon, coton, ou encore le téflon qui est un constituant principal des tissus Gore-Tex®). L'expérience peut en être faite par ailleurs dans la vie de tous les jours, lorsqu'une personne ressent une décharge (« châtaigne ») en touchant d'une poignée de porte par exemple : la peau fait office d'électrode en contact avec un vêtement qui avait été chargé par frottement avec un élément de l'environnement ; ou bien la peau avait été elle-même chargée lors d'une interaction

### 2.7.3. L'exploitation de l'effet triboélectrique :

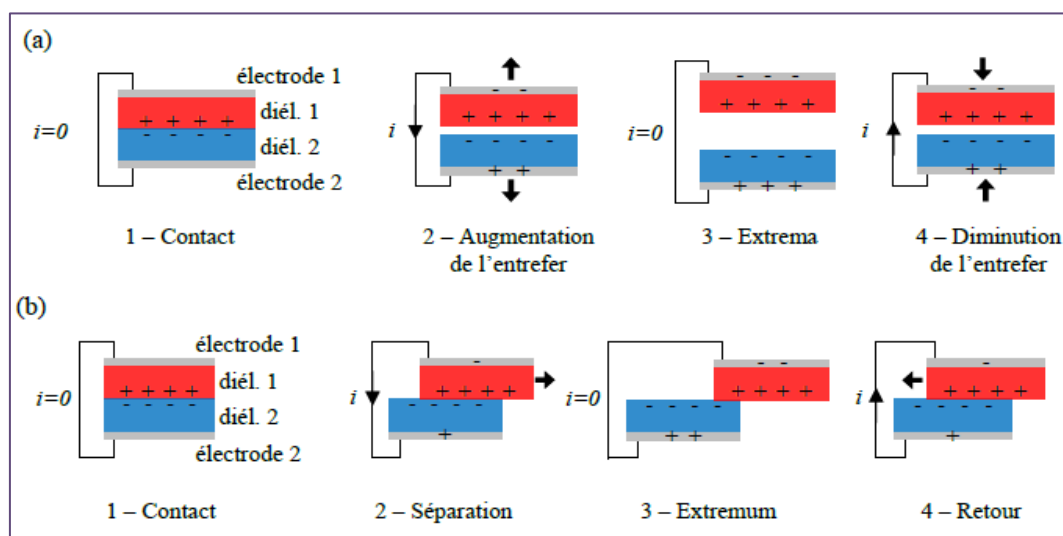
Bien que l'effet triboélectrique soit connu depuis longtemps, du moins par son expérience, l'idée de l'employer à des fins de génération de charges électriques n'est survenue que tardivement. Les générateurs triboélectriques « traditionnels », représentés par les travaux emblématiques de Wimshurst (1880) et Van de Graaf (1929), exploitent le phénomène pour accumuler des charges créées par tribo-électrification sur une partie tournante (roue ou courroie) et induire une tension entre les deux électrodes (jusqu'au point critique où intervient la décharge). Ces tensions pouvant être très élevées suivant les dimensions des générateurs (plusieurs millions de volts), ceux-ci ont été exploités pendant quelques temps à partir du milieu du XXe siècle pour l'accélération de particules.

Les premiers travaux proposant le concept de « nano générateurs triboélectriques » ont eu lieu dans les années 2010, et s'inscrivent comme une alternative à la piézoélectricité pour l'exploitation des sources d'énergie mécanique [62]. L'appellation « nano » est relative aux dimensions des structures des surfaces de friction des dispositifs, par exemple composées de nanofils de quelques dizaines de nanomètres de diamètre. Il a en effet été observé [63] que ce

type de structures pouvait augmenter la quantité de charges triboélectriques induites par le contact, du fait de l'agrandissement de la surface spécifique des matériaux (c'est-à-dire la surface développée, tridimensionnelle, et non sa projection planaire telle que perçue à l'échelle macroscopique). L'atout fondamental des nano générateurs est leur très faible épaisseur (souvent inférieure au millimètre), ce qui les rend avantageux du point de vue de l'intégrabilité, en particulier pour les applications textiles ciblées dans notre étude.

Ces nano générateurs s'appuient sur des architectures électrostatiques à capacité variable assez classiques, avec deux principaux modes de fonctionnement :

- ❖ Le mode « vertical », suivant lequel deux surfaces triboélectriques se chargent réciproquement lors du contact, puis sont séparées verticalement, entraînant l'apparition d'une différence de potentiel entre elles (FIGURE 23a).
- ❖ Dans le mode « horizontal », la séparation des charges est réalisée dans un même plan, par glissement relatif des deux surfaces (FIGURE 23b). Par rapport au mode précédent, le contact permanent peut permettre de générer et d'entretenir une charge de surface plus grande.



**Figure 23:** Illustrations du cycle triboélectrique (ici à deux diélectriques) pour chacun des deux modes, (a) « vertical » et (b) « horizontal ».

Un avantage du mode « horizontal » est qu'il est possible de « segmenter » le système (« grating », en anglais), comme illustré FIGURE 2-8. Par ce procédé, chaque déplacement égal à une subdivision entraîne une inversion de l'équilibre électrostatique du système. En d'autres termes, pour un déplacement relatif donné entre les plans glissants, un système segmenté plus « finement » produira un nombre plus important de cycles électrostatiques. Ceci permet de convertir une fréquence de stimulation mécanique basse (~1 Hz) en une haute fréquence

électrique, à laquelle est proportionnelle la puissance moyenne en sortie. De plus petits déplacements relatifs peuvent aussi être exploités. Toutefois, la limite de la segmentation est qu'elle augmente les capacités parasites, et l'amplitude de la variation capacitive est amoindrie, ainsi que l'énergie par cycle.

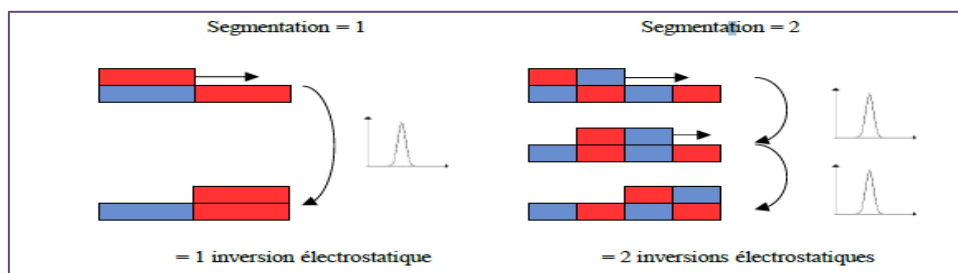


Figure 24: Récupération triboélectrique par surfaces glissantes – Intérêt de la segmentation.

2.7.4. Mode de séparation de contact verticale :

Nous utilisons la conception la plus simple de TENG comme exemple (Fig25.a) deux films diélectriques différents se font face et une électrode est déposée sur les surfaces supérieure et inférieure de la structure empilée. Un contact physique entre les deux films diélectriques crée des surfaces de charges opposées. Une fois que les deux surfaces sont séparées par un petit espace sous la levée d'une force externe, une chute potentielle est créée. Si les deux électrodes sont connectées électriquement par une charge, les électrons libres dans une électrode s'écouleraient vers l'autre électrode pour construire un potentiel opposé afin d'équilibrer le champ électrostatique. Une fois l'espace fermé, le potentiel créé par la charge triboélectrique disparaît, les électrons refluent

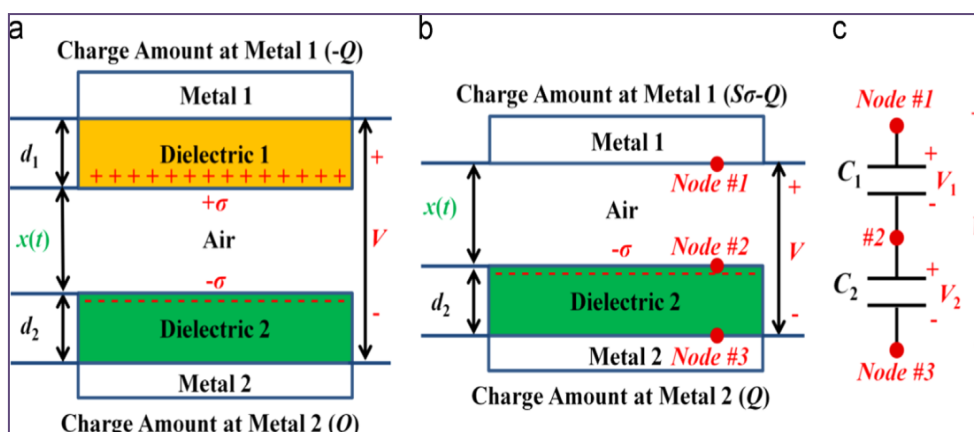
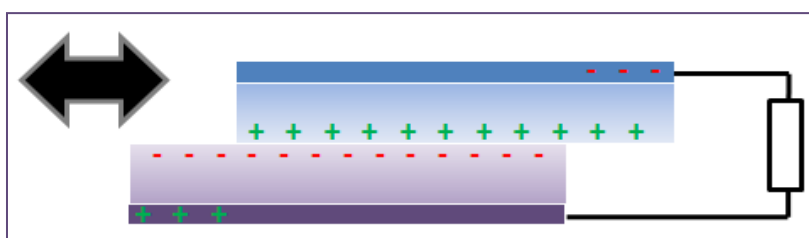


Figure 25 : Modèles théoriques pour (a) mode de contact à plaque parallèle à électrode attachée diélectrique-diélectrique TENG et (b) plaque parallèle conducteur-diélectrique à électrode attachée mode contact TENG. (c) Schéma de circuit équivalent pour plaque

### 2.7.5. Mode coulissant latéral [1] :

La structure de départ est la même que celle du mode séparation-contact verticale. Lorsque deux films diélectriques sont en contact, un glissement relatif parallèle à la surface crée également des charges triboélectriques sur les deux surfaces (Fig26) .Une polarisation latérale est ainsi introduite le long de la direction de glissement, ce qui pousse les électrons des électrodes supérieure et inférieure à s'écouler afin d'équilibrer pleinement le champ créé par les charges triboélectriques. Un glissement et une fermeture périodiques génèrent une sortie CA. Il s'agit du mode coulissant TENG. Le glissement peut être un mouvement plan, une rotation cylindrique ou une rotation de disque. Des études théoriques connexes ont été menées pour comprendre le mode de base et le réseau structuré TENG.



**Figure 26:** Le mode coulissant dans le plan TENG. [3]

### 2.7.6. Mode à électrode unique [1]

Les deux modes introduits dans Sectes. 1.1 Et 1.2 ont deux électrodes interconnectées par une charge. Ces TENG peuvent se déplacer librement afin de pouvoir fonctionner pour les étuis mobiles. Dans certains cas, l'objet qui fait partie du TENG ne peut pas être connecté électriquement à la charge car il s'agit d'un objet mobile, tel qu'un humain marchant sur un sol. Afin de récupérer l'énergie d'un tel cas, nous avons introduit une seule électrode TENG, dans lequel l'électrode sur la partie inférieure du TENG est mise à la terre Fig27. Si la taille du TENG est finie, une approche ou un départ de l'objet supérieur par le bas changerait la distribution locale du champ électrique, de sorte qu'il y a des échanges d'électrons entre l'électrode inférieure et le sol pour maintenir le changement potentiel de l'électrode. Cette stratégie de récupération d'énergie peut être à la fois en mode de séparation de contact et en mode de glissement de contact.



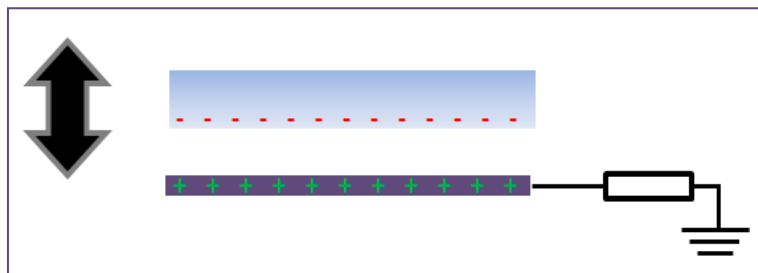


Figure 27: Mode TENG à électrode unique [3] .

2.7.7. Mode triboélectrique autonome [1]

Dans la nature, un objet en mouvement est naturellement chargé en raison de son contact avec l'air ou un autre objet, comme nos chaussures marchant sur des sols généralement chargés. Les charges restent en surface pendant des heures et le contact ou le frottement est inutile dans ce laps de temps car la densité de charge atteint un maximum. Si nous fabriquons une paire d'électrodes symétriques sous une couche diélectrique et que la taille des électrodes et la distance entre les deux sont du même ordre que la taille de l'objet en mouvement, l'objet s'approchant et / ou s'écartant des électrodes crée une distribution de charge asymétrique dans le milieu, qui fait circuler les électrons entre les deux électrodes pour équilibrer la distribution de potentiel locale (Fig28). L'oscillation des électrons entre les paires d'électrodes produit de la puissance. Il n'est pas nécessaire que l'objet en mouvement touche directement la couche diélectrique supérieure des électrodes, de sorte qu'en mode rotation, une rotation libre est possible sans contact mécanique direct, de sorte que l'usure des surfaces peut être considérablement réduite. Il s'agit d'une bonne approche pour prolonger la durabilité des TENG.

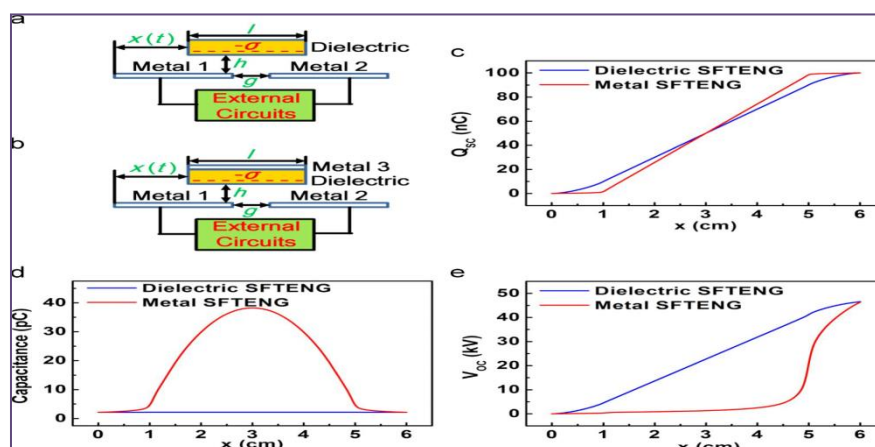
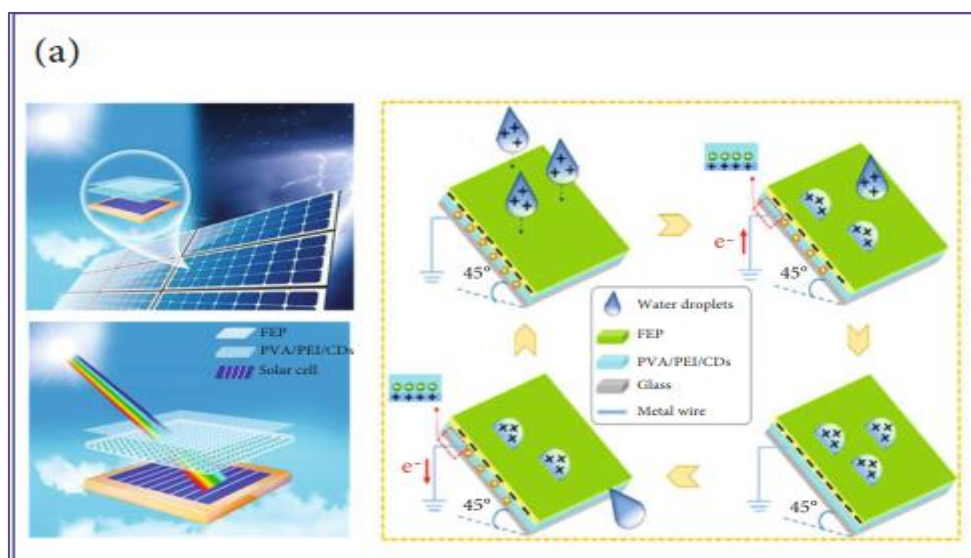


Figure 28: Modèles et caractéristiques de sortie de base des TENG libres en mode coulissant (a) Modèle FEM d'un SFTENG diélectrique typique. (b) Modèle FEM d'un SFTENG métallique typique. (c – e) Influence du matériau de la couche autoportante sur le caractéristique

### 2.8. Système de récupération d'énergie hybride (PV-TENG) :

Les énergies mécaniques omniprésentes, solaire et les énergies thermiques sont aussi une énergie propre et abondante sources dans la nature qui peuvent être utilisées. L'énergie solaire a été largement récupérés en utilisant des PV ces dernières années [64]. Cependant, les performances de PV sont grandement affectées par la temps comme les jours pluvieux ou nuageux lorsqu'il n'y a pas de soleil. Une stratégie réalisable pour ce problème consiste à hybrider les PV avec d'autres dispositifs de récupération d'énergie pour obtenir une récupération d'énergie dans des conditions météorologiques variables. TENG a fait ses preuves comme un récupérateur d'énergie fiable pour les gouttes de pluie récupération d'énergie basée sur le mécanisme de triboélectrisation aux interfaces liquide / solide [65]. Par conséquent, TENG peuvent être davantage intégrés aux SC en complément d'une énergie solaire infus fi sante les jours de pluie. Bien que plusieurs œuvres aient a démontré avec succès la faisabilité d'un tel type de hybridation [66-67], la transparence insuffisante de Les couches supérieures TENG et le coût élevé du processus antireflet limitent leurs applications pour une énergie e ffi cace et à grande échelle récolte. Pour résoudre ce problème, Wang et al. a proposé un cellule hybride constituée d'un silicone PV et d'un TENG avec un conducteur ionique hautement transparent utilisant un film composite à points de carbone, comme illustré sur la Figure 29[68].

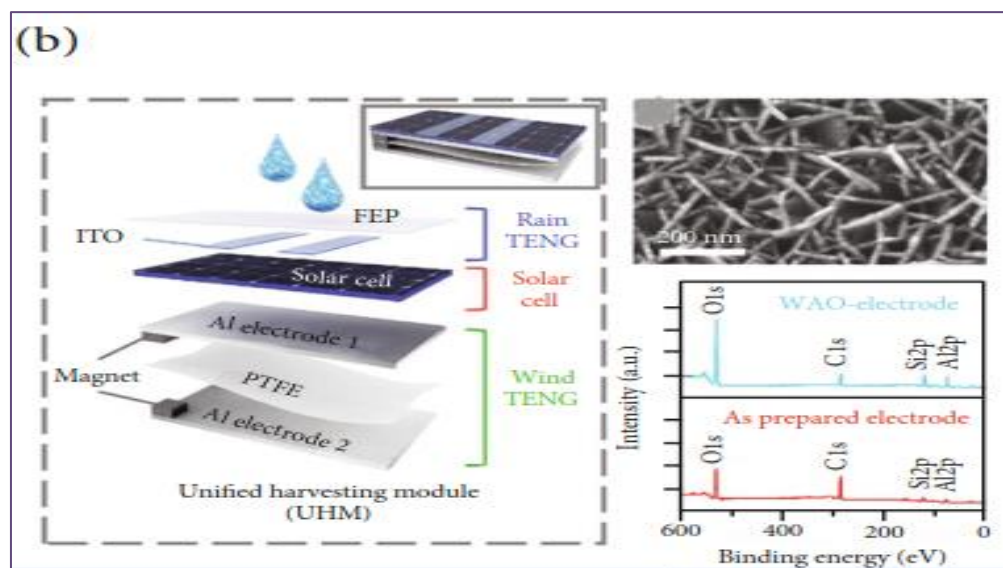


**Figure 29:** Un triboélectrique-photovoltaïque.

### 2.9. Cellule hybride pour la récolte des gouttes de pluie et de l'énergie solaire :

La transmittance de la couche supérieure TENG est nettement améliorée en le générateur hybride, augmentant ainsi le court-circuit de PV densité de courant et e ffi cacité de conversion de puissance (de 13,6% à 14,6%). En outre, la partie TENG peut récolter l'énergie des gouttes de pluie due à la triboélectrique fi cation induite sur la surface éthylène propylène fluoré (FEP) avec une puissance de sortie maximale de 13,9  $\mu\text{W}$ . Le générateur hybride fournit une méthode prometteuse pour récupérer simultanément l'énergie solaire énergie et énergie des

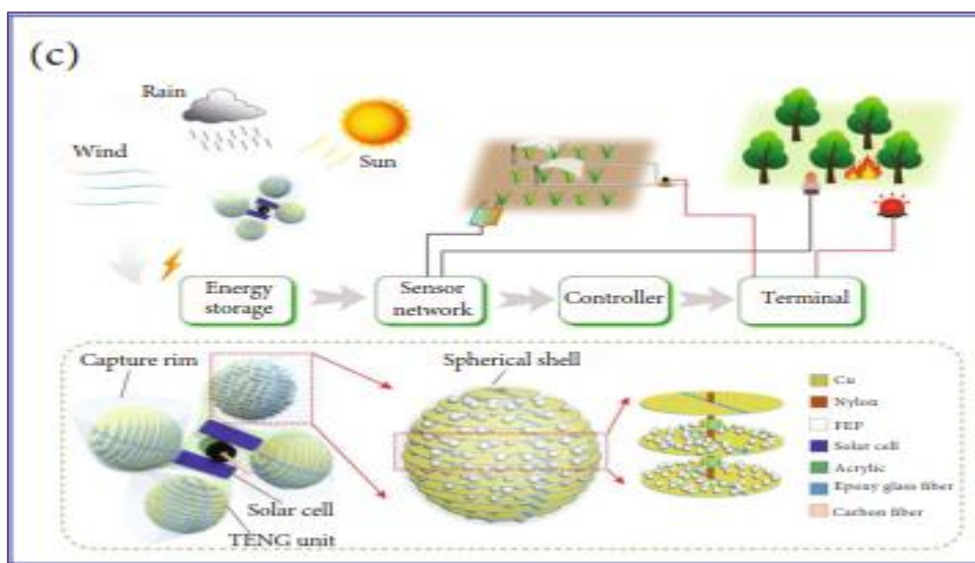
gouttes de pluie avec une efficacité de conversion de puissance élevée. Outre l'énergie des gouttes de pluie, la combinaison La stratégie de l'énergie solaire et éolienne est également significative étant donné qu'il y a toujours du vent fort les jours de pluie. Comme illustré à Figure 30



**Figure 30:** Un module unifié triboélectrique-photovoltaïque pour la récolte simultanée de gouttes de pluie, d'énergie solaire et éolienne

un générateur hybride ultra-fin capable de récolte des gouttes de pluie, du vent et des énergies solaires conditions météorologiques a été développé par Roh et al. [69]. Le dispositif hybride est composé de deux TENG et d'un PV. Le top TENG composé de deux électrodes d'oxyde d'indium et d'étain (ITO) et d'un film FEP transparent utilisé pour les gouttes de pluie récupération d'énergie basée sur la triboélectrisation sur le Changements de surface FEP et de potentiel électrique dans les deux ITO électrodes lorsque les gouttelettes glissent sur le film FEP. Autre, la grande transparence des couches ITO et FEP permet suffisamment de lumière solaire pour atteindre le SC afin d'éviter trop de lumière absorption par les couches supérieures TENG. Le film PTFE fin du bas TENG vibrera avec les coups de vent entrants, résultant en un mouvement alternatif de séparation des contacts entre le film PTFE et deux électrodes Al pour triboélectrique génération de sortie. La tension de sortie maximale de la pluie TENG et le vent TENG pourraient atteindre respectivement 5 V et 50 V, ce qui est capable de charger un condensateur de  $0,1 \mu\text{F}$  à 14 V dans les 14 s. Dans le même temps, le SC peut fournir une sortie tension de 4,2 V, montrant le potentiel d'utilisation de l'hybride générateur pour une récupération d'énergie efficace par temps variable conditions. Un autre nouveau générateur hybride tout-en-un pour la récolte d'énergie du vent, des gouttes de pluie et de la lumière solaire a été proposée par Xu et al., comme illustré à la Figure ii.18 [70]. Le générateur hybride se compose de quatre unités TENG sphériques couvertes par des jantes de capture en forme de cône tronqué pour le

vent et le liquide de pluie. récupération d'énergie et quatre PV montés sur deux côtés de le cadre en acrylique pour la collecte de l'énergie solaire. Dans chaque TENG unité, il y a plusieurs disques attachés avec des électrodes en Cu scellé dans la coque avec un espace de 5 mm où les électrodes Cu sur le même côté hémisphère sont connectés ensemble pour former deux sorties totales. Les granulés FEP sont remplis dans les espaces pour servir comme matériau triboélectrique négatif. Quand le sphérique la coque est entraînée en rotation par excitation externe, les pastilles FEP sera toujours en contact avec l'électrode qui se trouve actuellement au fond de la coque en raison de la gravité, ce qui rend les granulés contact et séparer alternativement les deux électrodes et générer une puissance de sortie triboélectrique moyenne élevée de près de 5,63 mW. Combinaison des sorties des unités TENG et PV, plusieurs capteurs peuvent être alimentés avec succès par le générateur hybride pour mettre en œuvre un sol autoalimenté durable de l'humidité, prévention des incendies de forêt et surveillance des pipelines pour les applications IoT applicables par tous les temps.



**Figure 31:** Une source d'alimentation hybride triboélectrique-photovoltaïque tout-en-un pour récolte des gouttes de pluie, de l'énergie solaire et éolienne.

### 2.9.1. Expérience chinois d'un système hybride PV-TENG :

L'intégration des énergies renouvelables aux réseaux électriques est une étape majeure pour la réussite de la transition énergétique mondiale. Ces ressources renouvelables présentent cependant un inconvénient de taille : elles sont en effet intermittentes, c'est-à-dire tributaires des conditions météorologiques.

Cela rend leur production électrique imprévisible et donc peu fiable. C'est pour tenter de remédier à ce frein et favoriser l'expansion du parc photovoltaïque mondial qu'une équipe de chercheurs asiatiques a mis au point un panneau solaire qui fonctionne également sous la pluie. Explications.

Valoriser l'impact des gouttes d'eau sur la surface du panneau solaire Si les énergies renouvelables présentent un avantage de taille dans le cadre de la lutte contre le réchauffement climatique (elles n'émettent pas de gaz à effet de serre pour produire de l'électricité), elles sont en revanche intermittentes : les périodes de production sont irrégulières et imprévisibles car dépendantes des cycles de la nature.

Cette caractéristique représente un inconvénient pour la démocratisation des énergies solaires et éoliennes : en raison d'une production peu fiable et rapidement changeante, ces ressources compliquent le travail des électriciens qui doivent assurer en permanence l'équilibre entre l'offre et la demande d'électricité.

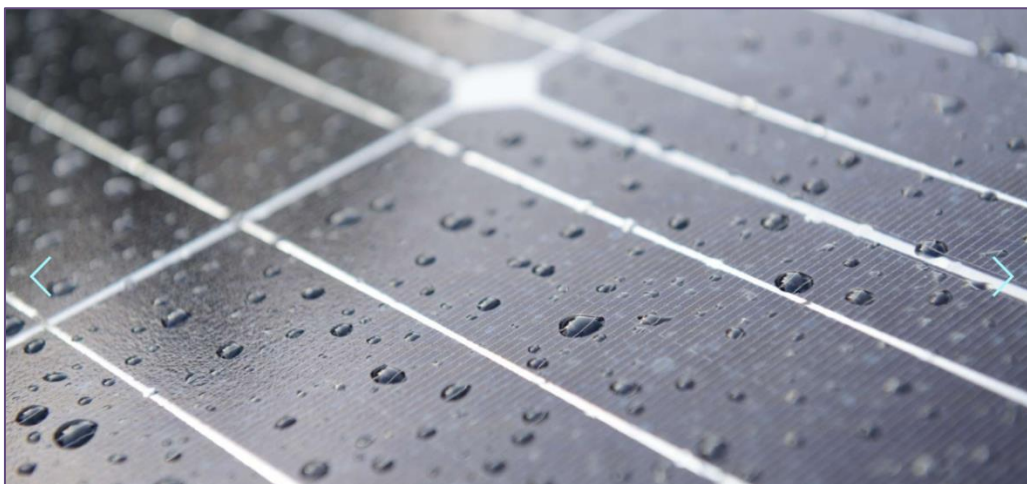
Plus concrètement, la production d'énergie solaire est étroitement liée au taux d'ensoleillement : lorsque le soleil ne brille pas, un panneau solaire ne génère que de très faible quantité d'électricité. Ce qui est un véritable frein pour le déploiement des technologies solaires, notamment dans certaines régions du monde. Mais une équipe de chercheurs pourrait bien changer la donne.

C'est dans le département Recherche & Développement de l'université de Soochow, située à Taiwan, qu'un groupe de scientifiques a mis au point un panneau solaire hybride capable de produire de l'électricité aussi bien sous un soleil de plomb que sous une pluie battante.

Cette prouesse est rendue possible grâce à l'utilisation d'un procédé qui permet de récupérer l'énergie produite par les gouttes d'eau lorsqu'elles frappent la surface des panneaux solaires.

Ce procédé, qui porte le nom de nano générateur triboélectrique, crée une charge électrique à partir du frottement entre deux matériaux (comme l'électricité statique).

Un nano générateur triboélectrique peut ainsi valoriser l'énergie de la friction d'un pneu de voiture sur la route. Ou, dans le cas qui nous intéresse, capter l'énergie créée par des gouttes d'eau qui entrent en contact avec la surface d'un panneau solaire.

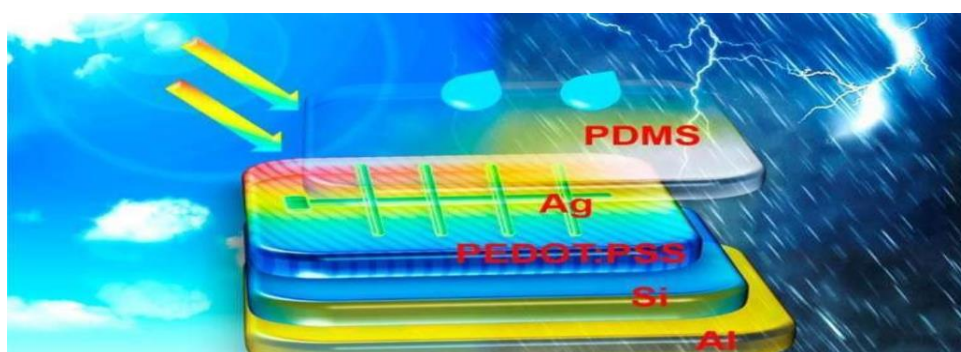


**Figure 32 :** panneau photovoltaïque sous les pluies.

### 2.9.2. Une technologie encore à optimiser :

Pour mettre au point leur système hybride, les chercheurs chinois ont d'abord texturé une couche de polymère destinée à se comporter comme une électrode commune au TENG et à la cellule photovoltaïque. Puis, ils ont ajouté une couche de polymère transparente pour assurer le passage de la lumière du soleil.

Un design qui simplifie une technologie hybride déjà envisagée par le passé et en améliore l'efficacité. La présence du TENG, en effet, imperméabilise le panneau solaire, protégeant le silicium de la pluie. Et la couche texturée réduit, d'une part, les réflexions de la lumière du soleil et augmente d'autre part la surface de contact avec les gouttes de pluie. Reste à optimiser le tout pour le rendre commercialement rentable.



**Figure 33 :** système hybride des couches de polymère une électrode commune au TENG et à la cellule photovoltaïque .

**2.10. Conclusion :**

En fin de ce chapitre on peut conclure que La tendance à l'utilisation des systèmes hybrides est inévitable car L'utilisation d'un aérogénérateur ou un système photovoltaïque ou peu importe peut ne pas subvenir à lui seul aux besoins énergétiques souhaités. En effet, l'énergie éolienne ou l'énergie solaire peut nous faire défaut au moment où nous en avons le plus besoin. Pour assurer le fonctionnement d'une installation durant toute l'année, on envisage l'utilisation d'un système d'appoint c'est un système multi source dit hybride que comprenant plus d'une source d'énergie

**Chapitre 03**  
**Modélisation et la simulation numérique du système**  
**PV-TENG**

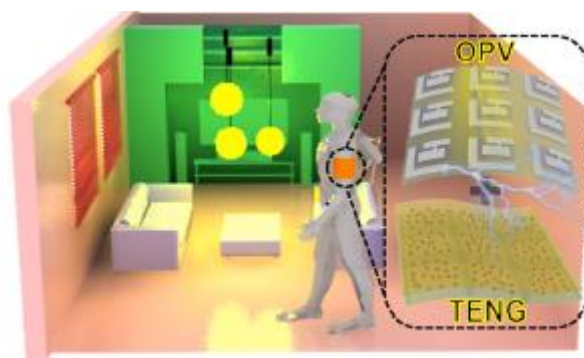


### 3. Introduction :

En fonction du but recherché nous avons opté à créer un nouveau système qui combine et exploite deux sources à la fois, triboélectricité photovoltaïque. Deux sources disponibles facilement et mobilisables. Un système multi source d'appoint à base des énergies renouvelables. L'un c'est la source traditionnelle du rayonnement, suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à HassiR'Mel. et l'autre Triboélectricité basée sur le contact de deux matériaux de nature différente. Lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. De nombreuses applications requièrent des procédés de conditionnement de matériaux qui impliquent des surfaces diélectriques en frottement contre d'autres surfaces. Ces situations peuvent entraîner sous certaines conditions une accumulation de charges à la surface des matériaux, Ce travail de ce chapitre s'inscrit dans cette démarche. Une étude visant à combiner deux facteurs fondamentaux en un.

#### 3.1. La structure de L'idée :

Pas mal des structures que l'on peut proposer pour réaliser ce système dans la réalité qui peut être intégré dans notre vie comme un grand essor. Parmi ces structures on peut le intégrer dans les vêtements dans un système de récolte par les photons et la pluie, le vent, le sable.



**Figure 34:** structure d'une cellule hybride PV-TENG implantée sur les vêtements

#### 3.2. Aspect technique de cette technologie :

Les chercheurs ont intégré 4 couches permettant au panneau solaire hybride de continuer à produire de l'énergie grâce à la lumière du soleil :

- ❖ une couche de polymère texturé (servant d'électrode commune au TENG et aux cellules photovoltaïques en silicium du panneau solaire),

- ❖ un mélange de deux polymères (placé entre la couche de base et la couche inférieure),
  - ❖ une couche de polymère transparent (permettant à la lumière du soleil de passer et d'être captée par les cellules photovoltaïques),
- une couche d'imperméabilisation (couche protectrice permettant d'imperméabiliser le panneau).

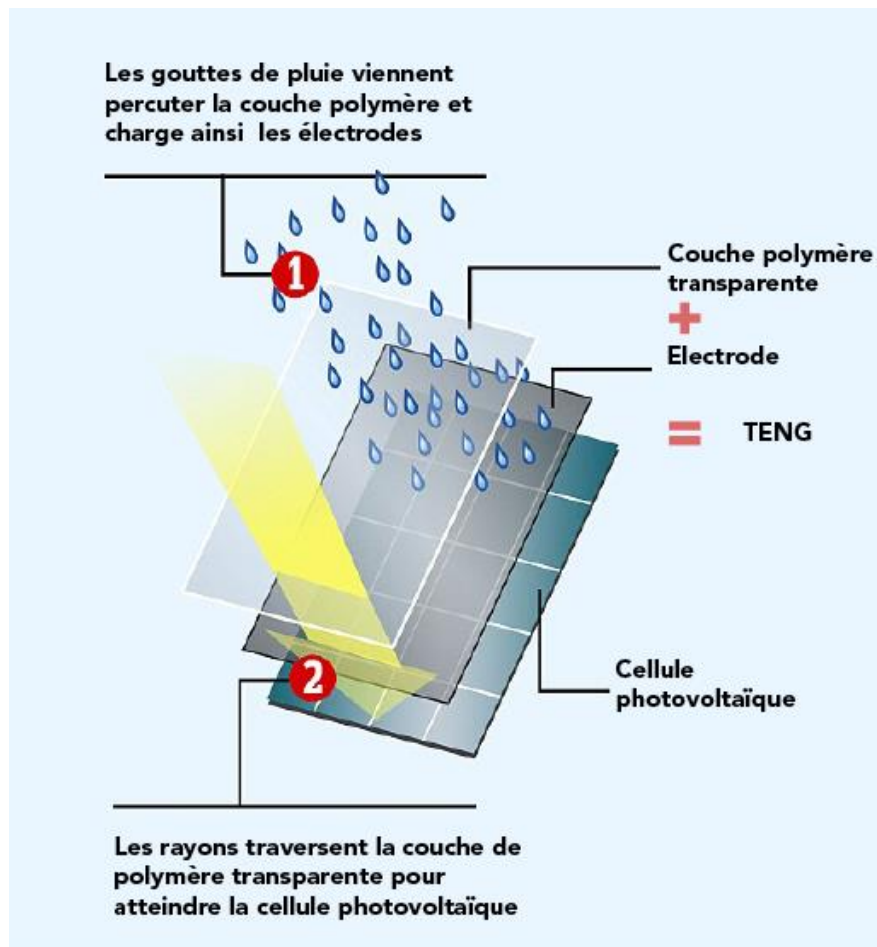


Figure 35 : modèle panneau solaire hybride

### 3.3. Circuit équivalent d'un système hybride triboélectrique photovoltaïque :

On trouve dans le circuit ci-dessous que le courant sortant du système photovoltaïque est direct dirigé vers la charge par contre le courant sortant du générateur triboélectrique et dirigé vers la charge après avoir passé à un pont de redressement ou les courant résultants se retrouves

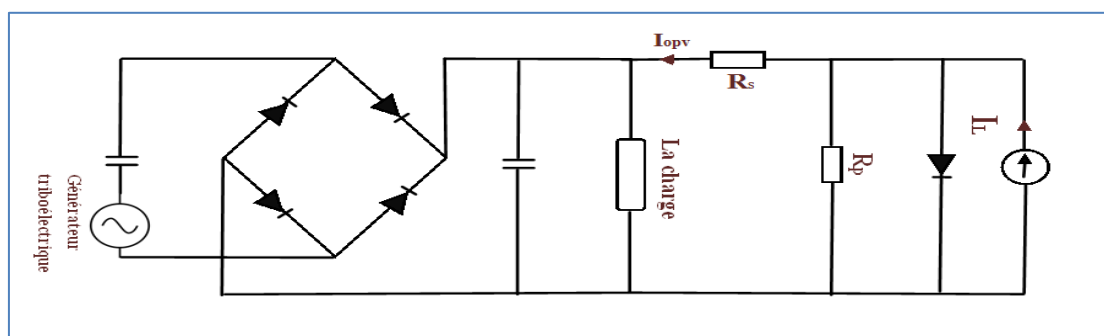


Figure 36: Circuit équivalent d'un système PV-TENG

### 3.4. Présentation du modèle mathématique et circuit électrique d'une cellule photovoltaïque :

#### 3.4.1. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque :

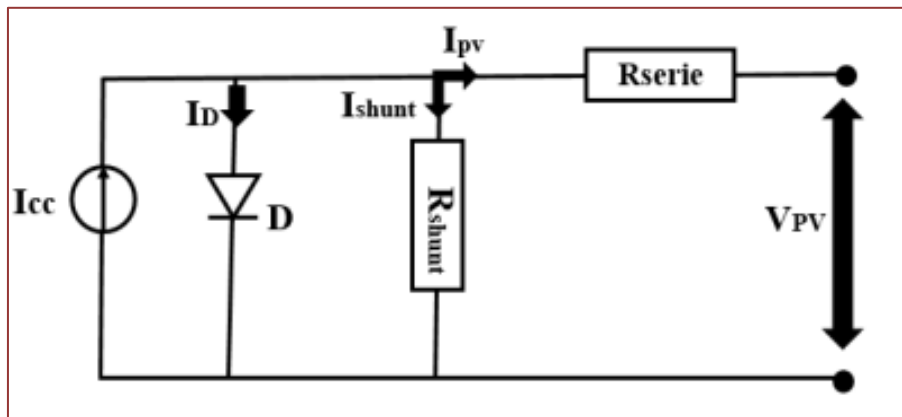


Figure 37: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

##### 3.4.1.1. Courant de court-circuit (Icc) C'est :

Le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_{serie}$  nulle et  $R_{shu}$  infinie), ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$  dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (I.4), on obtient

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{e(I_{cc} R_{serie})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{R_{serie} \cdot I_{cc}}{R_{shu}} \quad (1)$$

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

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

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

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

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule

(Pratiquement  $ICC = I_{ph}$ )

##### 3.4.1.2. Tension de circuit-ouvert (Vco) :

C'est la tension  $V_{co}$  pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[ \exp\left(\frac{eV_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (4)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{CO} = VT \ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad (5)$$

**3.4.2. Modélisation d'un système photovoltaïque :**

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

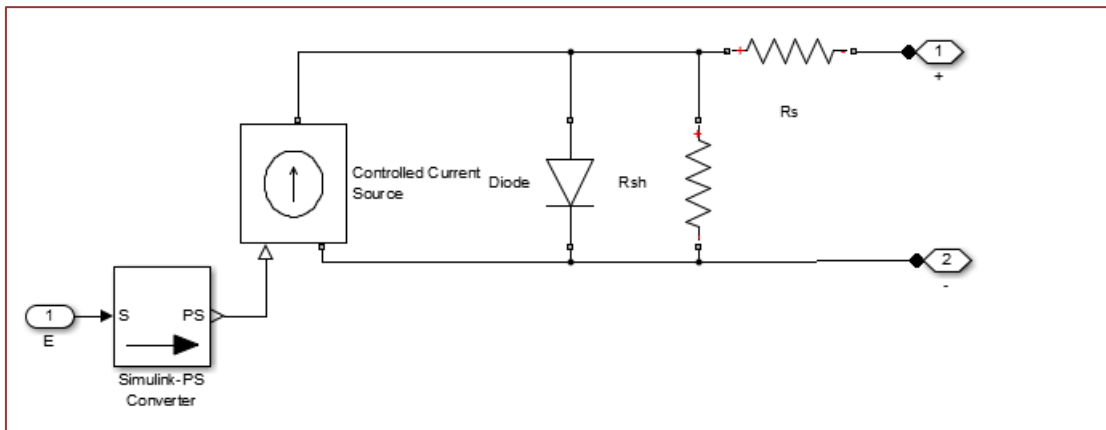
$$I_{opv} = I_1 - I_0 \left[ \exp \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{n_s V_t} - 1 \right] \tag{6}$$

$$P_{OPV}(V_{OPV}) = V_{OPV} I_{SC} - V_{OPV} I_0 \left[ \exp \left( \frac{V_{OPV}}{n_s V_t} \right) \right] \tag{7}$$

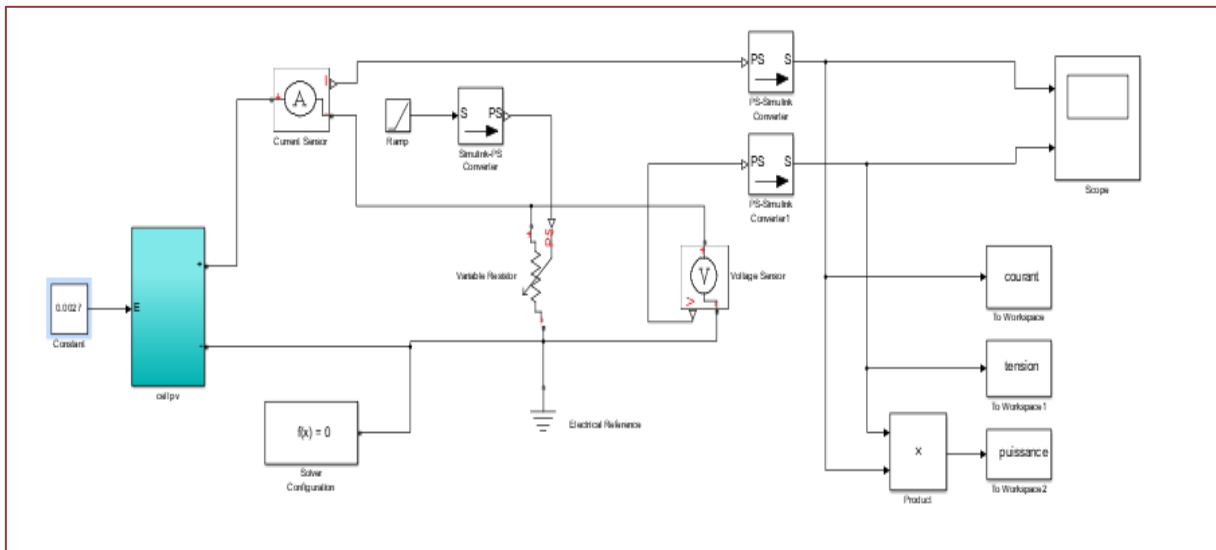
L'équation (III.2) représente la puissance générée par un système photovoltaïque.

$$\eta = \frac{V_{OPV}}{G * A} * 100\% \tag{8}$$

**3.5. Simulation d'une cellule photovoltaïque :**



**Figure 38:** schéma bloc sur simulink MATLAB d'un circuit PV.



**Figure 39:** simulation d'un système photovoltaïque schéma bloc SIMULINK.

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

Courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ):	$I_{SC}=0.0272$ (mA)
Tension en circuit ouvert( $V_{OC}$ ):	$V_{OC}=0.625$ (V)
Température de cellule :	$T_c=25c^\circ$
Un ensoleillement de :	$E=1000W/m^2$

Tableau 1 : caractéristiques de la cellule photovoltaïque.

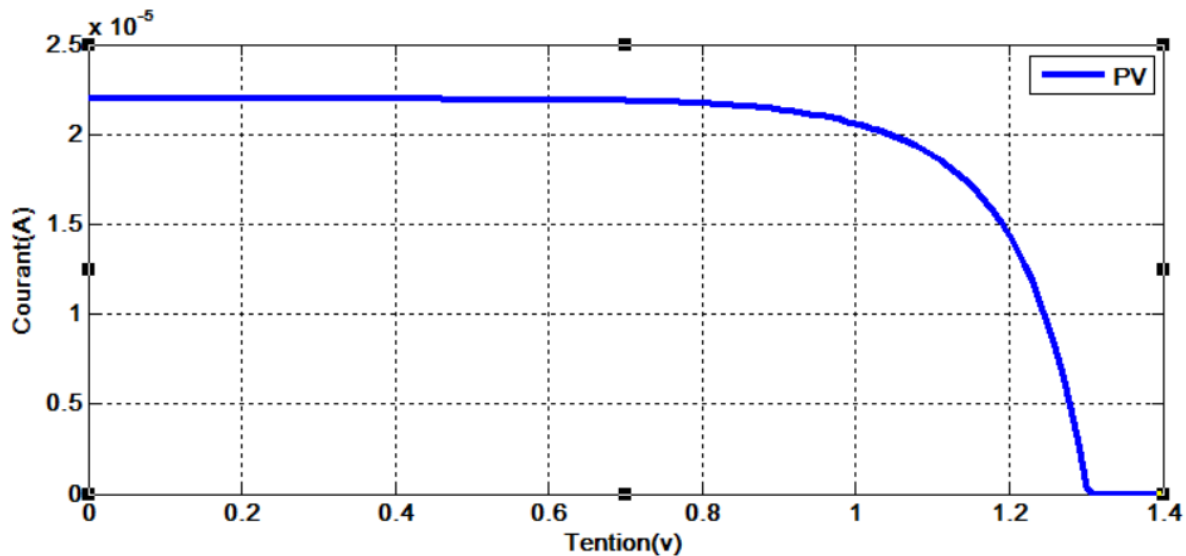


Figure 40: la caractéristique OPV /  $I=f(V)$ .

La figure ci-dessus est une courbe qui représente la variation du courant en fonction de la tension, d'après le courbe on remarque un courant constant 0.0005 A, puis on remarque une diminution du courant où la tension atteint son maximum.

Resistance ( $\Omega$ )	Potentiel électrique (v)
10000	1
21739	5
43478	10
65217	15
87336	20
99557	22.5
115740	25
138888	27.5
199999	30

Tableau 2: Caractéristique de 25 cellules photovoltaïque v, f(R)

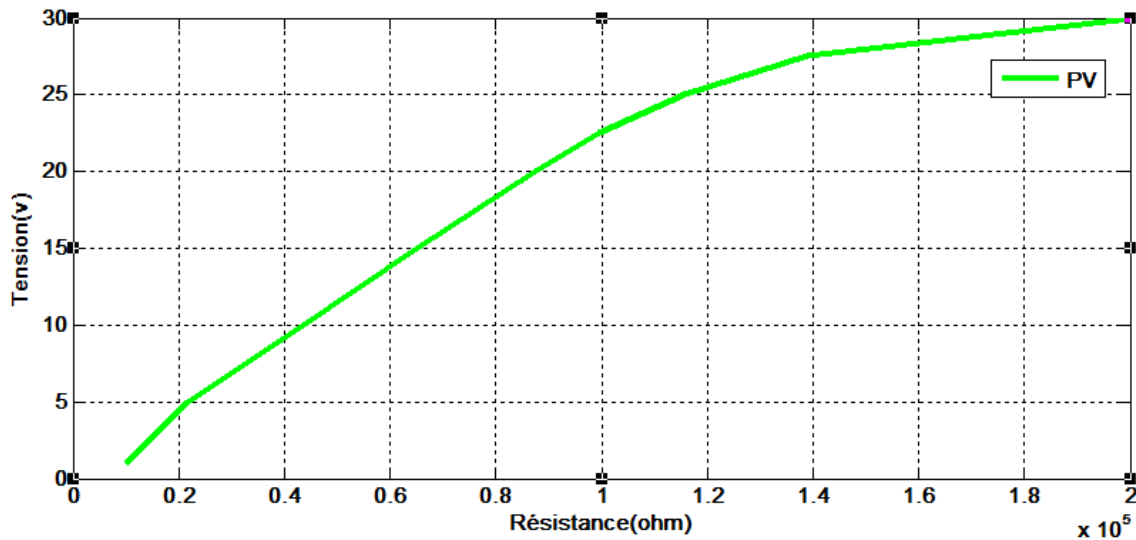


Figure 41: la caractéristique  $V=f(R)$

La figure (5) est une courbe qui représente la puissance en fonction de la tension, On remarque une augmentation de la puissance parallèlement avec la tension, puis la puissance commence à diminuer et affaiblir où la tension est au maximum.

**3.6. Présentation du modèle mathématique et circuit électrique d'un generateur triboélectrique :**

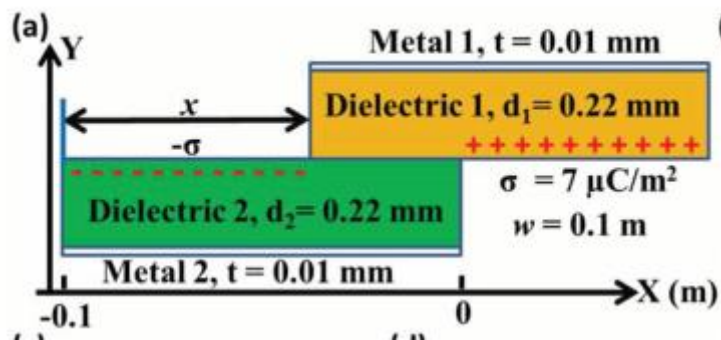


Figure 42: la structure d'un générateur triboelectrique mode coulissant latéral.

Dans la figure ci-dessus on voit deux électrodes superposées l'une sur l'autre avec un écart. L'une de ces électrodes va se déplacer sur la surface de l'autre, ce qui va permettre de créer une décharge électrostatique sur les surfaces des électrodes.

### 3.6.1. Circuit équivalent d'un générateur triboélectrique :

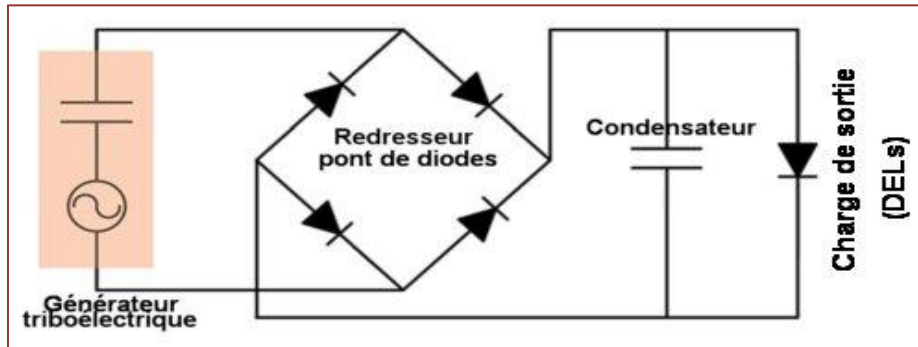


Figure 43: Circuit équivalent d'un générateur triboélectrique.

### 3.6.2. Le model mathématique d'un générateur triboélectrique

Les la différence de tension totale entre les deux électrodes peut être donné par

$$V = -\frac{1}{c(x)} Q + V_{OC}(x) \quad (9)$$

L'équation suivante peut être facilement dérivé pour les TENG dans des conditions de court-circuit

$$0 = -\frac{1}{c(x)} Q_{sc} + V_{OC}(x) \quad (10)$$

Ainsi, la relation fondamentale entre  $Q_{sc}$ , C et Le  $V_{OC}$  peut être donné par

$$Q_{sc}(x) = C(x)V_{OC}(x) \quad (11)$$

L'équation différentielle déterminante contenant le TENG et la résistance peut être donné par

$$R \frac{dQ}{dt} = V = -\frac{1}{c} Q + V_{OC} \quad (12)$$

la relation V-Q-x- caractéristiques de sortie du navire et de base ( $V_{OC}$ ,  $Q_{sc}$  et C) de un tel TENG en mode de contact peut être dérivé sur la base de électrodynamique, comme indiqué ci-dessous

$$V = -\frac{Q}{S\epsilon_0} (d_0 + X(t)) + \frac{\sigma X(t)}{\epsilon_0} \quad (13)$$

$$V_{OC} = \frac{\sigma X(t)}{\epsilon_0} \quad (13)$$

$$Q_{sc} = \frac{S\sigma X(t)}{d_0 + X(t)} \quad (14)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{d_0 + X(t)} \quad (15)$$

Dans les équations ci-dessus, l'épaisseur diélectrique effective  $d_0$  est définie comme la somme de toute l'épaisseur du diélectrique  $d_i$  entre les deux électrodes métalliques divisé par son épaisseur effective relative  $\epsilon_{ri}$ , comme indiqué ci-dessous :

$$d_0 = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\epsilon_{ri}} \quad (16)$$

Considérons maintenant ce système dans des conditions de court-circuit, lorsque le nœud 1 et le nœud 3 ont le même potentiel. Dans cette condition, le montant total des charges sur le nœud 1 et le nœud 3 est  $S$  tandis que celui sur le nœud 2 est  $S$ . De la conservation de charge et de la loi de Kirchhoff, le montant de charge sur le nœud 3 est facilement donnée par

$$Q_{\text{hash};3} = \frac{\sigma S}{1 + \left(\frac{C_1(x)}{C_2(x)}\right)} \quad (17)$$

Ainsi, lorsque  $x$  passe de 0, le court-circuit transféré des charges du nœud 3 au nœud 1 ( $Q_{sc}$ ) peut être donné par

$$Q_{sc} = \frac{\sigma S}{1 + \left(\frac{C_1(x)}{C_2(x)}\right)} - \frac{\sigma S}{1 + \left(\frac{C_1(x=0)}{C_2(x=0)}\right)} \quad (18)$$

Lorsque  $x$  est suffisamment grand, le transfert de charge efficacité  $\eta_{ct}$  (définie comme le rapport entre le charges transférées et charges triboélectriques totales) peut être donné par

$$\eta_{ct} = \frac{Q_{sc,final}}{\sigma s} = 1 / \left(1 + \left(\frac{C_1(X=X_{max})}{C_2(X=X_{max})}\right)\right) - \frac{1}{1 + \left(\frac{C_1(x=0)}{C_2(x=0)}\right)} \quad (19)$$

Le mode de fonctionnement fondamental est appelé générateurs triboélectriques à mode glissant à électrode attachée, basé sur un mécanisme de séparation de charge dans le plan. Plusieurs travaux expérimentaux antérieurs ont également été démontrés. Compte tenu des matériaux à utiliser comme couches triboélectriques, le TENG à mode de glissement à électrode attachée a également deux types : diélectrique à diélectrique et conducteur à diélectrique. Nous prenons tout d'abord la catégorie diélectrique à diélectrique comme exemple.

Le modèle de ce type de TENG a été construit avec des dimensions proches de celles de l'appareil réel, comme le montre la figure 12.a. Considérant que la largeur  $w$  de l'ensemble de la structure est beaucoup plus grande que l'épaisseur, un modèle 2D est utilisé pour simplifier le calcul. La taille géométrique des deux diélectriques est  $l$  dans le sens longitudinal et  $d_i$  ( $i = 1, 2$ )



dans le sens de l'épaisseur. Deux électrodes métalliques sont liées aux deux couches diélectriques. La partie inférieure est fixe tandis que la partie supérieure peut coulisser dans le sens longitudinal. La distance de séparation latérale est définie par  $x$ . Lorsque les deux diélectriques sont séparés, la surface inférieure du diélectrique 1 et la surface supérieure du diélectrique 2 ont des charges avec des signes différents au niveau des régions non chevauchantes, qui sont dues à l'effet triboélectrique. Identique aux TENG à contact d'électrode attachée, il est raisonnable de supposer que ces charges triboélectriques sont uniformément réparties sur ces deux surfaces, ce qui est une excellente approximation pour les isolateurs. Aussi, la décroissance des tribo-charges avec le temps peut être négligée sur ces polymères isolants.

La densité de surface des tribo-charges est définie comme  $\sigma$  à la surface du diélectrique 1 et  $\sigma$  à la surface du diélectrique 2. La densité globale des tribo-charges sur la surface superposée peut être considérée comme 0 car la distance entre le centre du positif les charges et les charges négatives sont au niveau atomique. Dans les conditions ERCMR et CO, les charges totales à chaque électrode métallique sont affectées à 0. Si la quantité de charges transférées est définie par  $Q$ , la quantité de charge totale sur le métal 1 et le métal 2 est  $Q$  et  $-Q$ , respectivement. Pour les TENG en mode glissant à électrode fixée sur le conducteur diélectrique, la seule différence de structure géométrique est l'absence de diélectrique 1. Dans ce cas, le métal 1 n'est pas seulement la couche triboélectrique supérieure, mais également l'électrode supérieure elle-même. Lorsque le métal 1 et le diélectrique 2 sont séparés, en raison de l'effet triboélectrique, la surface supérieure de la région séparée du diélectrique 2 a les tribo-charges uniformes (la densité de surface est  $\sigma$ ) et la même quantité de tribo-charges de signe opposé existera sur la surface du métal 1. Par conséquent, à la condition CO (ERCMR), la quantité totale de charges sur l'électrode inférieure est de 0. Pour faciliter la compréhension physique, les tribo-charges sur la surface diélectrique dans la région de chevauchement ont été considérées comme annuler les parties de tribo-charge opposées sur la couche métallique supérieure, avec la densité de  $\sigma$  et la quantité de  $\sigma w$  ( $lx$ ). Ainsi, dans notre modèle, la quantité totale de charges sur l'électrode supérieure est  $\sigma wx$ .

L'équation analytique pour le cas général des TENG en mode glissant à électrodes attachées ne peut être dérivée et une analyse théorique rigoureuse ne peut être basée que sur la méthode numérique. Mais dans les applications pratiques, puisque  $L$  est toujours beaucoup plus grand que  $d_1$  et  $d_2$  et que  $x$  est toujours plus petit que  $0,9L$  (en raison de la difficulté d'alignement parfait des deux surfaces diélectriques), une relation analytique approximative  $V-Q-x$  peut être dérivée lorsque l'effet de bord peut être négligé dans les conditions ci-dessus.

Pour dériver la relation  $V-Q-x$ , l'estimation analytique de  $C(x)$  et de  $V_{oc}(x)$  doit d'abord être obtenue. Nous prenons l'exemple du cas diélectrique-diélectrique. La capacité  $C$  est d'abord déduite. Etant donné que l'épaisseur des diélectriques est beaucoup plus petite que leur longueur, le condensateur entre la région chevauchée est la partie dominante de la capacité totale tant que les deux diélectriques ne sont pas complètement séparés. Par conséquent, en utilisant le modèle de condensateur à plaques parallèles, la capacité totale  $C$  peut être estimée par l'équation suivante :

$$C = \frac{\epsilon_0 w (l-X)}{d_0} \quad (20)$$

où  $d_0$  est l'épaisseur diélectrique effective telle que définie dans Eq. (7).  $V_{oc}$  peut être estimé connaissant la distribution de charge. Comme la longueur des diélectriques est beaucoup plus grande que l'épaisseur, on peut supposer que dans chaque région, les électrodes métalliques fonctionnent comme des plaques infinies. Selon cette approximation, la distribution de charge est uniforme dans chaque région, et le champ électrique est uniforme le long de la direction  $y$  à l'intérieur des diélectriques. Par conséquent, dans un cas idéal, la valeur absolue de la densité de charge de surface est  $\sigma$  pour la région non chevauchée. Pour la région chevauchée, la densité de charge est toujours uniforme. Ainsi, la densité de charge au niveau de la région chevauchée peut être calculée à travers les 0 charges totales à chaque électrode dans des conditions CO. La distribution de charge idéale en condition CO (en utilisant ERCMR) peut être approximée par les équations suivantes : Pour la région non chevauchée de l'électrode supérieure :

$$\rho = \sigma \quad (21)$$

Pour la zone de chevauchement de l'électrode inférieure

$$\rho = \frac{\sigma X}{l-X} \quad (22)$$

Pour la zone non chevauchée de l'électrode supérieure

$$\rho = -\sigma \quad (23)$$

Pour la zone de chevauchement de l'électrode supérieure

$$\rho = \frac{\sigma X}{l-X} \quad (24)$$

En utilisant la distribution de charge indiquée ci-dessus et Gauss Théorème,  $V_{oc}$  peut être facilement estimé comme

$$V_{oc} = \frac{\sigma X d_0}{\epsilon_0 (l-X)} \quad (25)$$

Ainsi, la relation V-Q-x pour le glissement de l'électrode attachée Les TENG en mode lorsque l'effet de bord peut être négligé peuvent être montré comme

$$V = -\frac{1}{C}Q + V_{0C} = \frac{d_0}{W\varepsilon_0(l-X)}Q + \frac{\sigma d_0 X}{\varepsilon_0(l-X)}S \quad (26)$$

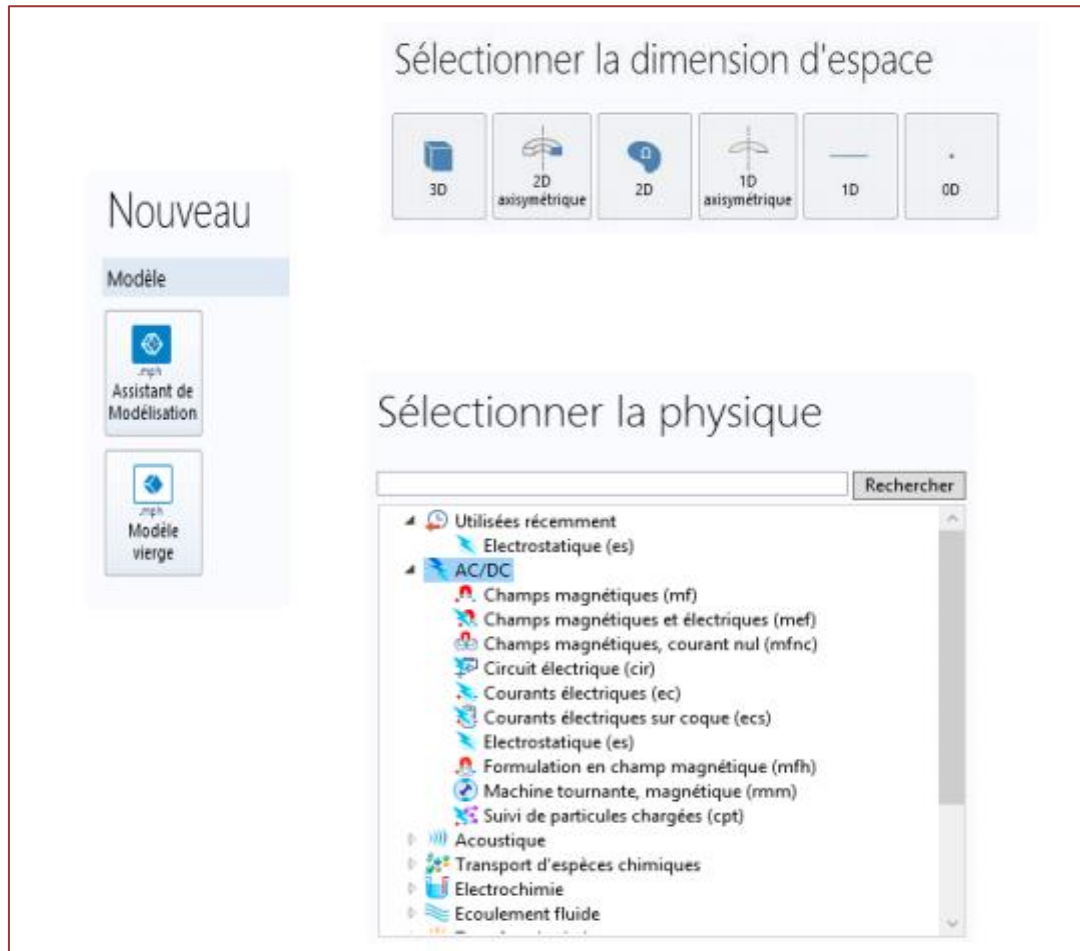
### 3.7. Simulation par consol multi physique :

#### 3.7.1. Présentation du logiciel :

COMSOL Multi physiques est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes de processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique, décrivant des phénomènes spécifiques, à la résolution et au post-traitement de modèles tout en assurant des résultats précis et fiables.

Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics® est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires de la suite de produits.

Disposant d'interfaces physiques prédéfinies, ce logiciel permet la simulation de plusieurs physiques et applications en ingénierie, et particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.



**Figure 44:** la fenêtre d'entrée du logiciel consol.

### 3.8. Simulation d'un générateur triboélectrique :

#### 3.8.1. Simulation triboélectrique en mode coulissant latéral:

Les résultats obtenus à l'issu des simulations sont présentés sous les formes graphiques et la courbe en bas

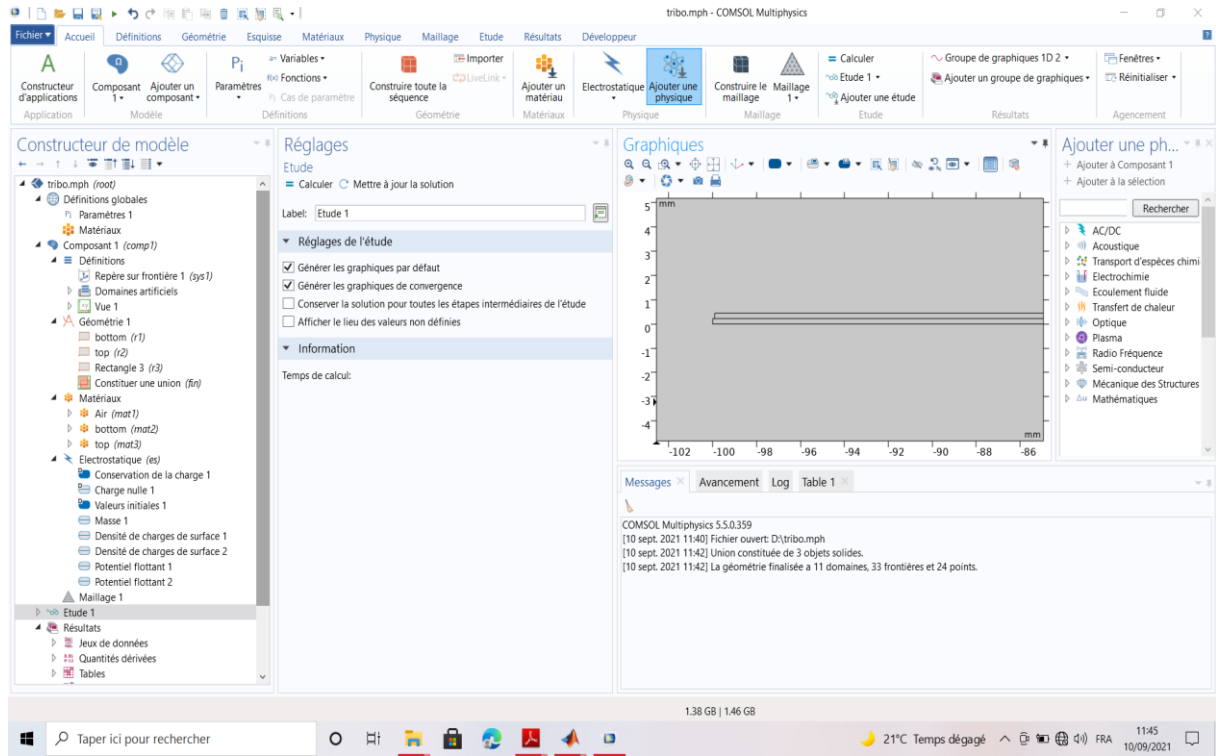


Figure 45: les étapes de la simulation triboélectrique a l'aide de logiciel comol .

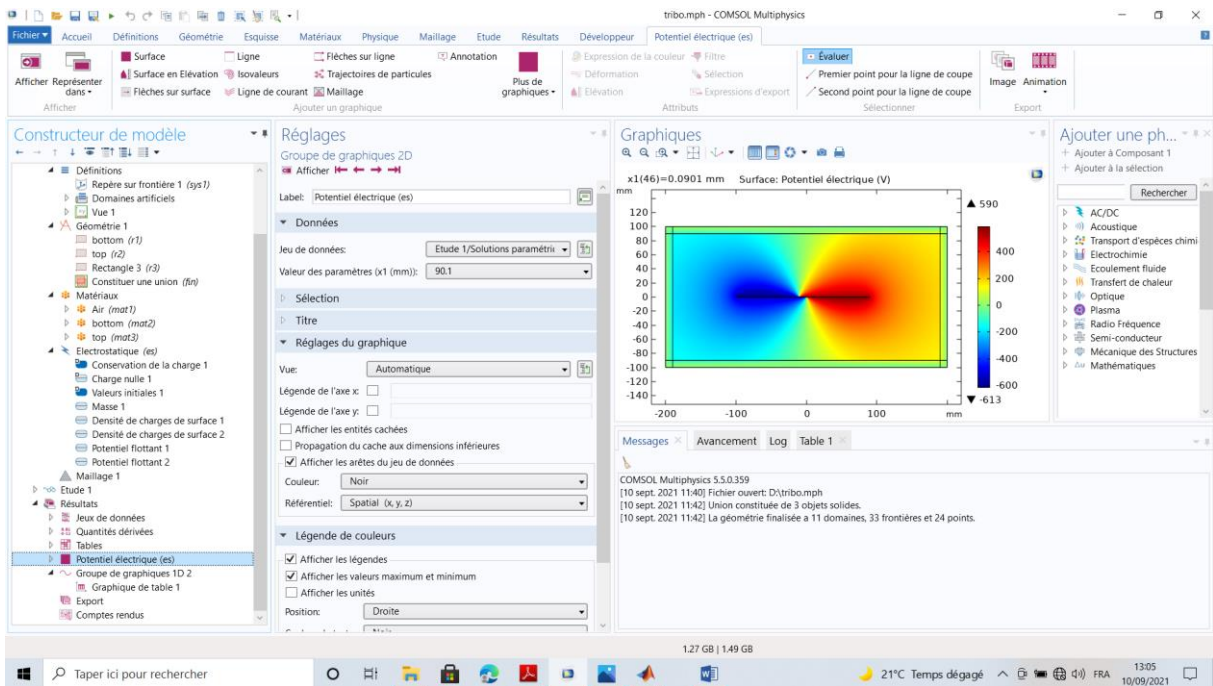
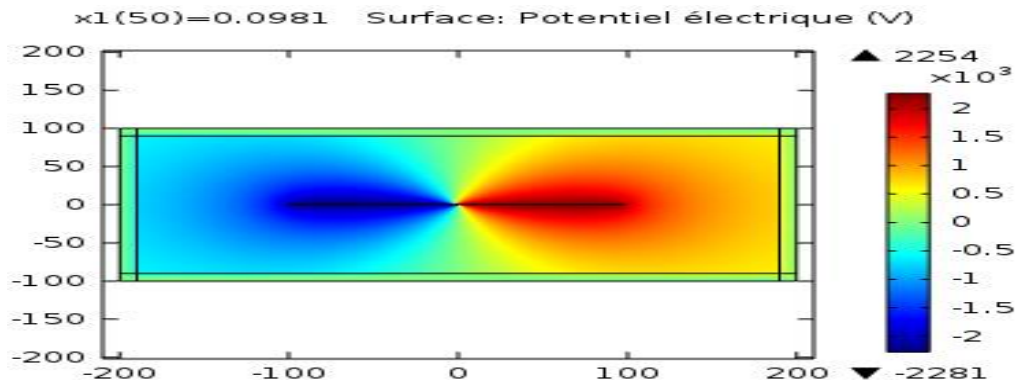
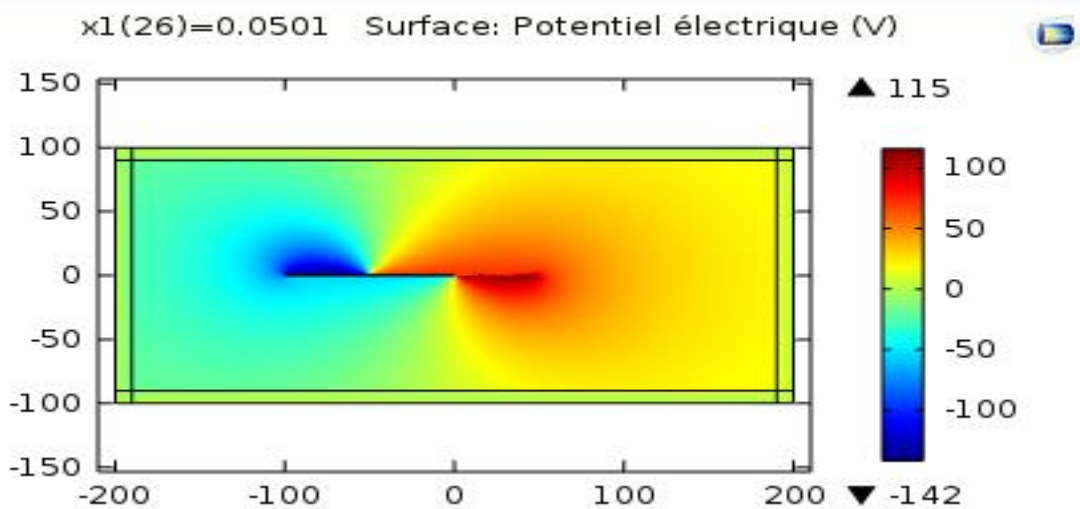


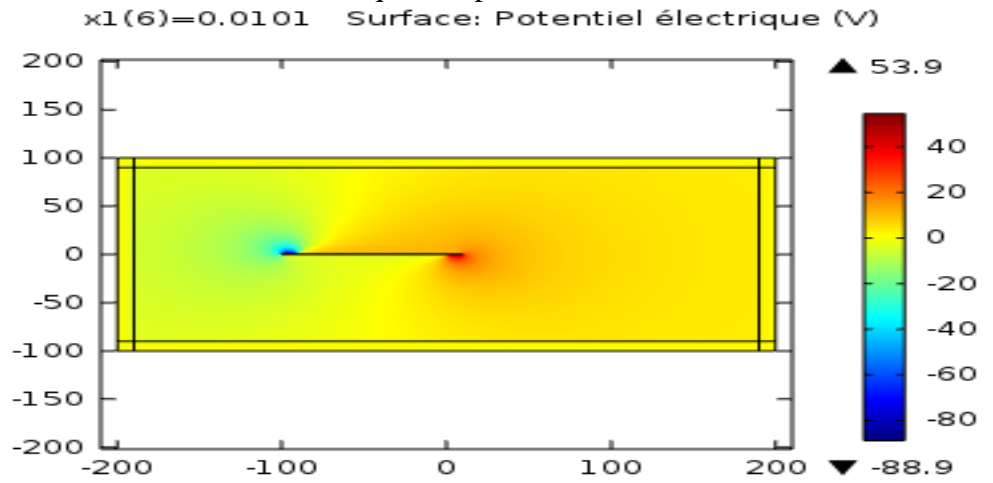
Figure 46: la surface de propagation du potentiel électrique.



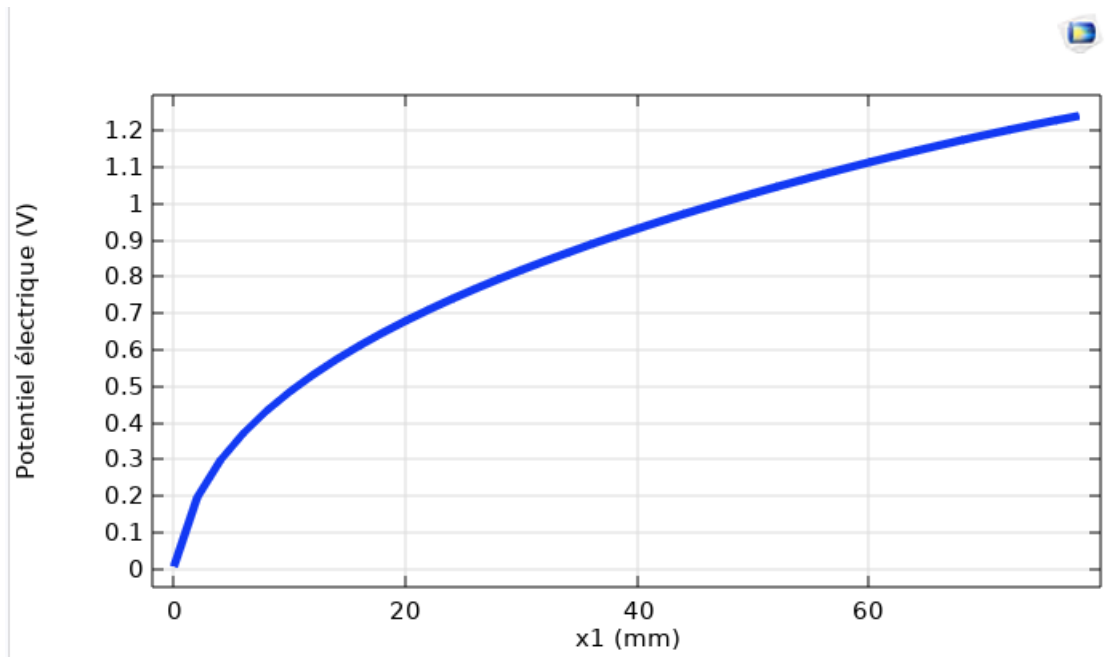
**Figure 47:** simulation d'un TENG par consol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de  $x=10$



**Figure 48:** simulation d'un TENG par consol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de  $x=50$



**Figure 49:** simulation d'un TENG par consol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de  $x=90$

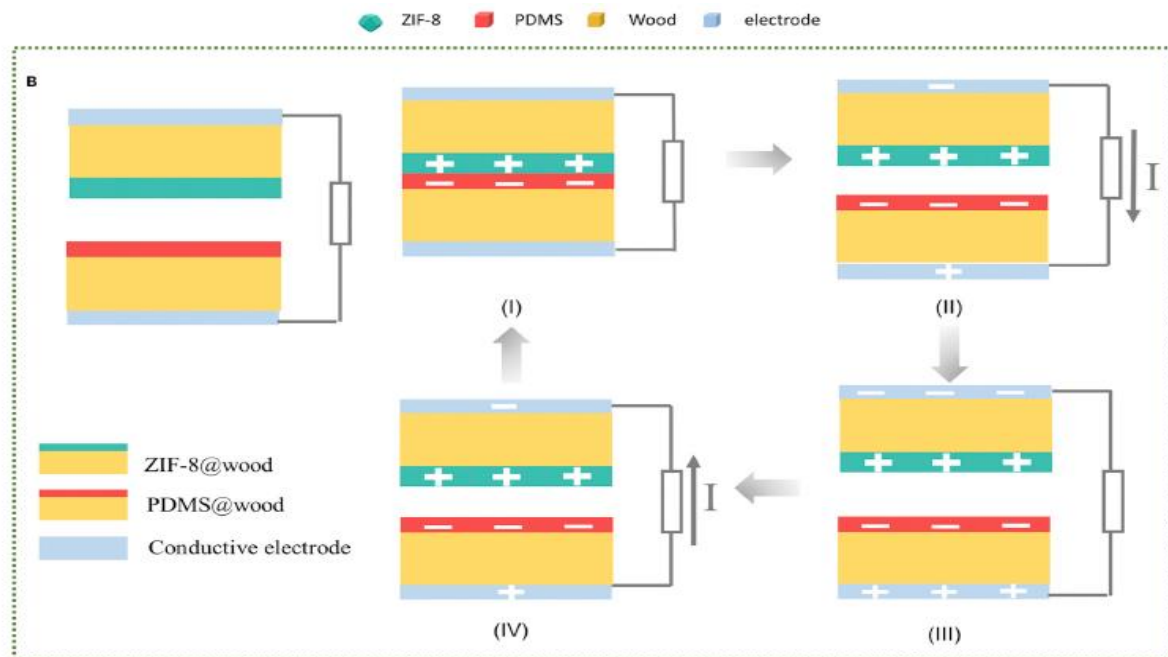


**Figure 50:** simulation d'un TENG par consol multi physique que montre la surface du potentiel électrique a déplacement de  $x=90$ .

La figure e est une courbe qui représente le potentiel électrique en fonction de le glissement de deux matériaux diélectriques, On remarque que a une augmentation de la puissance parallèlement avec la distance de glissement , puis la puissance commence à stabiliser et rester fixe où la distance est au sa maximum.

### 3.8.2. Simulation triboélectrique en mode deux électrodes verticaux [71] :

Une plaque de plancher en bois triboélectrique a été constitué de six paires de 20-ZIF 8@spruce(R) et PDMS@spruce(R) échantillons (10 cm 8 cm) Des fils conducteurs ont été conduits hors des feuilles de cuivre et directement connecté à l'instrument de test ou des appareils électroniques externes.

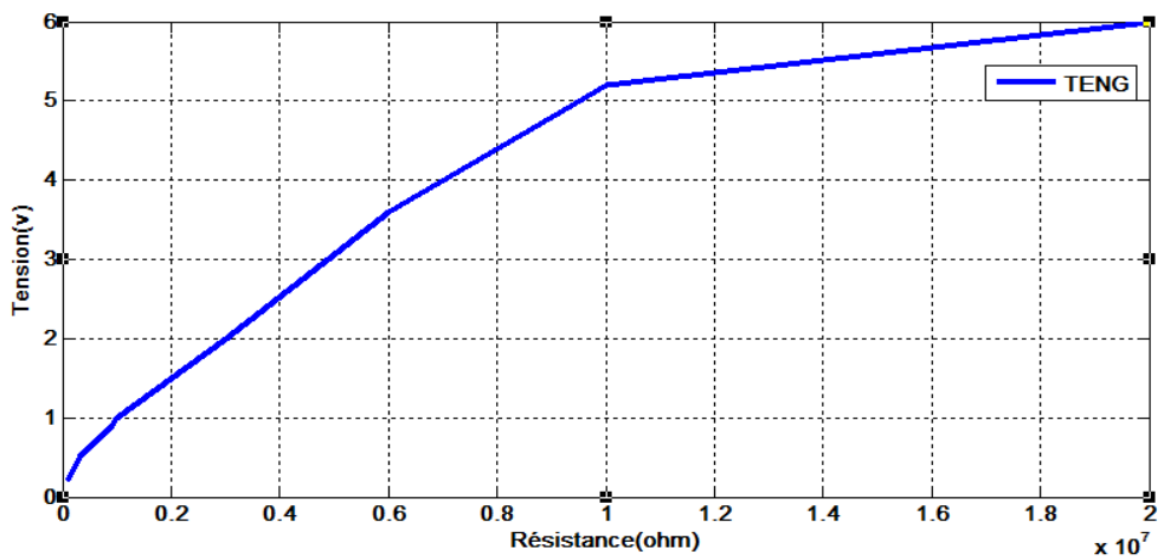


**Figure 51:** Représentation schématique de la fabrication et du mécanisme de travail du TENG en mode deux électrodes verticaux.

RESISTANCE ( $\Omega$ , $10^7$ )	POTENCIEL ELECTRIQUE (V)
0.01	0.2
0.03	0.5
0.06	0.7
0.09	0.9
0.1	1
0.3	2
0.6	4
0.9	4.5
1	5.2
2	6

**Tableau 3:** Performances de sortie électrique du TENG optimisé avec une résistance.





**Figure 52:** courbe Performances de sortie électrique du TENG optimisé avec une résistance.

### 3.9. Model mathématique d'un système hybride photovoltaïque triboélectrique

#### 3.9.1. Modélisation d'un système hybride :

Dans cette partie, un modèle d'un générateur multi source hybride (PV-TENG) a été étudié dans sa globalité, A partir des équations précédant on eut écrire :

$$P_{HB} (V_{HB}) = |P_{OPV}(V_{OPV})| + |P_{TENG} (V_{TENG})| \quad (27)$$

L'équation de la puissance générée par le système hybride photovoltaïque-Triboélectrique

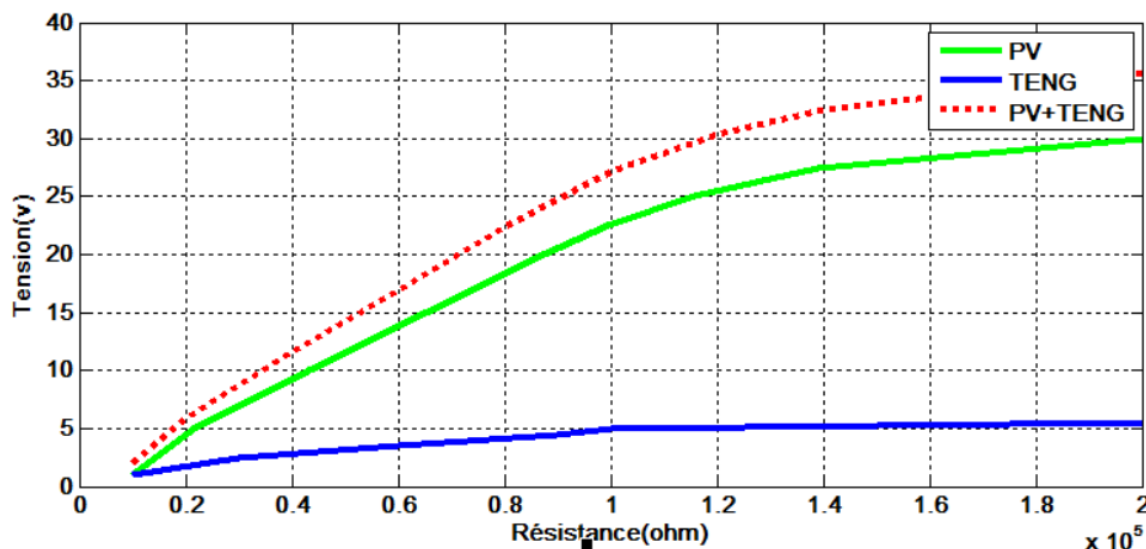
$$V_{HB} = V_{OPV} + V_{TENG} \quad (28)$$

Avec  $V_{HB}$  la tension de système hybride

#### 3.9.2. Simulation d'un système hybride PV-TENG :

Dans cette simulation on a adopté un modèle de 25 cellules photovoltaïques et une série triboélectriques se compose de cinq couches couplée en série De surface de  $0.48 \text{ cm}^2$  de chacune

Nous obtenons des résultats dans la courbe dans la figure(51) en suit :



**Figure 53:** caractéristique d'un système hybride PV-TENG V/f(R).

On voit clairement l'augmentation de la tension électrique après avoir rassemblé les deux sources TENG-PV. On observe une augmentation considérable jusqu'à 5V ou Nous remarquons une amélioration notable des performances de la cellule solaire chose qui prouve les hypothèses de notre recherche et valide nos objectifs.

### 3.9.3. Conclusion :

Ce dernier chapitre nous a permis de plus parler et détailler dans le système PV-TENG au début de ce chapitre, nous avons commencé par une présentation des différentes structures possibles qui peuvent porter notre système hybride PV-TENG, ensuite on a établi la modélisation et la simulation numérique c'est ce que nous a aidé à voir la différence entre un système unique et un système multi source PV-TENG, Cet effet rend possible une augmentation significative d'énergie photovoltaïque ou en terme exacte vraiment ca c'est le temps où on peut avoir une cellule photovoltaïque qui n'a pas besoin du soleil.

**CONCLUSION GENERAL**

## Conclusion général

### Conclusion général :

On a fixé comme objectif dans le présent travail la combinaison de deux sources d'énergies renouvelables. Notre idée était d'apporter une amélioration quelconque dans le système énergétique ; que ce soit du point de vue énergies, fiabilité ou limitation de la partie stockage, sujet à des problèmes inévitables.

L'objectif de ces travaux était l'étude d'un système du générateur hybride photovoltaïque triboélectrique allant de la caractérisation des modules triboélectriques et photovoltaïques, éléments de base de la conversion d'énergie électrostatique et solaire en énergie électrique à l'optimisation en passant par une étape nécessaire de modélisation , L'étude bibliographique nous a permis de positionner la génération de ces énergies dans le contexte actuel, en présentant leurs historiques ainsi que leurs évolutions dans plusieurs secteurs.

D'abord, on a évoqué les différentes énergies renouvelables car sont les meilleurs candidats pour atteindre cet objectif. Une étude comparative a été présentée de point de vue des avantages et des inconvénients de chacune d'elle, telle que l'énergie éolien hydraulique biomes ... notamment l'énergie solaire et les différents matériaux intelligents. On a commencé par l'énergie solaire Il n'y avait pas d'obstacle majeur ou position problématiques c'est une source traditionnelle très célèbre du XIX siècle technologie est déjà mature,

Ensuite, nous avons effectué une synthèse bibliographique des matériaux triboélectriques, un domaine récent et de l'actualité. Dans ces aspects, un effort de recherche important a été consacré à trouver les plus importantes informations sur le sujet

La deuxième partie de ce mémoire nous a amené à étudier les différentes structures des systèmes hybrides et les développements technologiques sur elles telles que PV- diesel, PV – éolien, PV-thermoélectrique ... et une introduction sur le système PV-TENG

Dans la troisième partie de ce travail un modèle mathématique et une simulation numérique a été établie pour chaque système où nous avons présenté les différents courbes des simulations et leurs principaux résultats. Ce qui confirme l'augmentation observable sur l'échèle énergétique après avoir fusionner les deux systèmes

Finalement, ce mémoire a donc permis de développer un tout nouveau modèle de générateur Hybride et a même montré que l'implantation d'un tel système pourrait même être rentable. Les travaux réalisés dans ce mémoire sont donc une bonne base afin d'éventuellement construire un Prototype fonctionnel.

### Bibliographie :

- [1] Dr. F. Birol, "World Energy Outlook 2019," IEA, Paris, France, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/weo>
- [1] Dr. F. Birol, "World Energy Outlook 2019," IEA, Paris, France, Nov. 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/weo>
- [2] Web of Science <https://apps.webofknowledge.com>
- [3] [https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-d-electricite-en-2016\\_10537](https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-d-electricite-en-2016_10537)
- [4] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>.
- [5] [Renewables 2014. Global Status Report, op. cit., p. 15.](#)
- [6] Hydro power, Alternative Energy News, 2010, [réf de janvier 2013], disponible sur: <http://www.alternative-energy-news.info/technology/hydro/>
- [7] F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.
- [8] Wind Works, Photos of wind turbines around the world, [réf. de décembre 2012], disponible sur: <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=5>
- [9] MELLOUL, A: Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, 2011
- [10] ZERROUKI.Z et BEREKSI REGUIG.R, 2017, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome », mémoire de Master, UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCCEN, P1.
- [11] Belkbir.K et chaabi siham, 2017, « conception et réalisation d'un suiveur de soleil à base d'une carte Arduino UNO », mémoire de Master, université Mammeri de Tizi- Ouzou, P5.
- [12] [Kadri.I, 2018, « Etude, conception et Réalisation d'un suiveur de soleil », mémoire de Master 2, Université de Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, P28-29.
- [13] Necir.A et Bouchaal.A, 2018, « conception et réalisation d'un suiveur du soleil commandé par une Carte Arduino », Mémoire de Master 2, université d'El-Oued, P 16- 17.
- [14] Bensaci.W ,2012 « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de Master 2, université Kasdi-Merbah– Ouargla.
- [15] Bouzid. Z, 2012 « Dimensionnement des systèmes photovoltaïques autonomes basé sur le concept d'utilisabilité horaire. Application au sudAlgérien », Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen.
- [16] Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A. « Opportunities for utilization of stand-alone hybrid (photovoltaic+diesel+battery) power systems in hot climates ». Renewable Energy, vol. 28, pp. 1741–1753, 2003.

- [17] Shaahid, S.M., Elhadidy, M.A., (2004). « Prospects of autonomous stand-alone hybrid (photovoltaic+diesel+battery) power systems in commercial applications in hot regions ». *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 165–177, 2004.
- [18] Munoz, J., Narvarte, L., Lorenzo, E., (2004). « First operating year of two village PV-diesel plants in the south of Morocco ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3462-3465, 2004.
- [19] Van Sark, W.G.J.H.M., Lysen, E.H., Cocard, D., Beutin, P., Merlo, G.F., Mohanty, B., van den Akker, J., Razzak Idris, A., Firag, A., Waheed, A., Shaheed, A., Latheef, M., Wajeih, A. « The first PV-diesel hybrid system in the Maldives installed at Mandhoo Island ». 21st European 178 Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3039-3043,2006.
- [20] Muselli, M., Notton, G., Poggi, P., Louche, A., (2000). « PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: analysis via simulation calculations ». *Renewable Energy*, vol. 20, pp. 1-7, 2000.
- [21] Rana, S., Chandra, R., Singh, S.P., Sodha, M.S., (1998). « Optimal mix of renewable energy resources to meet the electrical energy demand in village of Madhya Pradesh ». *Energy Conversion and Management*, vol 39, issues 3-4, pp 203-216, 1998.
- [22] Oldach, R., Bates, J., Derrick, A., Gantulga, D., Hasnie, S., Enebish, N. « PV hybrid system for a remote village in Mongolia ». 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3540-3543, 2004.
- [23] Ashari, M., Nayar, C. V., (1999). « An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)–diesel–battery hybrid power system ». *Solar Energy*, vol. 66, Issue 1, pp 1-9, may 1999.
- [24] Wickert, B., Nayar, C.V., Lawrance, W.B. « Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification ». *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 1, n. 1,pp. 7-17, 1999.
- [25] Tina, G.M., Brunetto, C., Gagliano, S., Petino, S., Guerra, M., Schioppo, R., Candio, A. « Monte Aquilone hybrid Photovoltaic-Diesel power generation system testing site-experimental tuning of subsystem models ». 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6 –10 June 2005, Barcelona, Spain, pp. 2319-2322, 2005.
- [26] Wichert, B., Dymond, M., Lawrance, W., Friese, T. « Development of a test facility for photovoltaic-diesel hybrid energy systems ». *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 311-319, 2001.
- [27] Klinghammer, W.; Norenberg, K. « Wide-scale village electrification with PV hybrid power systems in western China-experience gained ». 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference,4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3023-3026, 2006

- [28] Suponthana, W., Ketjoy, N., Rakwichian W. « Transforming solar home system to village grid system by using PV-farmer diesel hybrid system ». 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3011-3015, 2006.
- [29] Ashari, M., Nayar, C.V., Keerthipala, W.W.L. « Optimum operation strategy and economic analysis of a photovoltaic-diesel-battery-mains hybrid uninterruptible power supply ». *Renewable Energy*, vol. 22, pp. 247-254, 2001.
- [30] Pankow, Y. « Etude de l'intégration décentralisée dans un réseau basse Tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France, Décembre 2004.
- [31] Khelif, A., Fatnassi, L. « The hybrid power stations ». 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain, pp. 2947-2951, 2005.
- [32] McGowan, J.G., Manwell, J.F. « Hybrid wind/PV/diesel system experiences ». *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 928-933, 1999.
- [33] McGowan, J.G., Manwell, J.F., Avelar, C., Warner, C.L. « Hybrid wind/PV/diesel hybrid power systems modeling and South American applications ». *Renewable Energy*, vol 9, Issues 1-4, pp. 836-847, 1996.
- [34] Baghdadchi, J., Varmette, D.S. « Wind-Based Hybrid Power Systems In Rural Western New York ». WINDPOWER Conference Proceedings, Portland, Oregon June 2-5, 2002.
- [35] El-Hadidy, M.A., Shaahid, S.M. « Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia ». *Renewable Energy*, vol. 16, pp. 970-976, 1999.
- [36] El-Tamaly, H.H., Mohammed, A.A.E. « Impact of interconnection photovoltaic/wind system with utility on their reliability using a fuzzy scheme ». *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2475-2491, 2006.
- [37] Bernal-Agustin, J.L., Dufo-Lopez, R., Rivas-Ascaso, D.M. « Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions ». *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 2227-2244, 2006.
- [38] Steinhuser, A., Kaiser, R., Kosack, F., Reich, N., Adelman, P. « Photovoltaics and fuel cells for a decentralised power supply atn "Rappenecker Hof" ». 19th
- [39] Dufo-Lopez, R., Bernal-Agustin, J.L. « Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen- battery systems ». *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2559-2572, 2008.
- [40] S. Chu, A. Majumdar, *Nature* 488 (2012) 294-303.
- [41] C. Liu, S. Wang, C. Zhang, H. Fu, X. Nan, Y. Yang, G. Cao, *Energy Storage Mater.* 5
- [42] D. Koo, S. Jung, J. Seo, G. Jeong, Y. Choi, J. Lee, S.M. Lee, Y. Cho, M. Jeong, J. Lee, J. Oh, C. Yang, H. Park, *Joule* 4 (2020) 1-14.
- [43] S.M. Lee, T. Kumari, B. Lee, Y. Cho, J. Lee, J. Oh, M. Jeong, S. Jung, C. Yang, *Small* 16 (2020) 1905309

## Bibliographie

- [44] Y. Yang, S. Wang, Y. Zhang, Z.L. Wang, *Nano Lett.* 12 (2012) 6408–6413.
- [45] C.R. Bowen, J. Taylor, E. LeBoulbar, D. Zabek, A. Chauhan, R. Vaish, *Energy Environ. Sci.* 7 (2014) 3836–3856.
- [46] B.P. Lech<sup>^</sup>ene, M. Cowell, A. Pierre, J.W. Evans, P.K. Wright, A.C. Arias, *Nano Energy* 26 (2016) 631–640.
- [47] F.-C. Chen, *Adv. Opt. Mater.* 7 (2019) 1800662.
- [48] R. S<sup>^</sup>ndergaard, M. Hosel, D. Angmo, T.T. Larsen-Olsen, F.C. Krebs, *Mater. Today* 15 (2012) 36–49.
- [49] R. Singh, C.L. Chochos, V.G. Gregoriou, A.D. Nega, M. Kim, M. Kumar, S.-C. Shin, S.H. Kim, J.W. Shim, J.-J. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11 (2019) 36905–36916.
- [50] E.J. Lee, T.Y. Kim, S.-W. Kim, S. Jeong, Y. Choi, S.Y. Lee, *Energy Environ. Sci.* 11 (2018) 1425–1430.
- [51] K. Zhao, B. Ouyang, C.R. Bowen, Z.L. Wang, Y. Yang, *Nano Energy* 71 (2020) 104632.
- [52] A.S.M.I. Uddin, U. Yaqoob, G.-S. Chung, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 8 (2016) 30079–30089.
- [53] T. Park, J. Na, B. Kim, Y. Kim, H. Shin, E. Kim, *ACS Nano* 9 (2015) 11830–11839.
- [54] Y. Yang, H. Zhang, Z.-H. Lin, Y. Liu, J. Chen, Z. Lin, Y.S. Zhou, C.P. Wong, Z. L. Wang, *Energy Environ. Sci.* 6 (2013) 2429–2434.
- [55] Kittaka S and Murata Y 1979 Photoelectric Emission and Contact Charging of Vacuum-UV Irradiated Polymers *Jpn. J. Appl. Phys.* 18 515
- [56] Guardiola J, Rojo V and Ramos G 1996 Influence of particle size, fluidization velocity and relative humidity on fluidized bed electrostatics *J. Electrostat.* 37 1–20
- [57] N<sup>^</sup>meth E, Albrecht V, Schubert G and Simon F 2003 Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity *J. Electrostat.* 58 3–16
- [58] Diaz A F and Felix-Navarro R M 2004 A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties *J. Electrostat.* 62 277–90
- [59] Hogue M D, Buhler C R, Calle C I, Matsuyama T, Luo W and Groop E E 2004 Insulator–insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure *J. Electrostat.* 61 259–68
- [60] Iuga A, Calin L, Neamtu V, Mihalcioiu A and Dascalescu L 2005 Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device *J. Electrostat.* 63 937–42
- [61] Baytekin H T, Patashinski A Z, Branicki M, Baytekin B, Soh S and Grzybowski B A 2011 The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification *Science* 333 308–12
- [62] Wang Z L 2013 Triboelectric Nanogenerators as New Energy Technology for Self-Powered Systems and as Active Mechanical and Chemical Sensors *ACS Nano* 7 9533–57



- [63] Zhu G, Lin Z-H, Jing Q, Bai P, Pan C, Yang Y, Zhou Y and Wang Z L 2013 Toward Large-Scale Energy Harvesting by a Nanoparticle-Enhanced Triboelectric Nanogenerator *Nano Lett.* 13 847–53
- [64] H. Y. Chen, J. Hou, S. Zhang et al., “Polymer solar cells with enhanced open-circuit voltage and efficiency,” *Nature Photonics*, vol. 3, no. 11, pp. 649–653, 2009
- [65] W. Tang, B. D. Chen, and Z. L. Wang, “Recent progress in power generation from water/liquid droplet interaction with solid surfaces,” *Advanced Functional Materials*, vol. 29, no. 41, article 1901069, 2019.
- [66] L. Zheng, G. Cheng, J. Chen et al., “A hybridized power panel to simultaneously generate electricity from sunlight, rain-drops, and wind around the clock,” *Advanced Energy Materials*, vol. 5, no. 21, article 1501152, 2015.
- [67] L. Zheng, Z.-H. Lin, G. Cheng et al., “Silicon-based hybrid cell for harvesting solar energy and raindrop electrostatic energy,” *Nano Energy*, vol. 9, pp. 291–300, 2014.
- [68] L. Wang, Y. Wang, H. Wang et al., “Carbon dot-based composite films for simultaneously harvesting raindrop energy and boosting solar energy conversion efficiency in hybrid cells,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 8, pp. 10359–10369, 2020.
- [69] H. Roh, I. Kim, and D. Kim, “Ultrathin unified harvesting module capable of generating electrical energy during rainy, windy, and sunny conditions,” *Nano Energy*, vol. 70, article 104515, 2020.
- [70] L. Xu, L. Xu, J. Luo et al., “Hybrid all-in-one power source based on high-performance spherical triboelectric nanogenerators for harvesting environmental energy,” *Advanced Energy Materials*, vol. 10, no. 36, article 2001669, 2020
- [71] Jianguo Sun and all, Functionalized wood with tunable tribopolarity for efficient triboelectric nanogenerators, *Matter* 4, 3049–3066, September 1, 2021 <sup>a</sup> 2021 The Author(s). Published by Elsevier Inc.

