

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en Mécanique

Par:

BOUAZZA ABID AMIRA KHOULOU

BENALI MEDJAHED KAWTHER BATOUL

Sujet

**Etude conceptuelle d'un panneau photovoltaïque flexible et flottant
basé sur des technologies émergentes**

Soutenu publiquement, le 22 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

Mme BENAHMED Lamia
Mme MOSTEFAOUI Amina
M ZINAI Abdelhadi

MCA
MCB
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Présidente
Examinatrice
Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant, M. ZINAI Abdelhadi, pour sa direction précieuse, sa grande disponibilité, ses conseils judicieux et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements les plus chaleureux s'adressent également Mme GUERFI Nabila, Directrice de division au CRTSE, pour son accueil chaleureux au sein du centre, ses orientations techniques de haut niveau et son accompagnement précieux lors de notre période de stage.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont accepté d'évaluer notre travail :

Mme BENAHMED Lamia, qui nous fait l'immense honneur de présider ce jury.

Mme MOSTEFAOUI Amina, qui a accepté de siéger parmi nous en qualité d'examinatrice.

Nous adressons nos vifs remerciements au Chef de Département de Génie Mécanique de l'Université de Tlemcen pour ses efforts continus et sa gestion rigoureuse au service des étudiants.

Un grand merci à l'ensemble des enseignants de Faculté des Technologies de l'Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, particulièrement ceux de la spécialité Énergies Renouvelables, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée et pour leur bienveillance durant tout notre cursus universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement nos familles, nos proches, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet de fin d'études.

Dédicace

Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force et le courage de finir ce travail.

À ma chère mère, Chafika

Merci pour ton amour, ta patience et ton soutien de chaque jour. Tu as été ma force dans les moments difficiles, et tout ce que je réussis, je te le dois. Que Dieu te protège et te garde pour moi.

À mon cher père, Boucif

Merci pour ton courage, tes sacrifices et tout ce que tu m'as appris. Tu m'as montré qu'il ne faut jamais baisser les bras devant les difficultés. Ce travail est le résultat de tes efforts.

À ma famille

À toute ma famille, merci d'avoir toujours été là pour moi, pour votre amour et vos encouragements à chaque étape. Ce travail est aussi le vôtre.

À ma chère amie, Wahiba

Merci pour tout : pour ton écoute, ton soutien et pour tous les moments (bons et de stress) qu'on a partagés ensemble. Je suis vraiment chanceuse de t'avoir comme amie.

À une personne absente...

À toi qui as partagé ce chemin avec moi, dans les bons comme dans les moments les plus difficiles. Même si la vie nous sépare aujourd'hui, je n'oublie rien de tout ce qu'on a traversé ensemble. Merci du fond du cœur pour tout, et je te souhaite tout le bonheur du monde dans ta vie.

BOUAZZA ABID amira khouloud

Dédicace

Ce travail, obtenu après plusieurs années d'efforts, est dédié à ceux qui me sont les plus chers :

À mes parents, LAREDJ et SALIHA

Qui m'ont initiée au chemin du savoir et du succès. C'est grâce à vos sacrifices et vos prières quotidiennes que j'ai trouvé le chemin du succès.

A mes sœurs et à mon frère

Pour leur amour, leur soutien indéfectible, leur présence Rassurante à chaque étape de ma vie.

À mes fidèles amis

Qui ont partagé mes joies, mes peines et mes longues nuits d'études.

Merci de votre soutien moral et d'avoir rendu ce parcours inoubliable

BENALI MEDJAHED kawther batoul

المخلص

سمح عمل نهاية الدراسة هذا بإجراء دراسة مفاهيمية وأبعاد ومقارنة صارمة مخصصة لدمج تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية الناشئة، والتي تجسدت من خلال تحليل نظام عائم مرّن على الموقع الاستراتيجي لسد المفروش بتلمسان. بناءً على قدرة تبلغ 11.97 كيلوواط ذروة، تقيم هذه الدراسة تأثير التبريد الطبيعي بواسطة الماء على الأداء الحراري وتحدد كمية الحد من تبخر المياه. باستخدام برنامج بي في سيست، تم محاكاة ومقارنة ثلاث تكوينات وهي النظام العائم المرّن، والنظام العائم الصلب، والنظام المرّن الأرضي. تُحلّل نتائج المحاكاة عوائد الطاقة، الخسائر الحرارية، ونسبة الأداء لكل تقنية، مما يوضح الميزة الواضحة للهياكل العائمة في تحسين الإنتاج الشمسي وتقديم حل بيئي مستدام في المناطق شبه الجافة.

الطاقة الشمسية العائمة، الألواح المرنة، سد المفروش، برنامج بي في سيست، نسبة الأداء، : **كلمات مفتاحية**
الخسائر الحرارية، تبخر المياه

Abstract

This master's thesis presents a rigorous conceptual, dimensional, and comparative study dedicated to the integration of emerging photovoltaic technologies, realized through the analysis of a flexible floating system at the strategic site of the El Meffrouche dam in Tlemcen. Based on a system capacity of 11.97 kWc, this study evaluates the impact of natural water cooling on thermal performance and quantifies the reduction in water evaporation. Using PVsyst software, three configurations were simulated and compared: Flexible Floating (FF), Floating Rigid (FR), and Flexible Terrestrial (F TER). The simulation results analyze energy yields, thermal losses, and the Performance Ratio (PR) of each technology, demonstrating the clear advantage of floating structures in optimizing solar production and providing an eco-responsible solution in semi-arid environments.

Keywords: Floating photovoltaics, Flexible, El Meffrouche dam, PVsyst, Performance Ratio, Thermal losses, Water evaporation.

Résumé

Ce travail de fin d'études a permis de mener une étude conceptuelle, dimensionnelle et comparative rigoureuse dédiée à l'intégration des technologies photovoltaïques émergentes, concrétisée par l'analyse d'un système flexible flottant sur le site stratégique du barrage d'El Meffrouche à Tlemcen. Basée sur une puissance de 11,97 kWc, cette étude évalue l'impact du refroidissement naturel par l'eau sur les performances thermiques et quantifie la réduction de l'évaporation hydrique. À l'aide du logiciel PVsyst, trois configurations ont été simulées et comparées : Flexible Flottant (FF), Flottant Rigide (FR), et Flexible Terrestre (F TER). Les résultats analysent les rendements énergétiques, les pertes thermiques et le Performance Ratio (PR) de chaque technologie, démontrant le net avantage des structures flottantes pour optimiser la production solaire et offrir une solution éco-responsable en milieu semi-aride.

Mots-clés : Photovoltaïque flottant,(Flexible), Barrage d'El Meffrouche, PVsyst, coefficient de performance, Pertes thermiques, Évaporation hydrique

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Nomenclature

Introduction générale

I Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques.3

I.1	Introduction	4
I.2	Définition d'énergie solaire	4
I.3	Historique de l'exploitation de l'énergie solaire	5
I.4	Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire PV	6
I.4.1	Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque	6
I.4.2	Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque	6
I.5	Cellule solaire photovoltaïque.....	7
I.5.1	Description de la cellule photovoltaïque	7
I.5.2	Structure d'une cellule photovoltaïque	7
I.5.3	Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	8
I.5.4	Les types de cellules photovoltaïques	8
I.6	Module photovoltaïque	13
I.6.1	Définition du module photovoltaïque	13
I.6.2	Composition d'un module photovoltaïque	13
I.6.3	Fonctionnement d'un module photovoltaïque.....	14
I.6.4	Assemblage des cellules photovoltaïques (série / parallèle)	14
I.6.5	Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque	15
I.7	Panneau photovoltaïque	16
I.7.1	Définition du panneau photovoltaïque	16
I.7.2	Différence entre cellule, module et panneau	17
I.7.3	Structure mécanique du panneau solaire	18
I.7.4	Types de panneaux photovoltaïques	19
I.8	Technologies photovoltaïques émergentes et innovations	20
I.8.1	Cellules à pérovskites avancées	21

I.8.2	Cellules tandem silicium-pérovskite	23
I.8.3	Cellules photovoltaïques organiques (OPV)	24
I.8.4	Cellules photovoltaïques à couches minces flexibles	25
I.9	Applications des systèmes photovoltaïques	26
I.10	Conclusion du chapitre	27
II	<i>Chapitre II : Etude bibliographique sur les systèmes photovoltaïques flottants</i>	29
II.1	Introduction	30
II.2	Systèmes photovoltaïques conventionnels	30
II.3	Contraintes environnementales influençant les performances	30
II.3.1	Influence de la température de fonctionnement	31
II.3.2	Impact de l'accumulation de poussière	31
II.3.3	Contraintes liées à la surface d'installation et à la géométrie des modules	31
II.4	Systèmes photovoltaïques flottants (FPV):	32
II.4.1	Refroidissement naturel et gain d'efficacité	32
II.4.2	Réduction de l'accumulation de poussière	33
II.4.3	Structure flottante et système d'ancrage	33
II.5	Systèmes photovoltaïques flexibles	36
II.5.1	Physique des dispositifs ultra-minces et OPV	37
II.5.2	Électronique flexible pour la récupération d'énergie : Comportement sous déformation	37
II.5.3	Analyse mécanique et résilience structurelle	38
II.6	Stockage et gestion énergétique	38
II.6.1	Nécessité du stockage d'énergie	38
II.6.2	Technologies de stockage	38
II.6.3	Optimisation thermique et intégration	39
II.6.4	Systèmes de gestion de l'énergie (EMS)	39
II.7	Analyse critique et gap scientifique	39
II.7.1	Limite des études conventionnelles	39
II.7.2	Gap scientifique	39
II.7.3	Positionnement du présent travail	40
II.8	Conclusion du chapitre	40
III	<i>Chapitre III : Simulation et Analyse Comparative des Performances d'un Système Photovoltaïque Flexible Flottant</i>	41
III.1	Introduction	42

III.2	Présentation du Site d'Étude et Données Météorologiques	42
III.2.1	Localisation géographique du Barrage d'El Meffrouche	42
III.2.2	Gisement solaire et profil climatique	43
III.2.3	Caractéristiques de la surface d'implantation	44
III.3	Paramètres et Configuration du Système	44
III.4	Présentation et Analyse Critique des Résultats de Simulation	45
III.4.1	Analyse du Premier Cas : Système Flexible Flottant (FF).....	45
III.4.2	Analyse du Deuxième Cas : Système Flottant Rigide (FR)	47
III.4.3	Analyse du Troisième Cas : Système Flexible Terrestre (F TER).....	50
III.5	Discussion Comparative et Évaluation du Gain Énergétique	53
III.5.1	Impact du refroidissement hydrique (Flottant vs Terrestre)	53
III.5.2	Comparaison entre la configuration Flexible Flottante et Rigide Flottante	53
III.5.3	Synthèse Comparative des Configurations	53
III.6	Conclusion du Chapitre	54

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Image du soleil	7
Figure I.2: Synoptique d'une cellule solaire	9
Figure I.3: Création d'un courant électrique dans une cellule PV	10
Figure I.4: Formes des cellules solaires	11
Figure I.5: Cellules monocristallines	12
Figure I.6: Cellules Polycristallines	12
Figure I.7: Cellule Photovoltaïque amorphe	13
Figure I.8: Cellule photovoltaïque aux pérovskites	14
Figure I.9: Cellule photovoltaïque organique	14
Figure I.10: cellule photovoltaïque tandem	15
Figure I.11: Composition du module photovoltaïque	16
Figure I.12: Association en série et en parallèle des modules PV	17
Figure I.13: Panneau photovoltaïque	19
Figure I.14: Cellule, module et panneau photovoltaïque	20
Figure I.15: panneaux photovoltaïque rigide	21
Figure I.16: panneaux photovoltaïque flexible	22
Figure I.17: pérovskites	24
Figure I.18: cellule solaire en pérovskite inversée	24
Figure I.19: Cellules tandem Pérovskite / Silicium cristallin	25
Figure I.20: Des panneaux photovoltaïques organiques	27
Figure I.21: Cellules photovoltaïques organiques	27
Figure I.22: Schémas des empilements photovoltaïques CdTe et CIGS en couches minces	28

Chapitre II :

Figure II.1: Parc photovoltaïque flottant	34
Figure II.2: Cas de projet pour système de montage solaire flottant	35
Figure II.3: Différentes technologies d'ancrage pour le solaire flottant	38
Figure II.4: Configurations structurales des cellules photovoltaïques à base de pérovskite (simple vs tandem)	39

Chapitre III :

Figure III. 1: Caractéristiques géographiques d'ancrage du site d'étude (PVsyst) et vue satellitaire du barrage d'El Meffrouche	45
Figure III. 2: Diagramme de la production normalisée (pertes et énergie utile) par kWc installé pour le système Flexible Flottant (FF)	48

Figure III. 3: Évolution mensuelle du coefficient de performance (PR) du système Flexible Flottant (FF)	48
Figure III. 4: Diagramme des pertes énergétiques globales (Loss Diagram) du système Flexible Flottant (FF)	49
Figure III. 5: Diagramme de la production normalisée (pertes et énergie utile) par kWc installé pour le système Flottant Rigide (FR).....	50
Figure III. 6: Évolution mensuelle du coefficient de performance (PR) du système Flottant Rigide (FR)	51
Figure III. 7: Diagramme des pertes énergétiques globales (Loss Diagram) du système Flottant Rigide (FR)	51
Figure III. 8: Diagramme de la production normalisée (pertes et énergie utile) par kWc installé pour le système Fixe Terrestre (F TER).....	53
Figure III. 9: Évolution mensuelle du coefficient de performance (PR) du système Fixe Terrestre (F TER)	53
Figure III. 10: Diagramme des pertes énergétiques globales (Loss Diagram) du système Fixe Terrestre (F TER)	54

Liste des tableaux

Chapitre III :

Tableau III. 1: Bilan mensuel des données météorologiques et des résultats de production du système Flexible Flottant (FF) au niveau du barrage El Meffrouche	46
Tableau III. 2: Bilan mensuel des données météorologiques et des résultats de production du système Flottant Rigide (FR)	50
Tableau III. 3: Bilan mensuel des données météorologiques et des résultats de production du système Fixe Terrestre (F TER)	52
Tableau III. 4: Synthèse comparative des indicateurs énergétiques des trois configurations simulées.....	55

Liste des abréviations

- **AC** : Alternating Current (Courant Alternatif - CA)
- **ACV** : Analyse de Cycle de Vie
- **APS / APD** : Avant-Projet Sommaire / Avant-Projet Définitif
- **CAPEX** : Capital Expenditure (Coût d'investissement initial)
- **CdTe** : Tellurure de Cadmium
- **CIGS** : Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium
- **CZTSSe** : $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (Kesterite)
- **DC** : Direct Current (Courant Continu - CC)
- **EMS** : Energy Management System (Système de Gestion de l'Énergie)
- **EVA** : Éthylène-Acétate de Vinyle
- **F TER** : Flexible Terrestre (Configuration Terrestre)
- **FF** : Flexible Flottant (Configuration Flottante)
- **FPV** : Floating Photovoltaic (Photovoltaïque Flottant)
- **FR** : Flottant Rigide (Configuration Flottante Rigide)
- **GHI** : Global Horizontal Irradiation (Irradiation Globale Horizontale)
- **ITO** : Indium Tin Oxide (Oxyde d'Indium-Étain)
- **MPP** : Maximum Power Point (Point de Puissance Maximale)
- **OPEX** : Operational Expenditure (Coût d'exploitation)
- **OPV** : Organic Photovoltaic (Photovoltaïque Organique)
- **PEHD** : Polyéthylène Haute Densité
- **PR** : Performance Ratio (Coefficient de Performance)
- **PV** : Photovoltaïque
- **STC** : Standard Test Conditions (Conditions Standards de Test)

Nomenclature

- **V_{oc}** : Tension en circuit ouvert (V)
- **I_{sc}** : Courant de court-circuit (A)
- **P_{max}**: Puissance maximale (W)
- **P_{nom}** : Puissance Crête nominale de l'installation (kWc ou kWp)
- **V_{mpp}** : Tension au point de puissance maximale (V)
- **I_{mp}** : Courant au point de puissance maximale (A)
- **E_{Grid} / E_{out}** : Énergie annuelle globale injectée dans le réseau (kWh/an ou MWh/an)
- **E_{spec}** : Énergie spécifique produite par kWc installé (kWh/kWc/an)
- **T_{Amb}** : Température ambiante (°C)
- **η_c** : Rendement électrique de la cellule photovoltaïque (%)
- **η_{ref}** : Rendement de référence de la cellule (%)
- **β**: Coefficient de température de la puissance (%/°C)
- **T_c** : Température de la cellule (°C)
- **T_{ref}** : Température de référence de la cellule (°C)
- **L_c** : Collection Loss / Pertes du champ PV (kWh/kWc/day)
- **L_s** : System Loss / Pertes de l'onduleur (kWh/kWc/day)
- **Y_f** : Produced useful energy / Énergie utile produite (kWh/kWc/day)
- **Q_t** : Capacité portante ultime d'une ancre à vis (N)
- **P_p** : Pression passive de la terre pour une ancre à plateau (Pa)
- **Fr_s**: Force de résistance d'un corps mort (N)
- **T** : Tension exercée sur les lignes d'amarrage (N)

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'urgence climatique mondiale et à l'épuisement inéluctable des ressources fossiles, la transition vers des sources d'énergie propres s'impose comme un impératif stratégique. Parmi les alternatives disponibles, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) connaît une expansion remarquable, s'affirmant comme un pilier du mix énergétique futur. L'Algérie, grâce à sa situation géographique privilégiée, dispose d'un gisement solaire exceptionnel propice au déploiement de ces technologies à grande échelle.

Cependant, les centrales photovoltaïques terrestres conventionnelles se heurtent aujourd'hui à des contraintes majeures. D'une part, elles nécessitent d'importantes surfaces foncières, ce qui engendre des conflits d'usage avec les espaces agricoles. D'autre part, les panneaux rigides classiques subissent une baisse drastique de rendement sous l'effet de l'élévation de la température ambiante, un phénomène particulièrement pénalisant dans les régions arides et semi-arides.

Pour franchir ces verrous technologiques, la recherche s'oriente vers des solutions innovantes, notamment les systèmes photovoltaïques flottants (FPV) combinés aux modules flexibles. Installer ces structures sur des plans d'eau artificiels, tels que les barrages, permet non seulement de s'affranchir de la contrainte foncière, mais aussi de bénéficier d'un refroidissement passif continu qui optimise les performances des cellules. De plus, les modules flexibles offrent une légèreté structurelle et une excellente adaptabilité mécanique face aux mouvements de la surface de l'eau (ondes et vagues).

L'objectif principal de ce travail est de mener une étude conceptuelle, technique et comparative des performances d'une installation photovoltaïque flexible et flottante. Le site retenu pour cette investigation est le barrage d'El Meffrouche, situé dans la wilaya de Tlemcen. Ce plan d'eau revêt une importance stratégique locale, et l'implantation d'une telle technologie permettrait, en plus de la production d'énergie propre, d'atténuer l'évaporation naturelle de la ressource hydrique.

Pour structurer notre démarche, ce mémoire est articulé autour de trois chapitres fondamentaux :

- ✓ Le premier chapitre est dédié aux généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques. Il expose les principes physiques de la conversion

Introduction générale

photovoltaïque, la constitution des modules standards et détaille les technologies émergentes (pérovskites, organiques, couches minces flexibles).

- ✓ Le deuxième chapitre dresse un état de l'art approfondi et une étude bibliographique sur les systèmes flottants, les contraintes environnementales (température, poussière) et les dispositifs d'ancrage mécaniques, tout en identifiant le manque scientifique que ce travail vise à combler.
- ✓ Le troisième chapitre constitue le cœur applicatif de notre recherche. À l'aide du logiciel PVsyst et des données Meteonorm, nous dimensionnons et analysons de manière comparative une installation de 200 m² au niveau du barrage d'El Meffrouche selon trois configurations : Flexible Flottante (FF), Flottante Rigide (FR) et Flexible Terrestre (F TER).

I Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie solaire est aujourd'hui reconnue comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes, grâce à sa disponibilité abondante et continue [01]. Elle offre une opportunité considérable pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre associées aux combustibles fossiles [02]. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques, qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité à l'aide de matériaux semi-conducteurs, s'imposent comme une solution énergétique propre et durable [01]. Ces systèmes permettent de produire de l'électricité sans émissions polluantes, contribuant ainsi à la transition vers des réseaux énergétiques plus respectueux de l'environnement [02].

En Algérie, le potentiel solaire est particulièrement élevé, ce qui rend les technologies photovoltaïques particulièrement adaptées au contexte énergétique national [03]. L'exploitation de cette ressource peut contribuer significativement à diversifier le mix énergétique du pays et à soutenir le développement des énergies renouvelables.

Ce premier chapitre a pour objectif de présenter les fondements de l'énergie solaire et des systèmes photovoltaïques, en exposant les principes physiques de la conversion photovoltaïque, les différentes technologies utilisées, ainsi que leurs principales applications [01] [02]. Cette base conceptuelle est essentielle pour comprendre l'étude approfondie des systèmes photovoltaïques proposée dans les chapitres suivants.

I.2 Définition d'énergie solaire

L'énergie solaire est une ressource inépuisable, si abondante qu'elle est souvent sous-estimée. L'énergie solaire reçue par la Terre dépasse largement les besoins énergétiques mondiaux, ce qui en fait une source d'énergie à la fois abondante et renouvelable [04]. Cependant, cette énergie ne peut pas être utilisée directement dans la majorité des applications : il est nécessaire de la convertir en formes d'énergie plus exploitables. On distingue principalement trois modes d'utilisation :

- ✓ Énergie solaire passive : exploitation directe du rayonnement solaire pour le chauffage ou l'éclairage naturel.

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

- ✓ Énergie thermique : conversion de la chaleur solaire pour la production de chaleur ou de vapeur.
- ✓ Énergie photovoltaïque : transformation de la lumière solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques.

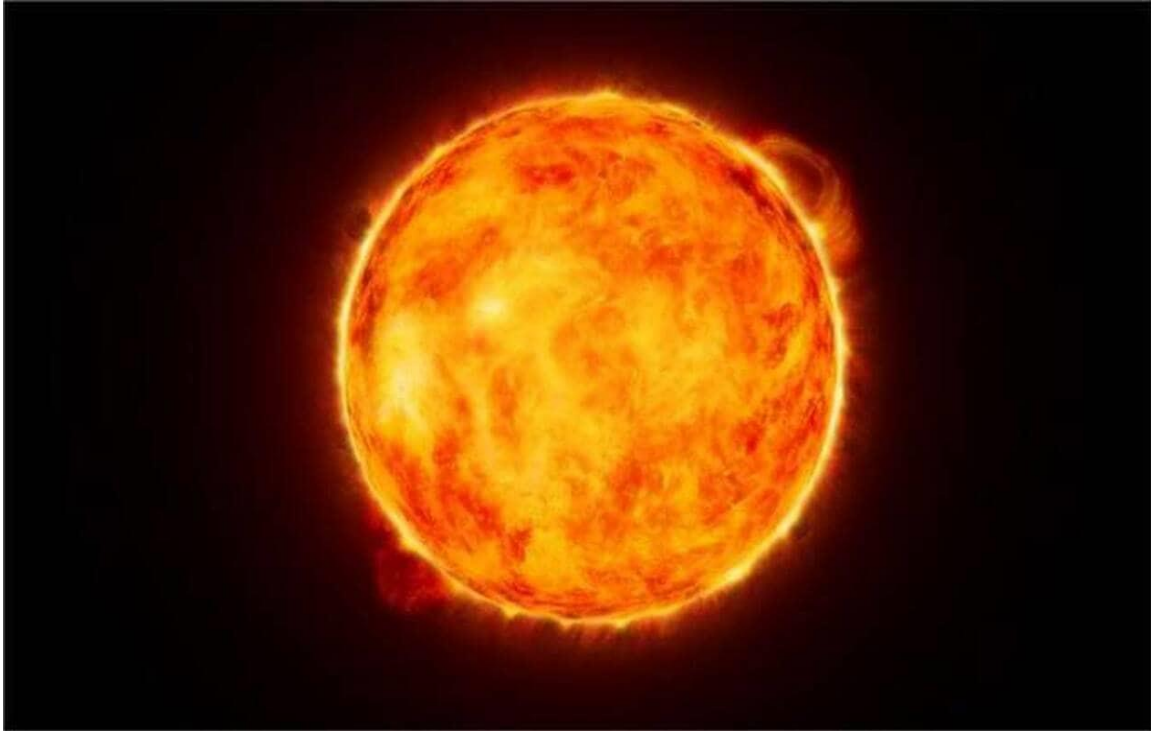


Figure I.1: Image du soleil [39]

I.3 Historique de l'exploitation de l'énergie solaire

L'exploitation de l'énergie solaire remonte à l'Antiquité, lorsque les civilisations anciennes utilisaient le rayonnement du soleil pour le chauffage des habitations et le séchage des aliments. Les Égyptiens, par exemple, captaient la chaleur solaire pour leurs constructions et l'éclairage naturel.

Au fil des siècles, diverses techniques ont été développées pour concentrer et utiliser la lumière solaire, comme l'emploi de miroirs dans la Grèce antique pour focaliser les rayons et générer de la chaleur.

Au XIX^e siècle, l'intérêt scientifique pour l'énergie solaire s'est accru, notamment avec les premières recherches sur la conversion de la lumière en électricité. Cette période a ouvert la voie aux développements modernes, avec la création des premières cellules

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

photovoltaïques au XX^e siècle, capables de transformer directement la lumière solaire en électricité utilisable pour diverses applications.

Ainsi, l'histoire de l'énergie solaire illustre une évolution progressive, depuis des usages simples et domestiques jusqu'aux technologies sophistiquées de production d'électricité actuelles [05].

I.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire PV

I.4.1 Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque

- ✓ L'énergie solaire est une source renouvelable et pratiquement inépuisable, disponible partout où le soleil brille.
- ✓ L'utilisation de l'énergie solaire permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et contribue à la transition énergétique.
- ✓ La production d'électricité solaire ne génère pas de pollution atmosphérique, ce qui contribue à préserver l'environnement et la qualité de l'air.
- ✓ Les systèmes photovoltaïques peuvent être installés directement sur les bâtiments ou structures locales, permettant ainsi une production d'électricité sur place et une réduction des coûts énergétiques.
- ✓ L'énergie solaire peut être exploitée dans divers contextes, y compris les zones résidentielles, industrielles ou isolées, offrant une flexibilité d'application [06].

I.4.2 Les inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

- ✓ L'énergie solaire dépend directement de l'ensoleillement, ce qui signifie que la production est réduite la nuit ou par temps nuageux.
- ✓ Le coût initial des installations photovoltaïques et des équipements associés peut être relativement élevé, ce qui représente un investissement important pour les utilisateurs.
- ✓ Pour assurer un approvisionnement continu, il est souvent nécessaire d'installer des systèmes de stockage, tels que des batteries, ce qui augmente les coûts et la complexité.
- ✓ Malgré les progrès technologiques, le coût et les besoins d'espace peuvent encore représenter des obstacles pour certaines personnes ou structures, notamment sans aide financière ou subvention [06].

I.5 Cellule solaire photovoltaïque

I.5.1 Description de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui convertit directement la lumière du soleil en électricité. Elle est constituée de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium, organisés de manière à capter les photons et générer un courant électrique. Sa conception repose sur une jonction p-n qui permet la circulation dirigée des électrons, produisant ainsi un courant continu exploitable pour diverses applications [05].

I.5.2 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée principalement de deux couches de silicium dopé : une couche de type N (riche en électrons) et une couche de type P (riche en charges positives). La jonction entre ces deux couches forme une zone appelée jonction P-N, qui crée un champ électrique interne indispensable à la production du courant.

La cellule comporte également des contacts métalliques à l'avant et à l'arrière pour collecter le courant électrique généré, ainsi qu'un revêtement antireflet permettant d'optimiser l'absorption de la lumière solaire [08].

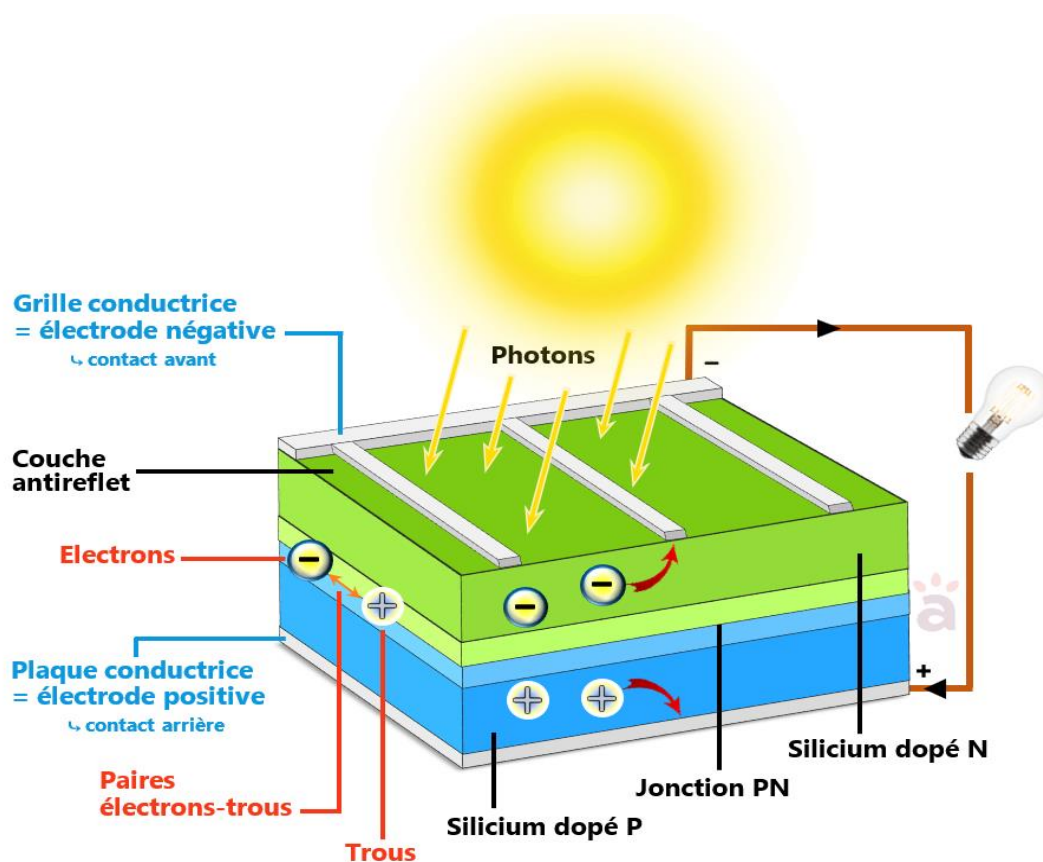


Figure I.2: Synoptique d'une cellule solaire [40]

I.5.3 Le principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque utilise un effet physique appelé effet photoélectrique pour convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Lorsqu'un photon issu du rayonnement solaire frappe la surface de la cellule, il transmet son énergie aux électrons présents dans le matériau semi-conducteur, ce qui les excite et leur permet de se libérer de leurs atomes. Ce mouvement d'électrons libérés constitue le courant électrique.

Techniquement, la cellule est composée de deux couches de matériaux semi-conducteurs dopés : une couche de type N, riche en électrons, et une couche de type P, présentant un déficit d'électrons. La jonction entre ces deux couches crée un champ électrique interne. Lorsque les électrons sont libérés par les photons, ce champ dirige les électrons vers une extrémité de la cellule et les « trous » (zones de charge positive) vers l'autre, générant ainsi une différence de potentiel qui permet la circulation des charges dans le circuit externe.

Ce courant produit est un courant continu (DC) qui peut être utilisé directement, stocké ou converti en courant alternatif (AC) pour alimenter des appareils ou être injecté sur un réseau électrique [09].

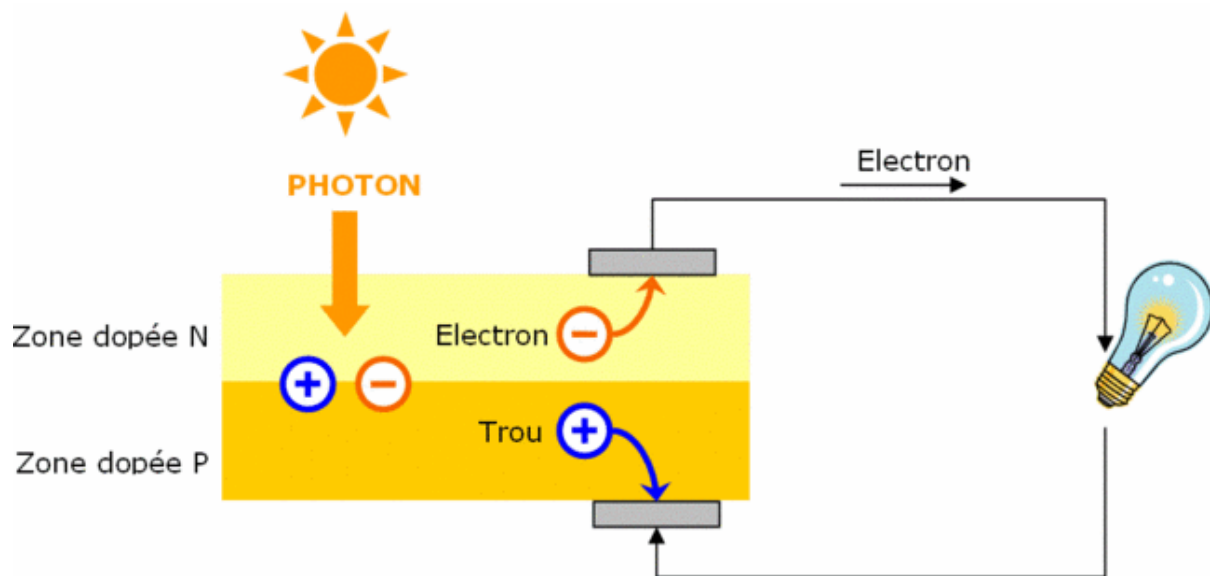


Figure I.3: Création d'un courant électrique dans une cellule PV [41]

I.5.4 Les types de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques en silicium cristallin sont les plus largement utilisées sur le marché. Elles se présentent généralement sous forme de plaquettes pouvant être rondes, carrées ou pseudo-carrées. On parle de silicium cristallin lorsque le matériau possède une structure atomique ordonnée et régulière, caractérisée par une organisation homogène des atomes, similaire à celle d'un cristal.

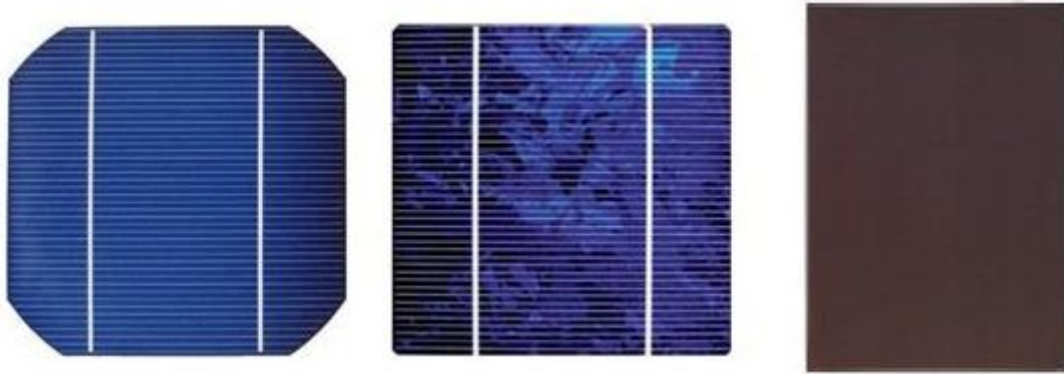


Figure I.4: Formes des cellules solaires [42]

I.5.4.1 La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

Ce type de cellule photovoltaïque est fabriqué à partir d'un seul cristal de silicium parfaitement ordonné. Cette structure homogène confère au matériau des propriétés électroniques optimales, ce qui se traduit généralement par un rendement énergétique supérieur par rapport à d'autres types de cellules cristallines.

Les cellules monocristallines se distinguent aussi par leur apparence uniforme et sombre, souvent de forme carrée avec des coins arrondis, résultant du procédé de découpe du cristal. Grâce à leur capacité à capter efficacement la lumière solaire, elles restent largement utilisées dans les installations photovoltaïques résidentielles et industrielles à haute performance.

Ce type de cellule est particulièrement adapté aux conditions où l'espace est limité ou lorsque l'on cherche à maximiser la production d'électricité à partir d'une surface donnée [10].



Figure I.5: Cellules monocristallines [43]

I.5.4.2 La cellule photovoltaïque en silicium Polycristallin

Les cellules en silicium polycristallin sont constituées de plusieurs cristaux de silicium fondus ensemble, ce qui donne une structure atomique moins uniforme que celle du silicium monocristallin. Ces cellules présentent des performances légèrement inférieures en termes de rendement, mais elles sont moins coûteuses à produire, ce qui les rend attractives pour des installations photovoltaïques de grande échelle [11].



Figure I.6: Cellules Polycristallines [44]

I.5.4.3 La cellule au silicium Amorphe

Les cellules en silicium amorphe appartiennent à la catégorie des technologies à couches minces. Elles sont fabriquées en déposant une très fine couche de silicium non cristallin sur un support. Cette caractéristique les rend plus légères et potentiellement flexibles, mais leur rendement énergétique est généralement plus faible que celui des cellules

cristallines. Elles sont souvent utilisées dans des applications nécessitant de la légèreté ou une intégration sur des surfaces courbes [11].

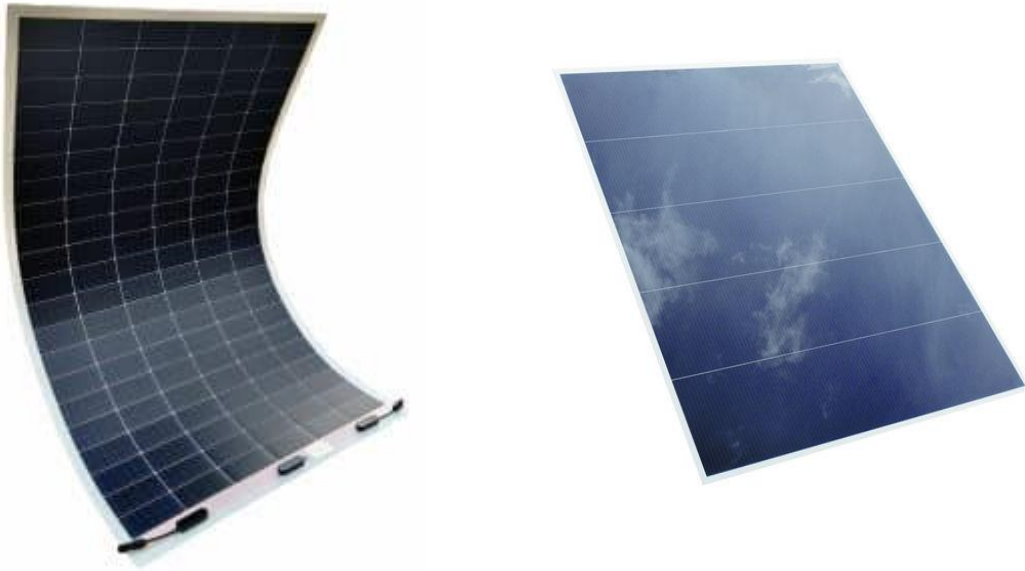


Figure I.7: Cellule Photovoltaïque amorphe [45,46]

I.5.4.4 Cellules aux pérovskites

En plus des cellules traditionnelles à base de silicium, de nouvelles technologies sont en cours de développement, notamment les cellules photovoltaïques aux pérovskites. Ces cellules exploitent une structure cristalline spécifique appelée pérovskite, qui permet une absorption efficace du rayonnement solaire et une conversion en électricité très prometteuse. Elles sont considérées comme une technologie révolutionnaire en raison de leur potentiel de rendement élevé, de leur légèreté et de la possibilité de les déposer sur des supports flexibles, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour l'intégration dans des surfaces variées et des applications innovantes [11].

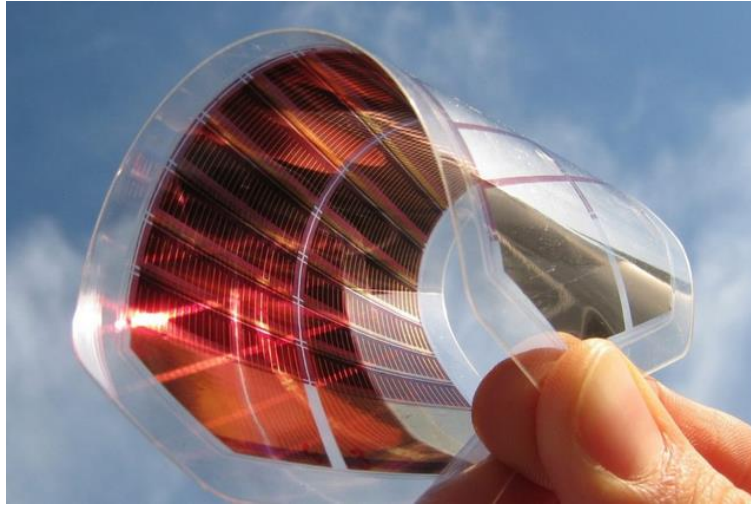


Figure I.8: Cellule photovoltaïque aux pérovskites [47]

I.5.4.5 Les cellules organiques

Les cellules photovoltaïques organiques utilisent des matériaux organiques, tels que des molécules carbonées ou des polymères, pour absorber la lumière solaire et convertir son énergie en électricité. Ces cellules sont généralement plus légères, flexibles et moins coûteuses à produire que les cellules traditionnelles à base de silicium, ce qui les rend intéressantes pour des applications intégrées ou sur des surfaces courbes. Cependant, leur **rendement reste souvent inférieur** à celui des technologies classiques, et elles sont encore principalement à l'état de recherche ou de développement [11].

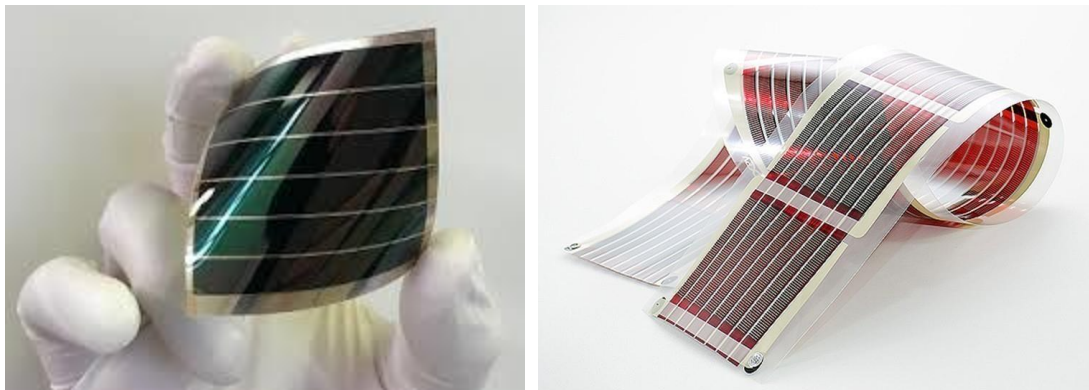


Figure I.9: Cellule photovoltaïque organique [48,49]

I.5.4.6 Les cellules tandem

Les cellules photovoltaïques tandem sont des dispositifs qui combinent **deux ou plusieurs sous-cellules** superposées, chacune étant optimisée pour absorber une partie différente du spectre solaire. Cette configuration permet d'**améliorer significativement le rendement global** par rapport aux cellules à simple jonction, car elle exploite une plus large gamme de longueurs d'ondes du rayonnement solaire. Les cellules tandem sont encore en développement, mais des architectures telles que celles associant la

pérovskite au silicium ont atteint des rendements record, démontrant leur fort potentiel pour les technologies photovoltaïques avancées [11].

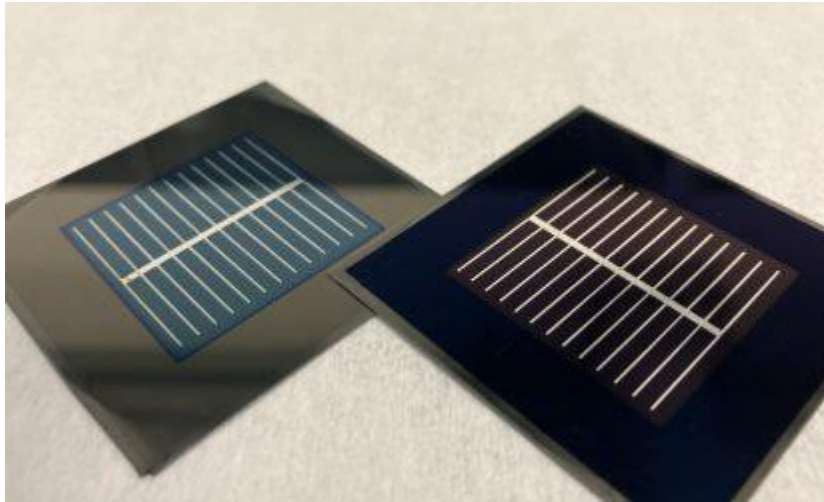


Figure I.10: cellule photovoltaïque tandem [50]

I.6 Module photovoltaïque

I.6.1 Définition du module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est un dispositif conçu pour transformer l'énergie solaire en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Il est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement et protégées par différents matériaux afin d'assurer leur durabilité et leur bon fonctionnement. Les cellules, généralement fabriquées à base de silicium, sont assemblées en série ou en parallèle pour produire une tension et une puissance électriques plus importantes. L'ensemble est encapsulé entre des couches protectrices, comme le verre et des matériaux polymères, afin de protéger les cellules contre les conditions environnementales telles que l'humidité, la poussière et les variations de température. Le module photovoltaïque représente ainsi l'élément de base utilisé pour la fabrication des panneaux solaires destinés à produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire [12].

I.6.2 Composition d'un module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs éléments qui assurent la production d'électricité ainsi que la protection des cellules solaires. La partie principale est formée de cellules photovoltaïques en silicium, responsables de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ces cellules sont protégées par une plaque de verre située sur la face avant, qui permet de laisser passer la lumière tout en protégeant le module contre les chocs et les conditions climatiques.

À l'intérieur du module, on trouve également des couches d'encapsulant qui maintiennent les cellules en place et assurent leur isolation. La face arrière est généralement constituée d'une membrane protectrice en matériau plastique qui protège les composants internes contre l'humidité et les agressions extérieures. Enfin,

l'ensemble est maintenu par un cadre en aluminium qui garantit la solidité du module et facilite son installation [13].

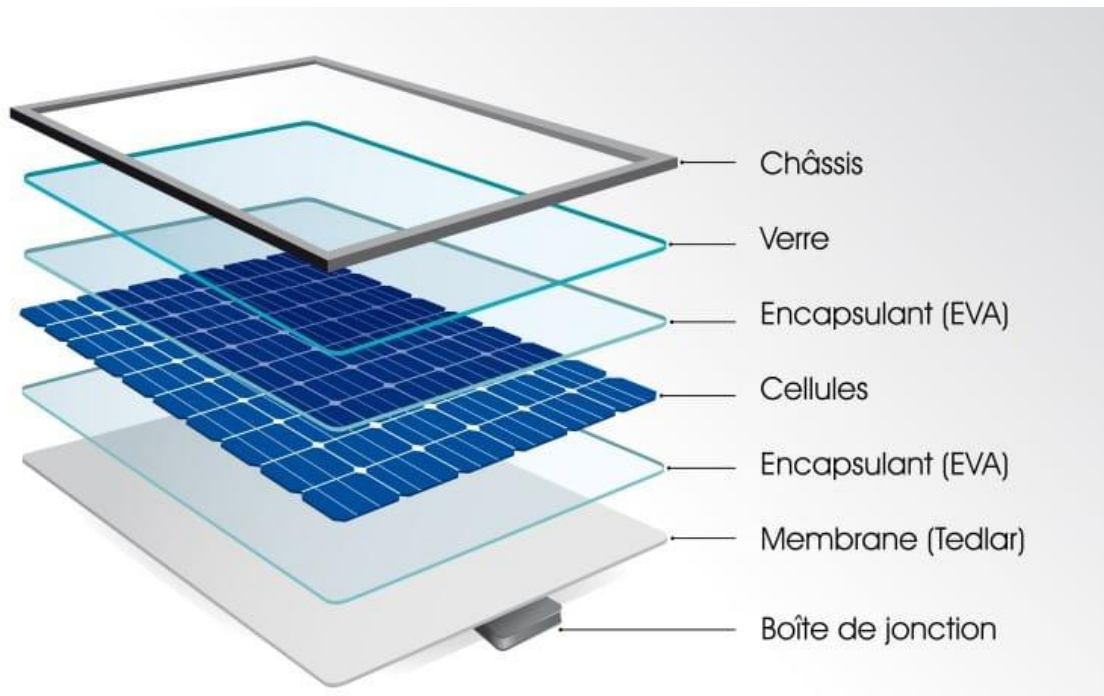


Figure I.11: Composition du module photovoltaïque [51]

I.6.3 Fonctionnement d'un module photovoltaïque

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque. Lorsque la lumière du soleil atteint la surface des cellules photovoltaïques, les photons contenus dans le rayonnement solaire transmettent leur énergie aux électrons présents dans le matériau semi-conducteur, généralement le silicium. Cette énergie libère les électrons et provoque leur déplacement, ce qui génère un courant électrique continu.

Les cellules photovoltaïques étant reliées entre elles à l'intérieur du module, l'électricité produite par chaque cellule s'additionne afin d'obtenir une tension et une puissance plus importantes. Le courant continu généré peut ensuite être utilisé directement ou transformé en courant alternatif à l'aide d'un onduleur pour alimenter différents appareils électriques ou être injecté dans un réseau électrique [13].

I.6.4 Assemblage des cellules photovoltaïques (série / parallèle)

Pour obtenir une puissance électrique suffisante, plusieurs cellules photovoltaïques sont assemblées entre elles afin de former un module photovoltaïque. Ces cellules peuvent être connectées selon deux types principaux de montage : en série ou en parallèle.

Dans un assemblage en série, les cellules sont reliées les unes à la suite des autres. Dans ce cas, le courant qui traverse chaque cellule reste identique, tandis que la tension totale

du module correspond à la somme des tensions de chaque cellule. Ce type de connexion est généralement utilisé pour augmenter la tension de sortie du module photovoltaïque.

En revanche, dans un assemblage en parallèle, toutes les cellules sont soumises à la même tension. Dans ce cas, les courants produits par chaque cellule s'additionnent, ce qui permet d'augmenter l'intensité du courant délivré par le module.

Dans la pratique, les modules photovoltaïques utilisent souvent une combinaison des deux types de connexions (série-parallèle) afin d'obtenir à la fois une tension et un courant adaptés aux besoins du système photovoltaïque [14].

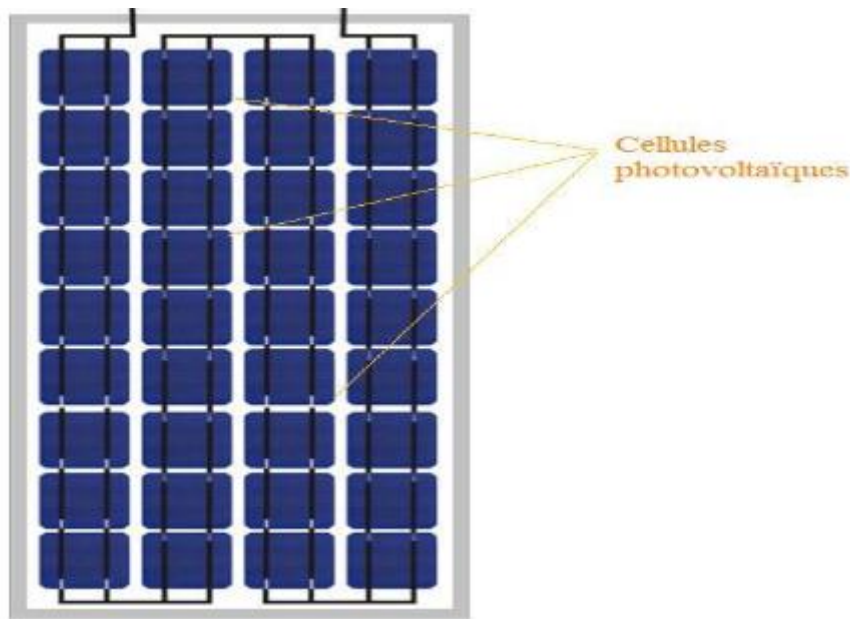


Figure I.12: Association en série et en parallèle des modules PV [52]

I.6.5 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

Les performances électriques d'un module photovoltaïque sont généralement décrites à l'aide de plusieurs paramètres caractéristiques obtenus à partir des courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V). Ces paramètres permettent d'évaluer la capacité du module à produire de l'électricité dans différentes conditions d'irradiation et de température. Parmi les paramètres les plus importants figurent la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{sc}) et la puissance maximale (P_{max}) [15].

I.6.5.1 Tension de circuit ouvert (V_{oc})

La tension de circuit ouvert, notée V_{oc} , correspond à la tension maximale délivrée par le module photovoltaïque lorsque le circuit électrique est ouvert, c'est-à-dire lorsqu'aucun courant ne circule dans le circuit externe. Cette tension dépend principalement du nombre de cellules connectées en série dans le module ainsi que des conditions de fonctionnement, notamment la température et l'irradiation solaire. Lorsque l'irradiation augmente, la variation de V_{oc} reste relativement faible, tandis

qu'une augmentation de la température entraîne généralement une légère diminution de cette tension [15].

I.6.5.2 Courant de court-circuit (I_{sc})

Le courant de court-circuit, noté I_{sc} , représente le courant maximal fourni par le module lorsque ses bornes sont directement reliées entre elles, c'est-à-dire lorsque la tension est nulle. Ce courant dépend fortement de l'intensité du rayonnement solaire incident sur le module. En effet, lorsque l'irradiation solaire augmente, le nombre de photons reçus par les cellules photovoltaïques augmente également, ce qui provoque une augmentation du nombre d'électrons libérés et donc une augmentation du courant produit [15].

I.6.5.3 Puissance maximale (P_{max})

La puissance maximale (P_{max}) correspond à la puissance électrique maximale que peut fournir un module photovoltaïque dans des conditions de fonctionnement données. Elle est obtenue au point de puissance maximale (MPP), qui correspond à une combinaison optimale entre la tension et le courant (V_{mpp} et I_{mpp}). À ce point, le produit de la tension par le courant est maximal, ce qui permet au module de fonctionner avec le rendement le plus élevé. La position de ce point varie selon les conditions environnementales, notamment l'irradiation solaire et la température du module [15].

I.7 Panneau photovoltaïque

I.7.1 Définition du panneau photovoltaïque

Un panneau photovoltaïque est un dispositif permettant de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Il est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques capables de produire un courant électrique lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. Sous l'action de la lumière, les électrons présents dans le matériau semi-conducteur des cellules se mettent en mouvement, ce qui génère un flux d'électricité. Les panneaux photovoltaïques représentent aujourd'hui une technologie importante pour la production d'électricité à partir d'une source d'énergie renouvelable et durable [16].



Figure I.13: Panneau photovoltaïque [53,54]

I.7.2 Différence entre cellule, module et panneau

Dans un système photovoltaïque, il est important de distinguer trois éléments principaux : la cellule, le module et le panneau photovoltaïque. La **cellule photovoltaïque** constitue l'élément de base du dispositif. Elle est fabriquée à partir d'un matériau semi-conducteur, généralement le silicium, et a pour rôle de transformer l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

Plusieurs cellules photovoltaïques sont ensuite assemblées et connectées électriquement pour former un module photovoltaïque. Ce module permet d'augmenter la tension et la puissance produites afin d'obtenir une production d'électricité plus importante.

Enfin, plusieurs modules peuvent être regroupés et installés ensemble pour former un panneau photovoltaïque, qui constitue l'élément visible utilisé dans les installations solaires pour produire de l'électricité à plus grande échelle [13].

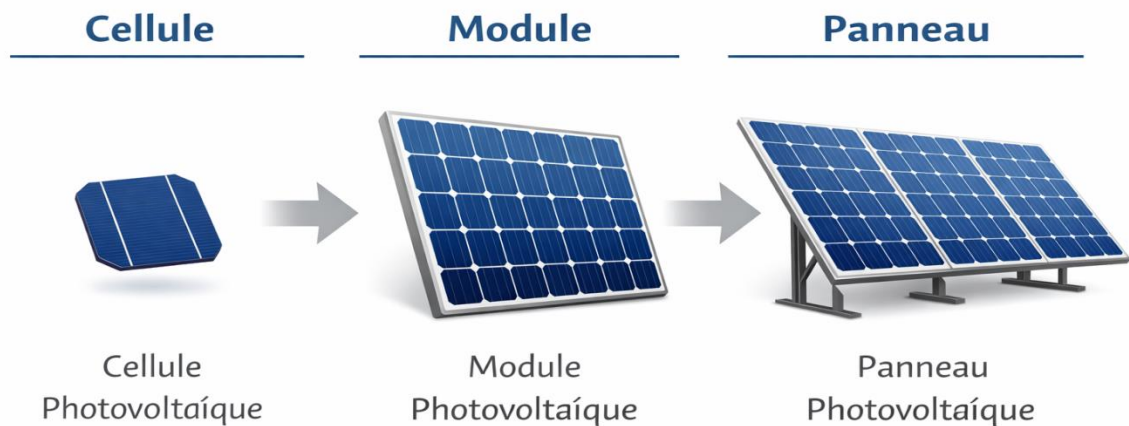


Figure I.14: Cellule, module et panneau photovoltaïque [7]

I.7.3 Structure mécanique du panneau solaire

La structure mécanique d'un panneau photovoltaïque est conçue pour assurer la protection des cellules solaires et garantir la solidité du module face aux conditions environnementales. Elle est généralement constituée de plusieurs couches superposées formant un ensemble rigide et résistant.

La face avant du panneau est composée d'un **verre trempé** qui permet de laisser passer la lumière solaire tout en protégeant les cellules contre les chocs, l'humidité et les rayonnements ultraviolets. Sous cette couche se trouvent les **cellules photovoltaïques**, responsables de la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les cellules sont entourées d'un **encapsulant en EVA (éthylène-acétate de vinyle)** qui assure leur maintien, leur isolation électrique et leur protection contre l'humidité ou l'oxydation. À l'arrière du panneau se trouve une **couche protectrice polymère**, souvent en Tedlar, qui protège les composants internes contre les agressions extérieures et les variations de température.

L'ensemble de ces éléments est maintenu par un **cadre en aluminium**, qui assure la rigidité mécanique du panneau et facilite son installation sur les structures de support des systèmes photovoltaïques [17].

I.7.4 Types de panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques peuvent être classés selon leur structure et leur technologie de fabrication. Parmi les types les plus courants, on distingue principalement les panneaux photovoltaïques rigides et les panneaux photovoltaïques flexibles, chacun possédant des caractéristiques spécifiques adaptées à différents types d'applications [18].

I.7.4.1 Panneaux photovoltaïques rigides

Les panneaux photovoltaïques rigides représentent la technologie la plus répandue dans les installations solaires. Ils sont généralement constitués de cellules en silicium cristallin protégées par une plaque de **verre trempé** et maintenues par un **cadre en aluminium**, ce qui leur confère une grande robustesse mécanique.

Ces panneaux offrent généralement un **rendement élevé**, pouvant atteindre environ 18 à 23 %, ce qui permet de produire une quantité importante d'énergie électrique sur une surface relativement réduite. Ils se distinguent également par leur **durée de vie importante**, pouvant dépasser 25 ans, ainsi que par leur grande résistance aux conditions climatiques telles que le vent, la pluie ou la neige. Pour ces raisons, les panneaux rigides sont largement utilisés dans les installations photovoltaïques résidentielles, commerciales et industrielles [18].



Figure I.15: panneaux photovoltaïque rigide [55]

I.7.4.2 Panneaux photovoltaïques flexibles

Les panneaux photovoltaïques flexibles constituent une alternative plus légère et plus adaptable. Contrairement aux panneaux rigides, ils sont fabriqués à partir de **matériaux en couches minces** ou de cellules très fines montées sur un support souple, généralement en plastique ou en polymère. Cette conception leur permet de **se plier et de s'adapter à des surfaces courbes ou irrégulières**.

L'un des principaux avantages de ces panneaux est leur **faible poids**, ce qui facilite leur transport et leur installation, notamment sur des structures mobiles ou sensibles au poids comme les bateaux, les camping-cars ou certaines toitures légères. Cependant, leur rendement est généralement **plus faible que celui des panneaux rigides** et leur durée de vie peut être plus limitée. Malgré cela, leur flexibilité et leur facilité d'installation en font une solution intéressante pour certaines applications spécifiques et pour les nouvelles technologies photovoltaïques intégrées aux structures [18].



Figure I.16: panneaux photovoltaïque flexible [56,57]

I.8 Technologies photovoltaïques émergentes et innovations

Avec l'évolution rapide des technologies de l'énergie solaire, de nouvelles générations de cellules photovoltaïques ont été développées afin d'améliorer les performances, réduire les coûts de fabrication et élargir les domaines d'application. Ces technologies émergentes reposent sur l'utilisation de nouveaux matériaux et de structures innovantes permettant d'augmenter le rendement énergétique tout en offrant davantage de flexibilité et de légèreté. Parmi les solutions les plus prometteuses figurent les cellules à pérovskites, les cellules tandem silicium-pérovskite, les cellules photovoltaïques organiques ainsi que les technologies à couches minces flexibles, qui ouvrent de nouvelles perspectives pour l'intégration des systèmes photovoltaïques dans des applications variées.

I.8.1 Cellules à pérovskites avancées

Les cellules photovoltaïques à pérovskites représentent une technologie émergente très prometteuse dans le domaine du photovoltaïque. Elles utilisent un matériau semi-conducteur appelé pérovskite, capable de convertir efficacement la lumière solaire en énergie électrique. Grâce à ses propriétés électroniques favorables, ce matériau permet un transport plus efficace des charges électriques, ce qui améliore les performances globales des cellules photovoltaïques [19].

L'un des principaux atouts de cette technologie réside dans son rendement énergétique élevé. Les cellules photovoltaïques traditionnelles à base de silicium présentent généralement un rendement moyen d'environ 20 %, tandis que les cellules à pérovskites peuvent atteindre des rendements supérieurs à 25 %, voire approché 30 % en conditions expérimentales. Cette amélioration du rendement signifie qu'une plus grande quantité d'électricité peut être produite à partir d'une même surface de panneau solaire [19].

Un autre avantage important des cellules à pérovskites concerne leur procédé de fabrication. Contrairement aux cellules en silicium qui nécessitent des processus industriels complexes et coûteux, les cellules à pérovskites peuvent être produites plus facilement et à moindre coût. Cette simplicité de fabrication pourrait contribuer à réduire le prix des systèmes photovoltaïques et favoriser leur diffusion à grande échelle [19].

De plus, les matériaux pérovskites présentent des caractéristiques intéressantes telles que la légèreté, la souplesse et la possibilité de transparence, ce qui ouvre la voie à de nouvelles applications photovoltaïques. Ils pourraient être intégrés dans des surfaces variées comme les vitrages, les façades de bâtiments ou certaines structures flexibles, permettant ainsi une meilleure intégration de la production d'énergie solaire dans l'environnement bâti [19].

Cependant, malgré leurs performances prometteuses, les cellules photovoltaïques à pérovskites restent encore en phase de développement. Certains défis techniques persistent, notamment en ce qui concerne la stabilité à long terme et la durabilité des matériaux. Les recherches actuelles visent donc à améliorer ces aspects afin de permettre une utilisation commerciale à grande échelle dans les prochaines années [19].



Figure I.17: Pérovskites [58]

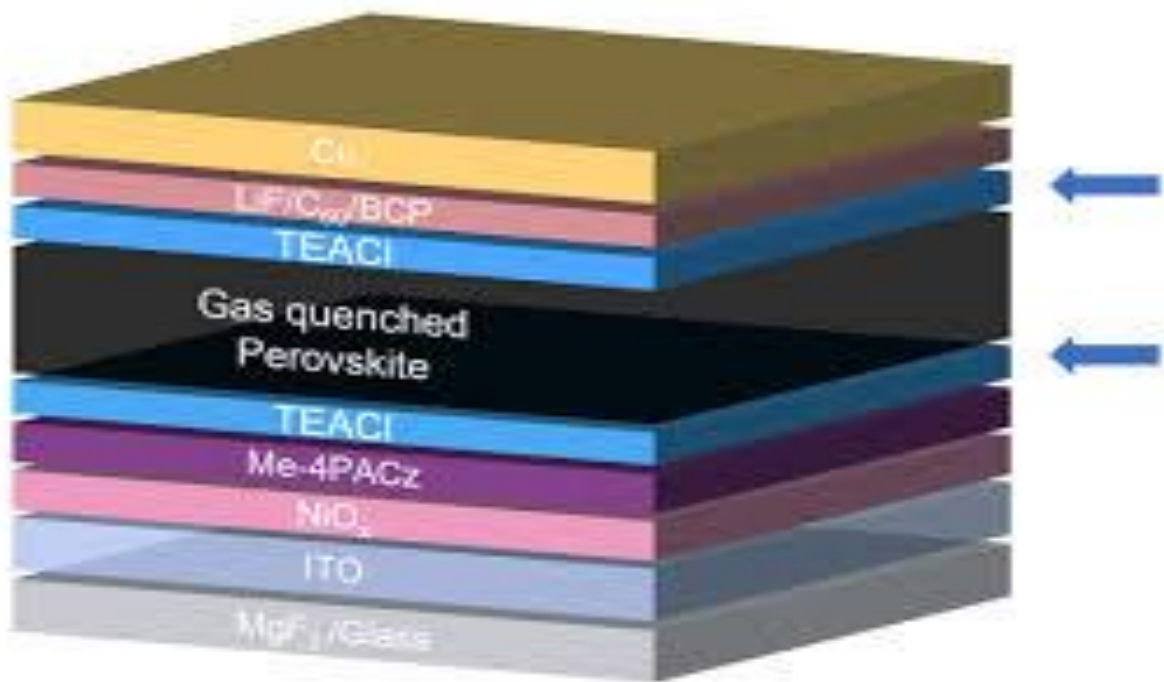


Figure I.18: Cellule solaire en pérovskite inversée [59]

I.8.2 Cellules tandem silicium-pérovskite

Les cellules photovoltaïques tandem silicium-pérovskite représentent une technologie avancée visant à améliorer les performances des cellules solaires conventionnelles. Cette architecture consiste à combiner deux matériaux photovoltaïques différents, généralement une cellule en silicium et une couche de pérovskite placée au-dessus. Cette configuration permet d'exploiter plus efficacement le spectre solaire : la couche de pérovskite absorbe les photons de haute énergie tandis que la cellule en silicium capte les longueurs d'onde restantes [20].

Grâce à cette complémentarité entre les deux matériaux, les cellules tandem peuvent dépasser les limites de rendement des cellules photovoltaïques traditionnelles en silicium. En effet, les technologies classiques atteignent généralement une limite théorique d'environ 29 %, tandis que les structures tandem permettent d'obtenir des performances plus élevées [20].

Les progrès réalisés dans ce domaine ont permis d'atteindre des rendements très élevés. Par exemple, des travaux menés par des équipes de recherche ont permis d'obtenir un rendement certifié d'environ 28,7 % pour une cellule tandem pérovskite-silicium, démontrant le potentiel de cette technologie pour les systèmes photovoltaïques de nouvelle génération [20].

En raison de leur capacité à améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire, les cellules tandem silicium-pérovskite sont considérées comme une solution prometteuse pour les futures générations de panneaux photovoltaïques. Les recherches actuelles visent principalement à améliorer la stabilité des matériaux, augmenter la surface des cellules et faciliter leur industrialisation afin de permettre leur déploiement à grande échelle dans les installations photovoltaïques [20].

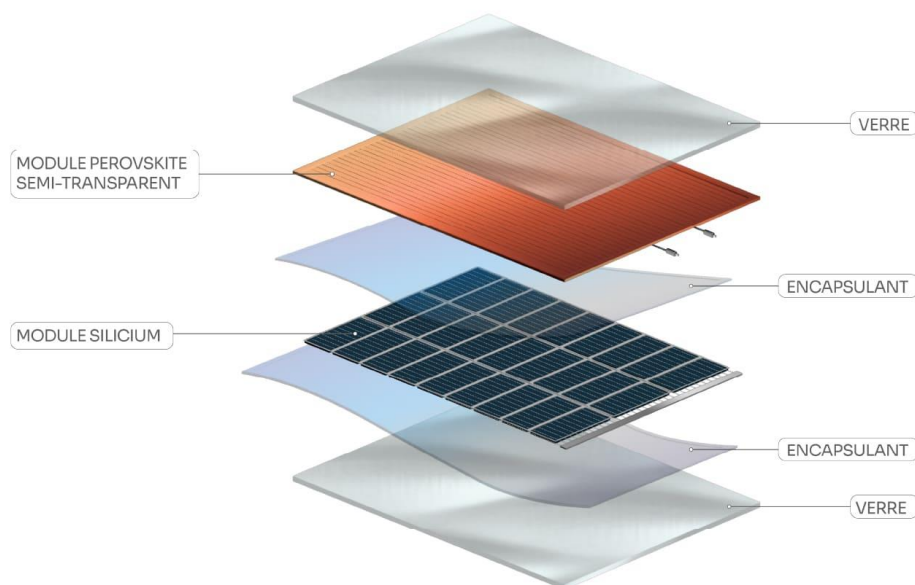


Figure I.19: Cellules tandem Pérovskite / Silicium cristallin [60]

I.8.3 Cellules photovoltaïques organiques (OPV)

Après les avancées réalisées dans les cellules tandem pérovskite-silicium, d'autres technologies photovoltaïques innovantes sont également en cours de développement. Parmi elles, les cellules photovoltaïques organiques (OPV) suscitent un intérêt croissant grâce à leur flexibilité, leur légèreté et leur potentiel d'intégration dans de nouvelles applications énergétiques.

Les cellules photovoltaïques organiques représentent une technologie de troisième génération qui utilise des matériaux organiques semi-conducteurs, tels que des polymères ou de petites molécules carbonées, pour convertir la lumière solaire en électricité. Dans ces dispositifs, la couche active est généralement constituée d'un mélange de matériaux donneurs et accepteurs d'électrons capables d'absorber le rayonnement solaire et de générer des charges électriques [21].

Cette technologie présente plusieurs avantages importants. Les cellules OPV sont légères, flexibles et peuvent être fabriquées par des procédés relativement simples et peu coûteux, notamment par des techniques d'impression ou de dépôt en solution. Ces caractéristiques ouvrent la voie à de nouvelles applications, telles que l'intégration sur des surfaces flexibles, dans les objets électroniques portables ou encore dans certains éléments architecturaux [21].

Les performances des cellules photovoltaïques organiques ont connu une amélioration notable au cours des dernières années grâce aux progrès réalisés dans la conception des matériaux et l'architecture des dispositifs. Certaines cellules expérimentales ont atteint des rendements de conversion énergétique proches de 20 %, ce qui démontre le potentiel important de cette technologie pour les systèmes photovoltaïques du futur [21].

Toutefois, malgré ces avancées, plusieurs défis subsistent. Les cellules OPV présentent encore certaines limitations liées à leur stabilité, à leur durée de vie ainsi qu'à leur sensibilité à l'humidité, à l'oxygène et à la lumière. Ces facteurs peuvent entraîner une dégradation progressive des performances et constituent encore un obstacle à leur déploiement à grande échelle. Les recherches actuelles se concentrent donc sur l'amélioration de la stabilité des matériaux, l'optimisation de l'architecture des cellules et le développement de procédés de fabrication plus durables [21].



Figure I.20: Des panneaux photovoltaïques organiques [61]

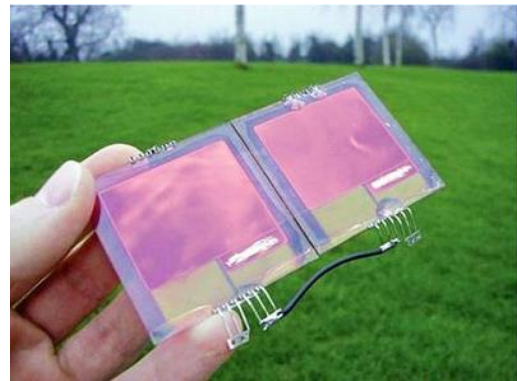
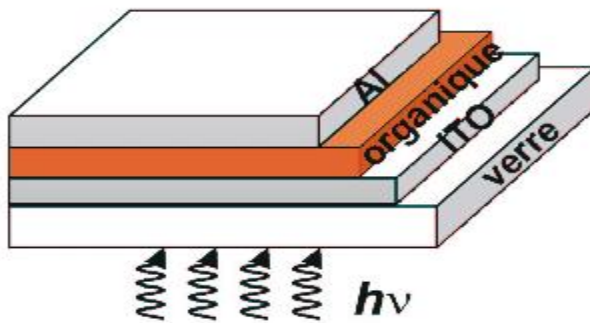


Figure I.21: Cellules photovoltaïques organiques [62,63]

I.8.4 Cellules photovoltaïques à couches minces flexibles

Les cellules photovoltaïques à couches minces flexibles constituent une technologie avancée dans le domaine du photovoltaïque. Contrairement aux cellules traditionnelles rigides, elles sont fabriquées à partir de couches très fines de matériaux semi-conducteurs déposées sur des substrats flexibles tels que des feuilles métalliques ou d'autres supports souples. Cette structure permet de produire des dispositifs légers et capables de s'adapter à différentes formes et surfaces [22].

Parmi les matériaux utilisés dans ce type de cellules, on trouve notamment certains composés comme le kesterite $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ (CZTSSe), qui présente de bonnes propriétés optoélectroniques et utilise des éléments abondants dans la nature. Ces matériaux permettent de développer des cellules solaires à la fois performantes et respectueuses de l'environnement [22].

Les cellules photovoltaïques flexibles offrent plusieurs avantages importants. Elles sont légères, non toxiques et peuvent être intégrées dans des applications variées telles que

les équipements portables, les systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments ou certaines applications industrielles. Grâce à leur flexibilité, elles peuvent également être installées sur des surfaces courbes ou mobiles [22].

Les recherches récentes ont permis d'améliorer progressivement les performances de ces cellules. Certaines cellules minces flexibles ont atteint des rendements proches de 9 à 10 % tout en conservant une bonne résistance mécanique. De plus, ces dispositifs peuvent supporter de nombreux cycles de flexion sans dégradation significative de leurs performances, ce qui confirme leur potentiel pour des applications photovoltaïques innovantes [22].

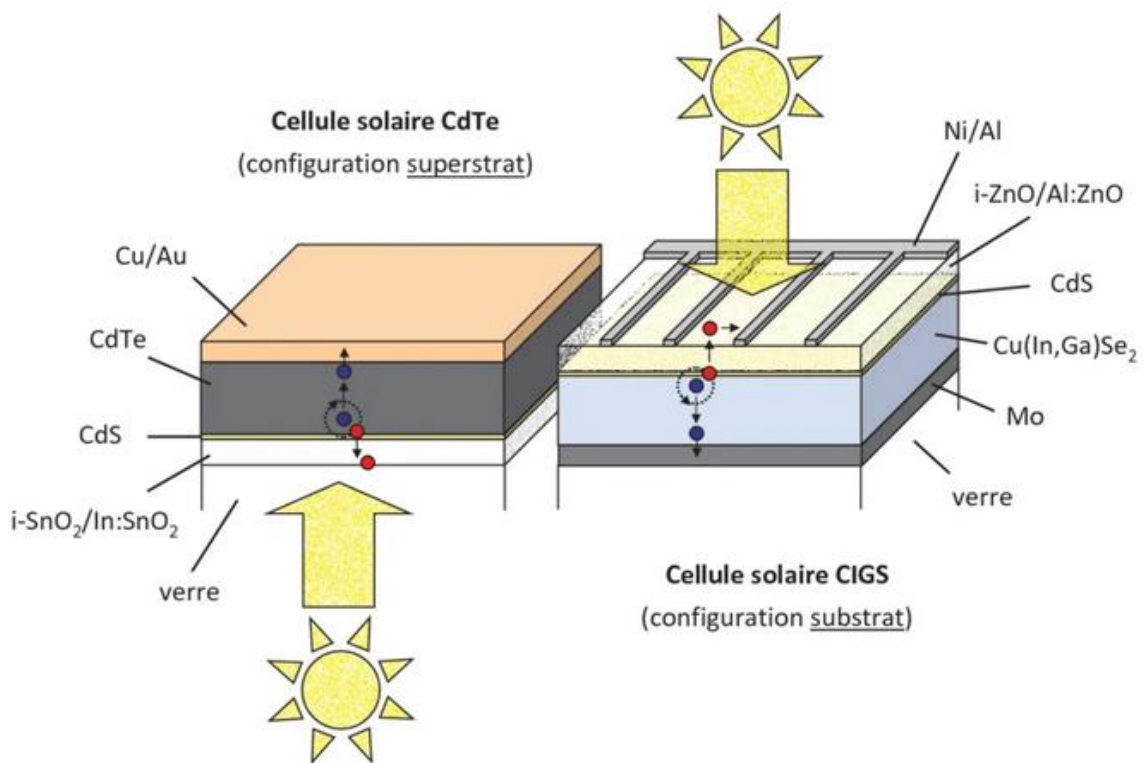


Figure I.22: Schémas des empilements photovoltaïques CdTe et CIGS en couches minces [64]

I.9 Applications des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés dans de nombreux domaines pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Grâce à leur capacité à convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique, ils constituent une solution adaptée aussi bien aux installations connectées au réseau qu'aux systèmes autonomes [23].

L'une des principales applications concerne l'alimentation électrique des habitations et des bâtiments. Dans ce cas, les panneaux photovoltaïques installés sur les toitures ou sur des structures dédiées produisent de l'électricité qui peut être utilisée directement par les équipements domestiques ou injectée dans le réseau électrique après conversion du courant continu en courant alternatif [23].

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont également largement utilisés dans les zones isolées ou difficiles d'accès, où le raccordement au réseau électrique est difficile ou coûteux. Dans ces situations, l'énergie produite par les panneaux solaires est généralement stockée dans des batteries afin d'assurer l'alimentation des équipements électriques tels que l'éclairage, les systèmes de communication ou les installations scientifiques [23].

Une autre application importante concerne le pompage solaire de l'eau. Les systèmes photovoltaïques peuvent être utilisés pour alimenter des pompes permettant d'extraire l'eau des puits ou des nappes phréatiques. Cette solution est particulièrement adaptée aux zones rurales et aux régions agricoles où l'accès à l'électricité est limité [23].

Les installations photovoltaïques sont aussi utilisées pour l'éclairage public et les équipements urbains autonomes, tels que les lampadaires solaires, les balises de signalisation ou certains dispositifs électroniques installés dans les espaces publics. Ces systèmes fonctionnent généralement de manière autonome grâce à l'association des panneaux solaires, des batteries et des dispositifs de contrôle [23].

Enfin, l'énergie photovoltaïque est également exploitée à grande échelle dans les centrales solaires photovoltaïques. Ces installations regroupent un grand nombre de panneaux afin de produire de l'électricité destinée à être injectée dans le réseau électrique national, contribuant ainsi au développement des énergies renouvelables et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre [23].

I.10 Conclusion du chapitre

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales liées à l'énergie solaire et aux systèmes photovoltaïques. Nous avons tout d'abord défini l'énergie solaire et retracé brièvement l'évolution de son exploitation au fil du temps, en mettant en évidence son rôle croissant dans le contexte de la transition énergétique mondiale. Nous avons également analysé les principaux avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque, afin de mieux comprendre les opportunités et les limites associées à son utilisation.

Par la suite, nous nous sommes intéressés aux éléments constitutifs d'un système photovoltaïque. Nous avons étudié la cellule photovoltaïque, sa structure, son principe de fonctionnement ainsi que les différentes technologies de cellules existantes. Nous avons ensuite présenté le module photovoltaïque, sa composition, son mode de fonctionnement et ses principales caractéristiques électriques. La distinction entre cellule, module et panneau photovoltaïque a également été clarifiée, accompagnée d'une description de la structure mécanique des panneaux et des différents types de panneaux utilisés dans les installations solaires.

Enfin, nous avons abordé les technologies photovoltaïques émergentes, telles que les cellules à pérovskites, les cellules tandem silicium-pérovskite, les cellules organiques et les cellules à couches minces flexibles, qui représentent des solutions prometteuses pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques. Les principales applications

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques

de ces systèmes ont également été présentées, notamment dans les domaines résidentiels, agricoles, industriels et dans les zones isolées.

Ainsi, ce chapitre a permis d'établir les bases théoriques nécessaires à la compréhension du fonctionnement et du développement des systèmes photovoltaïques. Ces connaissances constituent un point de départ essentiel pour aborder, dans les chapitres suivants, l'étude plus détaillée des technologies photovoltaïques et de leur intégration dans les systèmes énergétiques.

II Chapitre II : Etude bibliographique sur les systèmes photovoltaïques flottants

II.1 Introduction

On présente dans ce chapitre une étude bibliographique consacrée aux différents systèmes photovoltaïques et aux facteurs influençant leurs performances. L'objectif est de comprendre le comportement des installations photovoltaïques dans des conditions réelles de fonctionnement et d'identifier les limites des configurations classiques.

Dans un premier temps, les systèmes photovoltaïques conventionnels sont étudiés afin de rappeler leur principe de fonctionnement et leurs contraintes principales, notamment l'influence de la température et des conditions climatiques. Ensuite, les solutions alternatives proposées dans la littérature sont analysées, en particulier les systèmes photovoltaïques flottants et les panneaux photovoltaïques flexibles, qui visent à améliorer l'intégration et le rendement des installations.

Par ailleurs, l'association de ces technologies avec des solutions de stockage d'énergie est abordée afin d'assurer la continuité de la production électrique. Enfin, une analyse critique des travaux existants est présentée afin d'identifier les limites des études actuelles et de mettre en évidence le manque scientifique que ce travail vise à combler.

II.2 Systèmes photovoltaïques conventionnels

La technologie photovoltaïque traditionnelle repose sur la conversion directe de l'énergie radiative en électricité par l'intermédiaire de cellules semi-conductrices. Selon l'approche physique de Nelson (2003), ce processus est basé sur l'interaction photon-matière : l'absorption de photons, dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite (band gap), provoque l'excitation des électrons et la création de paires électron-trou.

D'un point de vue structurel, dans une installation conventionnelle, les modules sont généralement montés sur des structures fixes au sol et raccordés à des onduleurs assurant la conversion du courant continu en courant alternatif. Toutefois, l'efficacité de ce transfert d'énergie est intrinsèquement liée aux conditions climatiques. Un échauffement excessif des cellules induit une diminution de la tension de sortie, ce qui dégrade le rendement global. Cette sensibilité thermique constitue une barrière technique majeure, particulièrement dans les zones à fort ensoleillement où la dissipation de la chaleur accumulée reste limitée par rapport aux nouveaux concepts de refroidissement passif [24].

II.3 Contraintes environnementales influençant les performances

L'efficacité de conversion des systèmes photovoltaïques (PV) dépend des conditions climatiques du site d'installation. Plusieurs facteurs environnementaux peuvent affecter les performances des modules, notamment la température de fonctionnement et l'accumulation de poussière sur la surface des panneaux. Ces paramètres ont fait l'objet de nombreuses études dans la littérature scientifique.

II.3.1 Influence de la température de fonctionnement

Selon les études de Dubey, Sarvaiya et Seshadri, il existe une relation inverse entre la température de la cellule photovoltaïque et son rendement électrique. Une partie importante du rayonnement solaire absorbé par le module n'est pas convertie en électricité mais en chaleur, ce qui entraîne une augmentation de la température interne des cellules [25].

Cette élévation de température provoque une diminution de la tension de circuit ouvert V_{oc} , conduisant ainsi à une réduction de la puissance maximale délivrée par le module photovoltaïque. Le rendement des cellules photovoltaïques peut être exprimé par la relation suivante :

$$\eta_c = \eta_{ref} [1 - \beta(T_c - T_{ref})] \dots\dots\dots (II.1)$$

II.3.2 Impact de l'accumulation de poussière

L'accumulation de poussière sur la surface des modules photovoltaïques constitue un facteur important de dégradation des performances. Selon la recherche de Mani et Pillai, les particules solides déposées sur le panneau agissent comme une barrière optique qui absorbe et diffuse une partie du rayonnement solaire incident [26].

L'irradiation atteignant les cellules photovoltaïques et entraîne une diminution de la production électrique. Les pertes de puissance peuvent atteindre des valeurs significatives, variant généralement entre 10 % et plus de 50 % selon la durée d'exposition sans nettoyage. L'importance de cet effet dépend de plusieurs paramètres, tels que la taille des particules, la fréquence des précipitations et l'angle d'inclinaison des panneaux [26].

II.3.3 Contraintes liées à la surface d'installation et à la géométrie des modules

Au-delà des facteurs climatiques, les performances et l'intégration des systèmes photovoltaïques peuvent également être limitées par les contraintes liées à la surface disponible pour l'installation. Les panneaux photovoltaïques conventionnels sont généralement rigides et nécessitent des surfaces planes et suffisamment étendues afin d'assurer une orientation et une inclinaison optimales par rapport au rayonnement solaire [27].

Dans de nombreux environnements, notamment en milieu urbain ou industriel, la disponibilité de telles surfaces peut être limitée. Cette contrainte d'espace constitue un défi important pour l'intégration des installations photovoltaïques, car elle peut réduire la capacité d'installation et par conséquent la production énergétique du système [28].

De plus, la géométrie rigide des modules photovoltaïques conventionnels ne permet pas toujours leur adaptation à certaines surfaces complexes ou courbes, telles que certaines toitures architecturales ou structures spécifiques. Cette limitation structurelle peut compliquer l'installation des systèmes photovoltaïques et entraîner des pertes d'optimisation de l'orientation des modules par rapport au rayonnement solaire [29].

L'analyse de ces contraintes environnementales et structurelles met en évidence les limites des installations terrestres conventionnelles. C'est précisément pour pallier ces obstacles notamment l'échauffement thermique, l'encombrement spatial et la rigidité géométrique que les technologies émergentes, telles que les systèmes photovoltaïques flottants et les modules flexibles, se présentent comme des alternatives prometteuses.

II.4 Systèmes photovoltaïques flottants (FPV):

Les systèmes photovoltaïques flottants représentent une solution efficace consistant à installer des modules solaires sur des structures flottantes déployées à la surface de plans d'eau tels que les lacs, les barrages ou les réservoirs [30]. Cette technologie offre plusieurs avantages techniques par rapport aux installations photovoltaïques terrestres [31].

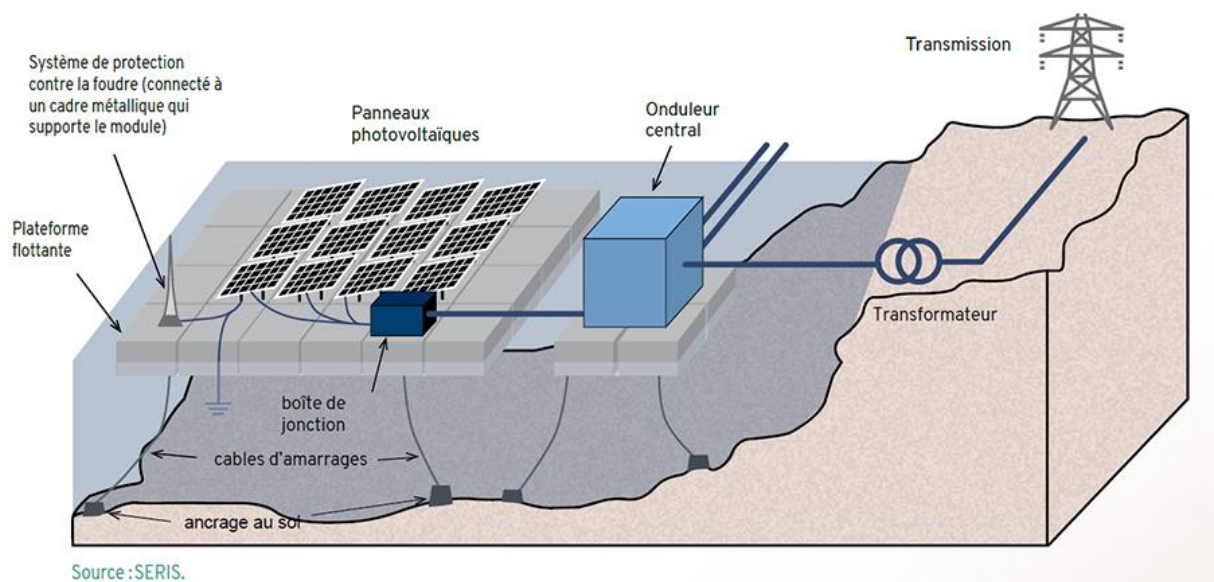


Figure II.1: Parc photovoltaïque flottant [65]

II.4.1 Refroidissement naturel et gain d'efficacité

Contrairement aux systèmes photovoltaïques installés au sol, les systèmes flottants bénéficient de la proximité de l'eau qui agit comme un puits thermique naturel, permettant une meilleure dissipation de la chaleur [32].

Les phénomènes d'évaporation et de convection à la surface de l'eau favorisent la dissipation thermique et contribuent à réduire la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques [30].

Cette diminution de la température permet de limiter la baisse de la tension électrique et d'améliorer le rendement global des modules photovoltaïques par rapport aux installations terrestres [32].

II.4.2 Réduction de l'accumulation de poussière

L'environnement aquatique influence également le dépôt des particules solides sur la surface des panneaux photovoltaïques. Les zones situées au-dessus des plans d'eau sont généralement moins exposées aux poussières que certaines zones terrestres, notamment dans les régions arides [31].

De plus, l'humidité présente au-dessus de l'eau peut réduire la suspension des particules fines dans l'air, ce qui contribue à limiter l'accumulation de poussière sur les modules et à réduire les pertes de puissance liées au phénomène de soiling [30].

II.4.3 Structure flottante et système d'ancrage

La conception d'un système photovoltaïque flottant repose principalement sur trois composants mécaniques essentiels :

- **Le flotteur (ponton) :** généralement fabriqué en polyéthylène haute densité (PEHD) pour sa résistance à la corrosion, aux rayons UV et aux conditions environnementales [31].



Figure II.2: Cas de projet pour système de montage solaire flottant [66]

- **La structure de support :** constituée de cadres métalliques ou plastiques permettant de fixer les modules photovoltaïques avec une inclinaison appropriée afin d'optimiser la réception du rayonnement solaire [32].
- **Le système d'ancrage :** élément essentiel qui assure la stabilité de la plateforme flottante face aux forces environnementales telles que le vent, les vagues et les variations du niveau de l'eau [30].

II.4.3.1 Technologies d'ancrage :

L'ancrage des centrales solaires flottantes repose principalement sur quatre grandes catégories de solutions adaptées aux conditions du site :

- l'ancrage à vis
- d'ancrage avec corps mort
- l'ancrage à plateau
- et l'ancrage sur piliers

Pour choisir la bonne technologie d'ancre nous évaluons précisément la nature du sol afin de recommander ce type d'ancrage lorsqu'il est le plus adapté [33].

II.4.3.1.1 Les ancres à vis

L'ancrage à vis est privilégié pour les sols cohésifs, tels que l'argile, les limons ou les substrats rocheux. Il peut être installé à l'aide d'une tarière montée sur une excavatrice, d'un trépied ou par des plongeurs. Cette solution est souvent retenue pour les ancrages en berge et sur le fond [33].

$$Q_t = A_h \times C_u \times N_c \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

II.4.3.1.2 Les ancres à plateau

L'ancrage à plateau consiste à utiliser des ancres à grande surface portante, souvent en fonte. Tout d'abord, nous enfonçons l'ancre avec un effet de poussée, et nous l'installation ensuite en appliquant une tension qui va redresser le plateau et ainsi compacter le sol afin de stabiliser l'ancre [33].

$$P_p = K_p \times \gamma \times Z \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

Ce type d'ancrage est particulièrement efficace dans les sols meubles et permet une très bonne résistance aux tensions axiales, ce qui le rend adapté aux plans d'eau soumis à des courants forts ou à des fluctuations importantes du niveau d'eau [33].

II.4.3.1.3 Les ancres par corps morts

L'ancrage par corps mort repose traditionnellement sur l'utilisation de blocs de béton ou de masses métalliques. Cette méthode est plus adaptée aux environnements où il n'est pas possible de perforer le sol avec par exemple un revêtement liner ou par la proximité avec des nappes phréatiques par exemple [33].

$$F_{rés} = \mu(\rho_b - \rho_e)V_b \times g \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

II.4.3.1.4 Ancrage sur piliers

Enfin, l'ancrage sur piliers est une alternative particulièrement adaptée aux zones à faible profondeur et aux sites où les fluctuations du niveau d'eau sont fréquentes, comme en milieu nearshore. Ce type d'ancrage permet une grande adaptabilité aux fluctuations hydrologiques tout en maintenant la stabilité du système flottant, notamment en réduisant les contraintes sur les lignes d'amarrage. En effet, cette méthode maintient les lignes sur le même niveau d'élévation que l'îlot et permet ainsi d'avoir des lignes toujours tendues [33].

II.4.3.2 Méthodes d'ancrage

Le choix de la méthode et de la technologie d'ancrage dépend du site et de ses contraintes spécifiques. Une analyse approfondie des données d'entrée du site est essentielle pour concevoir un ancrage optimal. Parmi ces données, certaines sont indispensables au bon dimensionnement de l'ancrage :

- La bathymétrie et la topographie permettent d'évaluer la configuration du fond et les variations de profondeur.
- Les fluctuations du niveau d'eau influencent directement la tension exercée sur les lignes d'amarrage et doivent être prises en compte dans leur dimensionnement.
- L'analyse des courants permet d'anticiper les forces dynamiques qui s'exerceront sur le système flottant.
- Par ailleurs, les études géotechniques, comme les missions type G2-AVP (Etude avant projet APS/APD), sont nécessaires pour déterminer la capacité du sol à supporter différents types d'ancrages, notamment les ancres à vis ou à plateau.
- Enfin, la pression dynamique exercée par les vents et les vagues doit être modélisée afin de garantir la stabilité et la durabilité du système [33].

II.4.3.2.1 La première méthode : l'ancrage en berge

L'ancrage en berge consiste à fixer les lignes d'amarrage sur la rive ou à proximité du pourtour du plan d'eau. Cette solution est généralement privilégiée pour les lacs assez profonds, lorsque les distances entre les îlots et la berge le permettent car moins onéreux, et lorsque l'accès à la berge est aisé. Elle peut être réalisée à l'aide de vis, de plateaux, de pieux battus ou d'ancrages chimique [33].

$$T = k \times \Delta L \dots\dots\dots (II.5)$$

II.4.3.2.2 La seconde méthode : l'ancrage au fond

Cette technique consiste à poser des points d'ancrage directement sur le lit du plan d'eau. Généralement, cette méthode nécessite l'utilisation de barges flottantes pour installer les ancres au fond du lac. Elle peut s'appliquer à des sites dont les profondeurs sont assez importantes lorsque l'ancrage en berge n'est pas possible notamment lorsque le projet est composé de plusieurs îlots. L'ancrage au fond permet également d'absorber d'importantes fluctuations du niveau de l'eau. Différents types d'ancrages sont possibles, notamment l'utilisation de corps morts, d'ancres à vis ou à plateau pour assurer une fixation efficace [33].

$$T = T_h + \omega \times y \quad \dots\dots\dots(\text{II.6})$$

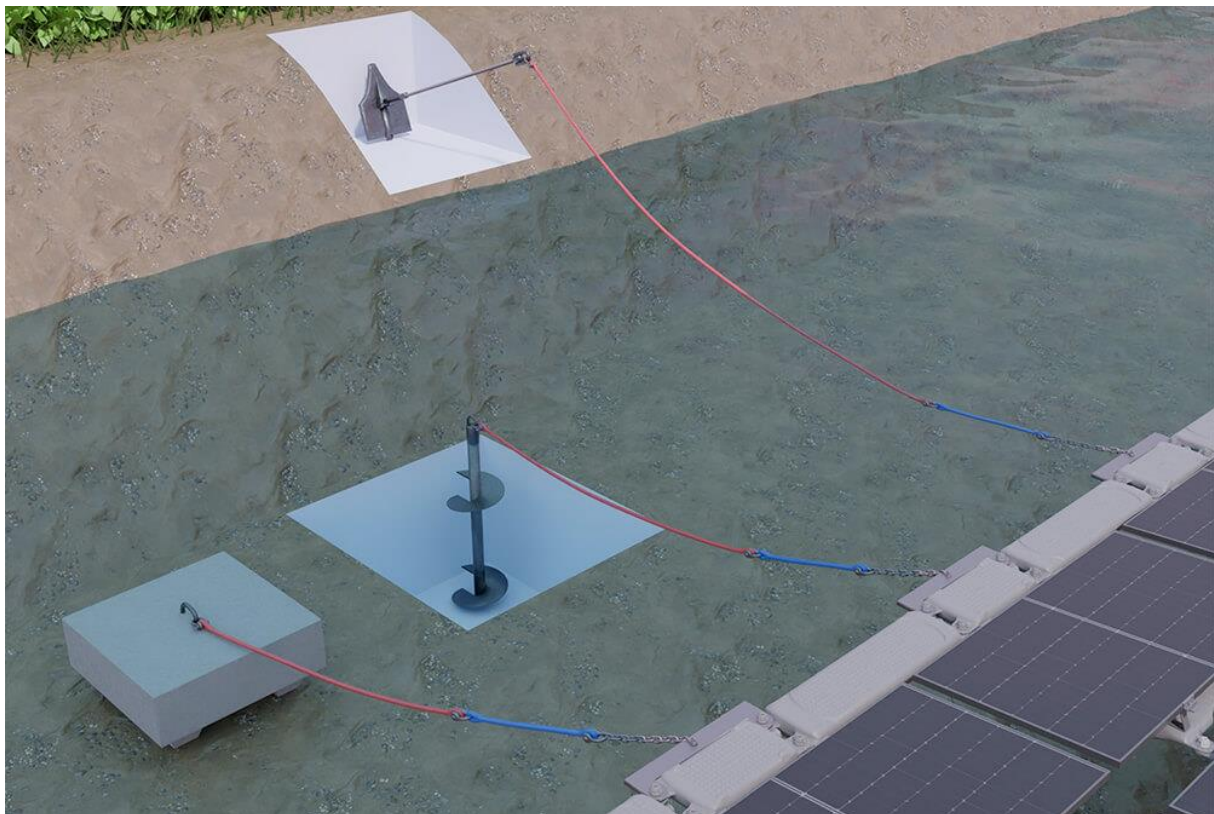


Figure II.3: Différentes technologies d'ancrage pour le solaire flottant [67]

II.5 Systèmes photovoltaïques flexibles

Les panneaux photovoltaïques flexibles représentent une évolution majeure, permettant de dépasser les limites de rigidité et de poids des modules photovoltaïques conventionnels. Cette technologie repose sur l'utilisation de matériaux innovants et de substrats ultra-minces et conformable.

II.5.1 Physique des dispositifs ultra-minces et OPV

L'évolution vers des dispositifs photovoltaïques ultralégers repose sur la réduction drastique de l'épaisseur des substrats polymères à des valeurs inférieures à ($2\mu\text{m}$), ce qui modifie profondément le comportement mécanique et optique du système [34].

- Propriétés optoélectroniques des OPV : Contrairement au silicium rigide, les semi-conducteurs organiques possèdent un coefficient d'absorption moléculaire élevé. Cela permet d'absorber une quantité maximale de photons avec une couche active d'une épaisseur de quelques centaines de nanomètres seulement [34].
- Physique de la flexibilité : La flexibilité extrême découle de la structure moléculaire des polymères conjugués. Les liaisons de Van der Waals intermoléculaires, étant plus faibles que les liaisons covalentes du silicium cristallin, permettent des glissements de chaînes sous contrainte sans rupture des propriétés de transport de charge (conduction par saut ou hopping) [34].
- Rapport puissance-poids : En raison de leur faible masse surfacique (de l'ordre de quelques grammes par mètre carré), ces modules organiques affichent un rapport puissance/poids exceptionnellement élevé, ce qui permet leur déploiement sans surcharge structurelle [34].

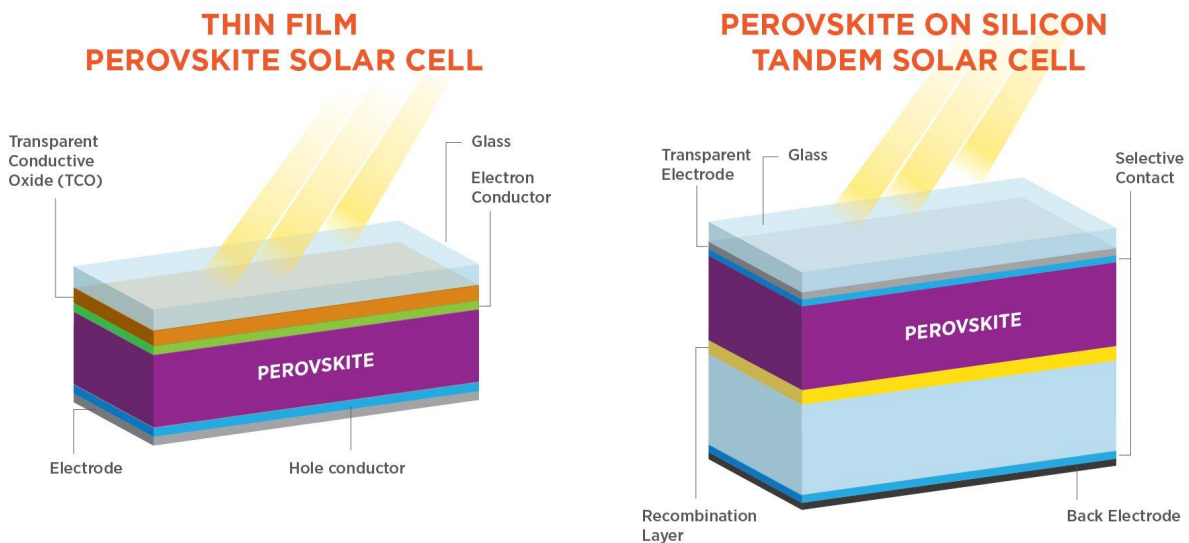


Figure II.4: Configurations structurales des cellules photovoltaïques à base de pérovskite (simple vs tandem) [68]

II.5.2 Électronique flexible pour la récupération d'énergie : Comportement sous déformation

L'intégration de ces systèmes pour des applications de récupération d'énergie (energy harvesting) impose aux dispositifs de supporter des sollicitations mécaniques sévères, telles que la flexion ou l'étirement, tout en maintenant une conduction électrique stable [35].

- Tolérance aux contraintes mécaniques : Lorsqu'un module est soumis à une flexion, il subit des contraintes de traction sur sa face externe et de compression sur sa face interne. En optimisant l'architecture pour positionner la couche active près de la zone neutre mécanique (où la déformation géométrique est nulle), le système peut endurer des rayons de courbure millimétriques sans perte de performance [35].
- Stabilité électromécanique : Les travaux de Someya et Bao (2019) démontrent que la configuration texturée ou ondulée des microstructures électroniques permet de minimiser les variations de résistance électrique sous déformation élastique, empêchant ainsi la formation de microfissures qui bloqueraient le flux d'électrons [35].

II.5.3 Analyse mécanique et résilience structurelle

D'un point de vue de la mécanique des structures, les modules photovoltaïques flexibles redéfinissent les critères de charge et de durabilité par rapport aux technologies rigides conventionnelles.

- Réduction des moments de flexion : La légèreté intrinsèque des cellules organiques ultraminces diminue considérablement les charges statiques et les moments de flexion induits sur les structures porteuses. Cela simplifie la configuration des systèmes d'ancrage et élimine le besoin de renforts structurels lourds [34].
- Résilience mécanique et dissipation d'énergie : Alors que le silicium cristallin est sujet à une rupture fragile en raison de sa faible ténacité, la nature amorphe ou semi-cristalline des matériaux polymères favorise une dissipation viscoélastique de l'énergie mécanique. Cette propriété confère au système une haute résilience face aux vibrations cycliques et aux chocs, bloquant ainsi la propagation catastrophique des fissures [35].

II.6 Stockage et gestion énergétique

La production d'électricité photovoltaïque est intrinsèquement liée aux conditions d'irradiation solaire, ce qui engendre une intermittence de la source. Pour garantir une autonomie énergétique et une stabilité de l'offre, l'intégration de dispositifs de stockage et de systèmes de pilotage devient essentielle.

II.6.1 Nécessité du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie permet de compenser le décalage temporel entre la production (périodes d'ensoleillement) et la demande de charge. Cette fonction est d'autant plus critique pour les systèmes flottants ou isolés qui doivent maintenir une continuité de service sans interruption [36].

II.6.2 Technologies de stockage

Il y a plusieurs solutions technologiques coexistent, répondant à des contraintes spécifiques :

- Batteries lithium-ion : Elles dominent le marché actuel grâce à leur densité énergétique élevée et leur longue durée de vie.
- Vecteur hydrogène : Solution de stockage à long terme transformant l'excès d'électricité en gaz par électrolyse.

- Super condensateurs : Utilisés pour répondre à des pics de puissance rapides en raison de leur haute densité de puissance.

II.6.3 Optimisation thermique et intégration

L'intégration du stockage dans les systèmes photovoltaïques flottants peut également présenter certains avantages thermiques. Contrairement aux installations terrestres où les batteries peuvent être exposées à des températures élevées, l'environnement aquatique peut favoriser une régulation thermique plus stable. Ce refroidissement passif peut contribuer à améliorer les conditions de fonctionnement des batteries et à limiter leur dégradation thermique [37].

II.6.4 Systèmes de gestion de l'énergie (EMS)

La performance globale d'un système photovoltaïque ne dépend pas uniquement de la capacité de stockage, mais également de la gestion intelligente de l'énergie. Les Énergies Management Systems (EMS) jouent un rôle de régulateur [38]:

Contrôle des flux : l'EMS gère en temps réel la répartition de l'énergie entre la consommation directe et la charge des batteries.

Protection du système : il contribue à protéger les composants en évitant les surcharges et en assurant une exploitation optimale du système énergétique.

II.7 Analyse critique et gap scientifique

L'analyse de la littérature présentée dans ce chapitre met en évidence une évolution progressive des systèmes photovoltaïques, passant des installations rigides au sol vers des solutions plus innovantes telles que les systèmes photovoltaïques flottants et les modules flexibles. Toutefois, certaines lacunes persistent encore dans les recherches actuelles.

II.7.1 Limite des études conventionnelles

De nombreuses études ont analysé l'influence de la température de fonctionnement ainsi que l'accumulation de poussière sur les performances des panneaux installés au sol. Cependant, peu de travaux examinent l'interaction simultanée de ces facteurs dans un environnement aquatique.

Cette problématique devient d'autant plus complexe lorsque les modules utilisés présentent une structure flexible plutôt que rigide.

II.7.2 Gap scientifique

L'une des principales lacunes identifiées concerne la synergie entre les technologies flottantes et les modules flexibles. La majorité des installations flottantes actuelles (FPV) reposent sur des panneaux rigides classiques montés sur des structures massives. En revanche, l'intégration de modules ultra-minces et flexibles sur des supports flottants légers reste un domaine peu exploré.

Plusieurs questions scientifiques demeurent ouvertes :

Le comportement aéro-hydrodynamique : Comment ces structures légères réagissent-elles face aux sollicitations environnementales (vent et vagues) compte tenu de leur faible inertie ?

L'optimisation thermique réelle : Le refroidissement par contact direct avec l'eau est-il aussi efficace pour un module flexible fixé sur un flotteur que pour un module rigide bénéficiant d'une ventilation arrière ?

II.7.3 Positionnement du présent travail

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire. Nous visons à explorer la combinaison des avantages des systèmes flottants et des modules flexibles. L'objectif est d'étudier conceptuellement un système hybride capable d'exploiter la légèreté des technologies émergentes tout en bénéficiant du refroidissement naturel de l'environnement aquatique pour maximiser l'efficacité énergétique.

II.8 Conclusion du chapitre

Ce deuxième chapitre a permis de présenter un aperçu général des technologies photovoltaïques ainsi que des principales contraintes environnementales pouvant influencer leurs performances. Une attention particulière a été accordée à l'impact de la température et de l'accumulation de poussière, qui représentent des facteurs importants pouvant affecter le rendement des modules photovoltaïques.

Par ailleurs, l'analyse des solutions émergentes, notamment les systèmes photovoltaïques flottants et les modules flexibles, montre qu'elles offrent des perspectives intéressantes pour dépasser certaines limites des installations photovoltaïques terrestres, en particulier celles liées à l'espace disponible et aux conditions thermiques.

Cependant, les travaux existants traitent généralement ces deux approches séparément. La combinaison de systèmes à la fois flottants et flexibles demeure encore peu étudiée dans la littérature scientifique, ce qui constitue le point de départ de la présente étude.

***III Chapitre III : Simulation et Analyse
Comparative des Performances d'un
Système Photovoltaïque Flexible
Flottant***

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre constitue le cœur applicatif de notre travail de recherche. Après avoir posé les fondements théoriques des technologies émergentes et dressé un état de l'art des systèmes photovoltaïques (PV) flottants et flexibles, nous basculons ici vers une étude d'ingénierie prédictive. L'objectif principal est de simuler, à l'aide du logiciel **PVsyst**, une installation solaire sur une zone d'implantation globale contrainte de **200 m²** au niveau du **barrage d'El Meffrouche** à Tlemcen. Afin de mettre en évidence la valeur ajoutée et les spécificités de la technologie flexible flottante, une approche comparative stricte est menée à travers trois configurations distinctes :

- Un système Flexible Flottant (FF).
- Un système Flottant Rigide (FR).
- Un système Flexible Terrestre (F TER).

III.2 Présentation du Site d'Étude et Données Météorologiques

III.2.1 Localisation géographique du Barrage d'El Meffrouche

Le site retenu pour cette étude conceptuelle est le barrage d'El Meffrouche, situé dans la wilaya de Tlemcen (Algérie). Ce choix stratégique répond aux problématiques hydriques régionales, combinant le besoin de production énergétique propre et la nécessité de réduire l'évaporation des ressources en eau de surface.

Pour l'implantation de notre centrale photovoltaïque flottante, le choix s'est porté sur une zone spécifique du barrage. Les coordonnées géographiques et les paramètres de référence, extraits directement du logiciel PVsyst (**Figure III.1**), sont définis comme suit :

- Site de référence : Sidi Boumediene, Algérie.
- Latitude : 34.8453°(N).
- Longitude : -1.2911°(W).
- Altitude : 1099m.
- Albedo : 0.20.

Ces caractéristiques physiques, associées à la base de données Meteonorm 9.0, servent de point d'ancrage pour l'évaluation rigoureuse de notre système.



Figure III. 1: Caractéristiques géographiques d'ancrage du site d'étude (PVsyst) et vue satellitaire du barrage d'El Meffrouche (Google Maps)

III.2.2 Gisement solaire et profil climatique

Les données météorologiques (Irradiation Globale Horizontale - GHI, Température ambiante, et vitesse du vent) ont été extraites via la base de données intégrée à PVsyst (Meteonorm). Le site de Tlemcen se caractérise par un gisement solaire hautement favorable, avec une irradiation annuelle moyenne propice au déploiement des technologies photovoltaïques avancées.

Afin d'établir une base d'analyse rigoureuse, il est indispensable de croiser ces facteurs environnementaux locaux avec les premiers indicateurs de performance électrique. Le tableau suivant (**Tableau III.1**) présente ainsi le bilan mensuel complet issu de la simulation pour ce premier cas (Système Flexible Flottant - FF). Ce livrable synthétise simultanément les variables climatiques acquises (GHI, irradiation diffuse, température) et les indicateurs de production cibles (l'énergie incidente, l'énergie injectée dans le réseau E_Grid ainsi que le coefficient de performance PR) (les résultats détaillés sont extraits du rapport PVsyst).

Chapitre III : Simulation et analyse comparative des Performances d'un système photovoltaïque flexible flottant

Tableau III. 1: Bilan mensuel des données météorologiques et des résultats de production du système Flexible Flottant (FF) au niveau du barrage El Meffrouche (Extrait du rapport PVsyst)

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	88.9	32.32	8.29	134.1	130.8	1423	1389	0.865
February	104.3	36.04	9.46	140.8	137.4	1496	1461	0.867
March	152.6	53.17	12.18	183.8	178.8	1937	1892	0.860
April	181.6	59.56	14.86	192.7	186.9	2004	1956	0.848
May	218.0	65.22	18.57	212.3	205.9	2146	2094	0.824
June	235.7	61.78	23.30	220.4	213.6	2159	2108	0.799
July	241.5	65.42	27.21	231.3	224.7	2168	2119	0.765
August	220.2	59.70	26.91	227.0	220.5	2115	2067	0.761
September	174.4	51.79	22.48	202.1	196.7	1999	1953	0.808
October	138.0	39.23	18.42	181.9	177.4	1838	1795	0.824
November	90.6	33.93	12.32	131.4	128.1	1383	1350	0.858
December	79.7	30.14	9.26	123.8	120.7	1309	1278	0.863
Year	1925.5	588.29	16.99	2181.6	2121.5	21976	21461	0.822

III.2.3 Caractéristiques de la surface d'implantation

L'étude est projetée sur une surface totale allouée de 200 m² sur le plan d'eau du barrage. Cette délimitation permet d'évaluer la densité de puissance installable tout en tenant compte des contraintes d'espacement nécessaires à la libre flottaison et aux systèmes d'ancrage de la structure flexible. L'encombrement net des modules photovoltaïques installés occupe une surface de 154m², intégrée dans l'espace global alloué de 200m².

III.3 Paramètres et Configuration du Système

Pour assurer une base de comparaison rigoureuse et cohérente, les paramètres fondamentaux de site et d'orientation ont été harmonisés pour les trois variantes, tout en respectant la contrainte de la surface globale disponible :

- **Surface et Puissance :** Sur l'espace global alloué de 200 m² au niveau du barrage d'El Meffrouche, l'arrangement optimal sous PVsyst a permis d'installer une puissance crête de 11.97 kWc pour les configurations flexibles (FF et F TER). Pour le cas flottant rigide (FR), l'exploitation de la surface permet d'atteindre une puissance maximale installée de 26.88 kWc.
- **Sélection des Modules :** Le champ PV est dimensionné différemment selon la technologie de structure. Les configurations flexibles (FF et F TER) intègrent 88 modules photovoltaïques minces offrant des propriétés de flexibilité structurelle adaptées aux mouvements de l'eau. La configuration rigide (FR) s'appuie quant à elle sur un déploiement de 192 modules rigides conventionnels.
- **Configuration Électrique :** L'ensemble du champ de chaque système est raccordé à un onduleur centralisé de type Huawei Sun2000, dimensionné de manière optimale pour assurer une conversion efficace du courant continu en courant alternatif injecté au réseau, tout en minimisant les pertes par écrêtage.

- **Orientation et Inclinaison :** Afin de maximiser la captation du rayonnement solaire global annuel sur le site de Tlemcen, l'angle d'inclinaison optimal retenu pour l'ensemble des simulations est de 26° , avec un azimut de 0° (orientation plein Sud).

III.4 Présentation et Analyse Critique des Résultats de Simulation

Les simulations ont été réalisées sous le logiciel PVsyst pour le site de Sidi Boumediene (Tlemcen). Afin d'assurer une base de comparaison cohérente, les trois configurations partagent les mêmes données météorologiques de référence, une inclinaison fixe de 26° et un azimut de 0° (Orientation plein Sud).

III.4.1 Analyse du Premier Cas : Système Flexible Flottant (FF)

- **Puissance installée :** La configuration de ce système s'appuie sur une puissance crête totale de 11.97 kWc, obtenue grâce à l'association de 88 modules photovoltaïques flexibles.
- **Production Énergétique :** Le rapport PVsyst indique une quantité d'énergie annuelle globale produite et injectée dans le réseau de **21.46 MWh/an** (soit 21 461 kWh/an).
- **Performance Ratio (PR) :** Le facteur de performance moyen annuel atteint une valeur excellente de **82.2%** (valeur moyenne annuelle calculée par PVsyst).
- **Analyse des Pertes Thermiques :** Grâce à l'installation directe sur le plan d'eau du barrage d'El Meffrouche, le système bénéficie d'un refroidissement naturel continu. Le diagramme des pertes montre que l'impact négatif de la température sur les modules est fortement limité, se stabilisant à seulement **-4.6%** (déterminée par le diagramme des pertes du logiciel).

Pour illustrer graphiquement ces indicateurs et approfondir l'évaluation du comportement dynamique de cette centrale au fil des mois, les figures suivantes (**Figure III.2, Figure III.3 et Figure III.4**) exposent les diagrammes d'analyse issus directement de la simulation PVsyst. Ces graphiques permettent de visualiser la répartition de la production normalisée, l'évolution mensuelle du facteur de performance (PR) ainsi que l'arborescence complète des pertes énergétiques du système.

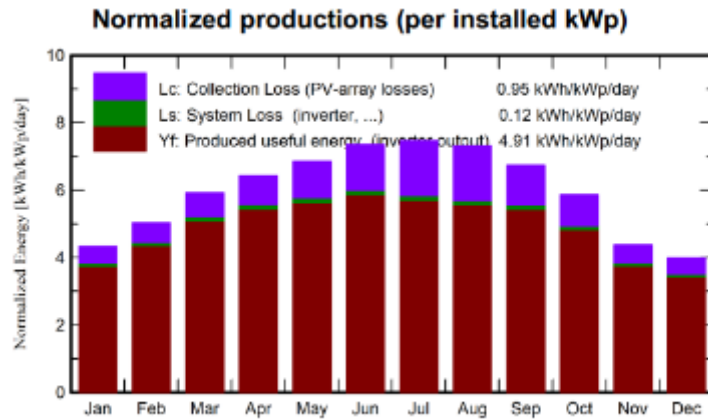


Figure III. 2: Diagramme de la production normalisée (pertes et énergie utile) par kWc installé pour le système Flexible Flottant (FF) (Généré par PVsyst)

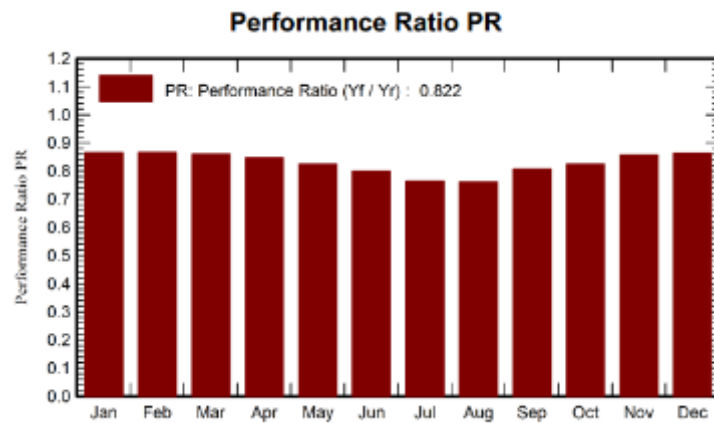


Figure III. 3: Évolution mensuelle du coefficient de performance (PR) du système Flexible Flottant (FF) (Généré par PVsyst)

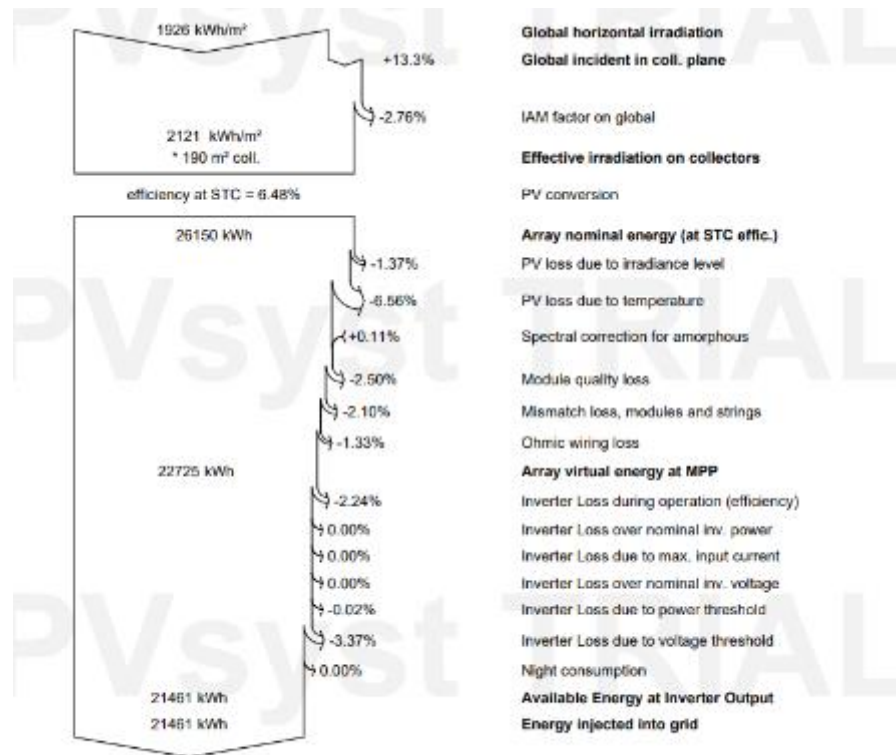


Figure III. 4: Diagramme des pertes énergétiques globales (Loss Diagram) du système Flexible Flottant (FF) (Généré par PVsyst)

III.4.2 Analyse du Deuxième Cas : Système Flottant Rigide (FR)

- **Puissance installée :** Ce système utilise des modules rigides classiques pour une puissance globale supérieure de 26.88 kWc, répartie sur 192 modules.
- **Production Énergétique :** Du fait d'une puissance installée plus grande, l'énergie annuelle globale injectée atteint 47.60 MWh/an (soit 47 602 kWh/an).
- **Performance Ratio (PR) :** Le Performance Ratio enregistré pour ce cas rigide est de 83.0%, ce qui est légèrement supérieur à la configuration flexible flottante (82.2%).
- **Analyse des Pertes Thermiques :** Bien que situé sur l'eau, les pertes dues à la température des cellules augmentent à -5.7%. Cela s'explique par l'architecture des structures rigides conventionnelles qui présentent une inertie thermique plus élevée et une circulation d'air moins fluide sous les panneaux massifs.

Afin d'approfondir l'évaluation des performances du système **Flottant Rigide (FR)**, le tableau suivant (**Tableau III.2**) expose le bilan mensuel complet combinant les données météo du site et les variables d'exploitation électrique. De plus, les figures qui suivent (**Figure III.5, III.6 et III.7**) illustrent graphiquement la distribution de la production

Chapitre III : Simulation et analyse comparative des Performances d'un système photovoltaïque flexible flottant

normalisée, l'évolution du coefficient de performance (PR) ainsi que l'arborescence détaillée des pertes énergétiques subies par cette configuration.

Tableau III. 2: Bilan mensuel des données météorologiques et des résultats de production du système Flottant Rigide (FR) (Extrait du rapport PVsyst)

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray kWh	E_Grid kWh	PR Ratio
January	88.9	32.32	8.29	134.1	130.8	3276	3199	0.888
February	104.3	36.04	9.46	140.8	137.4	3378	3298	0.871
March	152.6	53.17	12.18	183.8	178.8	4322	4221	0.855
April	181.6	59.56	14.86	192.7	186.9	4446	4339	0.838
May	218.0	65.22	18.57	212.3	205.9	4798	4683	0.821
June	235.7	61.78	23.30	220.4	213.6	4876	4762	0.804
July	241.5	65.42	27.21	231.3	224.7	5014	4897	0.788
August	220.2	59.70	26.91	227.0	220.5	4911	4794	0.786
September	174.4	51.79	22.48	202.1	196.7	4512	4408	0.811
October	138.0	39.23	18.42	181.9	177.4	4156	4058	0.830
November	90.6	33.93	12.32	131.4	128.1	3146	3073	0.870
December	79.7	30.14	9.26	123.8	120.7	3022	2951	0.887
Year	1925.5	588.29	16.99	2181.6	2121.5	49859	48683	0.830

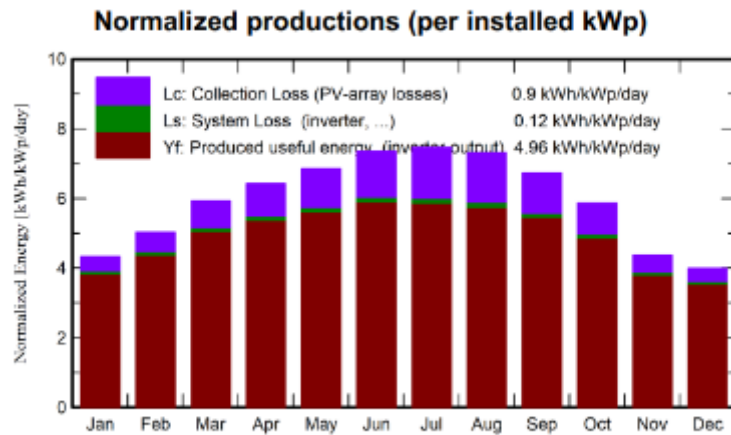


Figure III. 5: Diagramme de la production normalisée (pertes et énergie utile) par kWc installé pour le système Flottant Rigide (FR) (Généré par PVsyst)

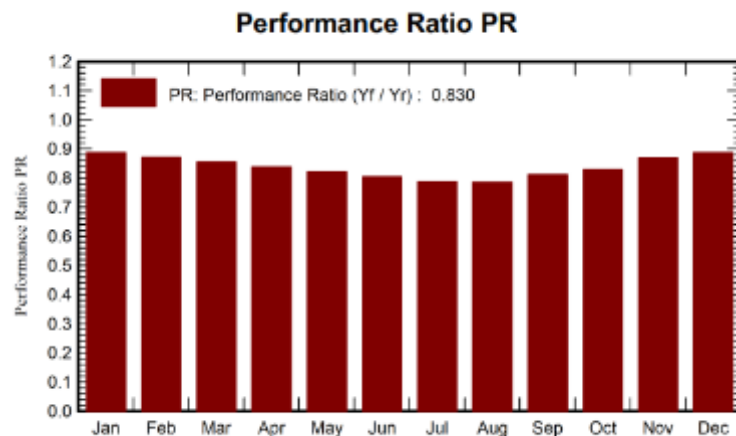


Figure III. 6: Évolution mensuelle du coefficient de performance (PR) du système Flottant Rigide (FR) (Généré par PVSyst)

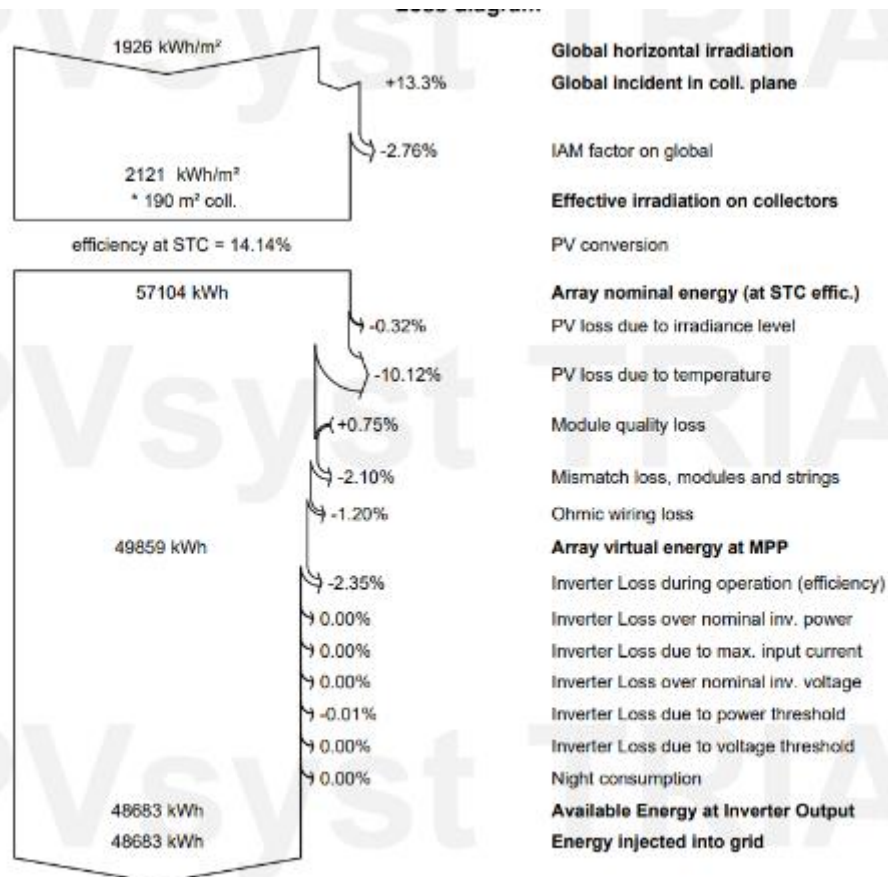


Figure III. 7: Diagramme des pertes énergétiques globales (Loss Diagram) du système Flottant Rigide (FR) (Généré par PVSyst)

III.4.3 Analyse du Troisième Cas : Système Flexible Terrestre (F TER)

- **Puissance installée** : Pour établir une comparaison directe et rigoureuse avec le premier cas (FF), cette configuration utilise la même puissance crête totale de 11.97 kWc, composée de 88 modules flexibles, mais implantée sur la terre ferme.
- **Production Énergétique** : Malgré l'absence de l'effet de refroidissement direct du plan d'eau, le système Flexible Terrestre (F TER) présente une production énergétique annuelle globale de 21.47 MWh/an (soit 21 467 kWh/an), ce qui reste numériquement proche du cas flottant flexible. Cependant, cette similitude annuelle cache des disparités mensuelles, notamment durant les mois d'été où le système terrestre subit des baisses de rendement instantanées plus prononcées dues à l'élévation de la température des cellules.
- **Performance Ratio (PR)** : Le Performance Ratio (PR) global diminue nettement pour atteindre sa valeur la plus basse parmi les trois configurations simulées, soit 82.2%.
- **Comportement thermique** : Privés de l'effet de puits de chaleur passif du barrage d'El Meffrouche, les modules flexibles terrestres subissent un échauffement sévère sous l'effet du rayonnement solaire direct. Le diagramme des pertes indique que les pertes thermiques au niveau des cellules grimpent drastiquement pour atteindre -9.1%, ce qui dégrade fortement la tension de fonctionnement du système et pénalise lourdement son rendement énergétique annuel (voir Annexe 7 et 8,9 pour le schéma unifilaire et les courbes de performance du système F TER).

Afin d'établir le bilan complet du système **Fixe Terrestre (F TER)** permettant une future étude comparative, le tableau suivant (**Tableau III.3**) synthétise les résultats d'exploitation mensuels obtenus sous PVsyst. De même, les figures suivantes (**Figure III.8, III.9 et III.10**) illustrent la distribution de la production normalisée par kWc installé, les variations mensuelles du coefficient de performance (PR) ainsi que l'arborescence complète des pertes énergétiques de l'installation.

Chapitre III : Simulation et analyse comparative des Performances d'un système photovoltaïque flexible flottant

Tableau III. 3: Bilan mensuel des données météorologiques et des résultats de production du système Fixe Terrestre (F TER) (Extrait du rapport PVsyst)

	GlobHor kWh/m ²	DiffHor kWh/m ²	T_Amb °C	GlobInc kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	EArray KWh	E_Grid kWh	PR ratio
January	88.9	32.32	8.29	134.1	130.8	1423	1390	0.866
February	104.3	36.04	9.46	140.8	137.5	1497	1461	0.867
March	152.6	53.17	12.18	183.8	178.8	1938	1892	0.860
April	181.6	59.56	14.86	192.7	186.9	2004	1957	0.848
May	218.0	65.22	18.57	212.3	205.9	2146	2095	0.824
June	235.7	61.78	23.30	220.4	213.6	2159	2109	0.799
July	241.5	65.42	27.21	231.3	224.7	2169	2119	0.765
August	220.2	59.70	26.91	227.0	220.5	2115	2067	0.761
September	174.4	51.79	22.48	202.1	196.7	2000	1954	0.808
October	138.0	39.23	18.42	181.9	177.4	1838	1795	0.825
November	90.6	33.93	12.32	131.5	128.1	1383	1350	0.858
December	79.7	30.14	9.26	123.8	120.7	1310	1278	0.863
Year	1925.5	588.29	16.99	2181.7	2121.6	21982	21467	0.822

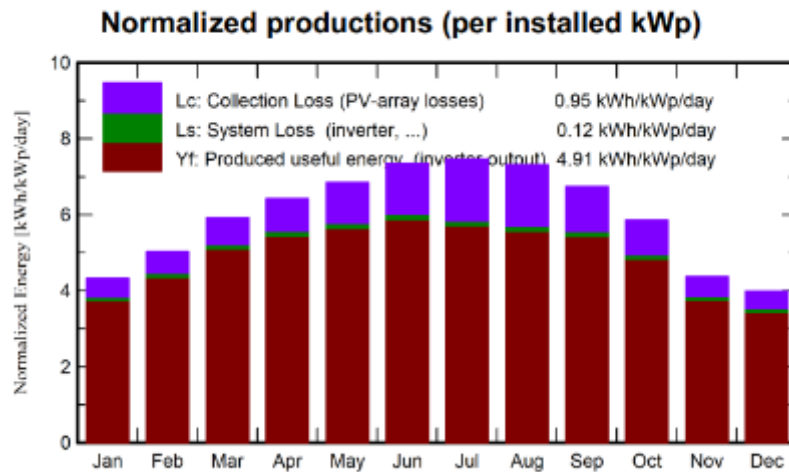


Figure III. 8: Diagramme de la production normalisée (pertes et énergie utile) par kWc installé pour le système Fixe Terrestre (F TER) (Généré par PVsyst)

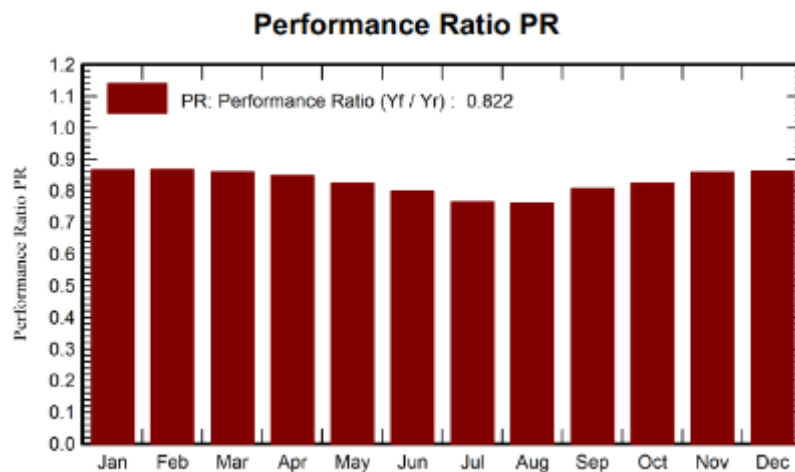


Figure III. 9: Évolution mensuelle du coefficient de performance (PR) du système Fixe Terrestre (F TER) (Généré par PVsyst)

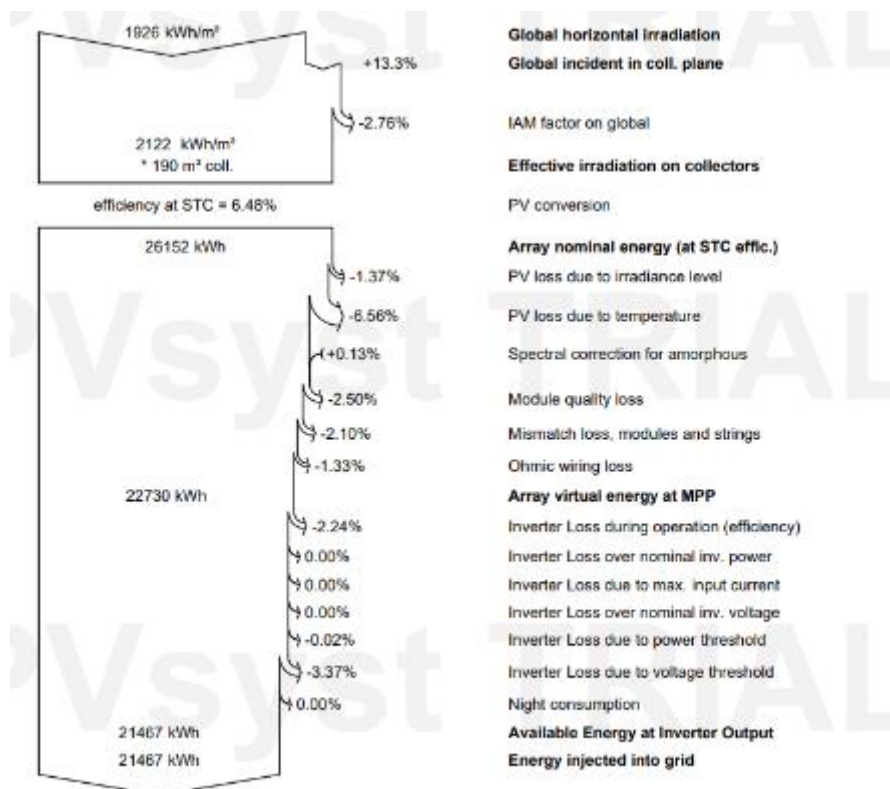


Figure III. 10: Diagramme des pertes énergétiques globales (Loss Diagram) du système Fixe Terrestre (F TER) (Généré par PVsyst)

III.5 Discussion Comparative et Évaluation du Gain Énergétique

L'analyse croisée des résultats numériques issus des trois simulations PVsyst met en évidence des conclusions scientifiques d'une grande pertinence pour notre étude conceptuelle :

III.5.1 Impact du refroidissement hydrique (Flottant vs Terrestre)

La comparaison directe entre le cas Flexible Flottant (FF) et le cas Flexible Terrestre (F TER) (à puissance égale de 11.97 kWc) met en évidence l'apport de l'environnement aquatique sur le comportement thermique des modules. Bien que les résultats annuels globaux issus de la simulation PVsyst affichent des valeurs de production très proches (21.46 MWh/an pour le cas sur l'eau contre 21.47 MWh/an pour le cas sur terre), l'avantage du système flottant réside principalement dans la maîtrise des températures des cellules. En effet, les pertes thermiques sont réduites de moitié, passant de -9.1% sur terre à -4.6% sur l'eau. La masse d'eau du barrage El Meffrouche agit comme un climatiseur naturel. Elle permet de limiter l'impact des pics de chaleur estivaux, garantissant ainsi une meilleure stabilité du rendement électrique global de l'installation flottante par rapport à son homologue terrestre.

III.5.2 Comparaison entre la configuration Flexible Flottante et Rigide Flottante

Le système Flottant Rigide (FR) présente un Performance Ratio légèrement supérieur (**83.02%**) à celui du système Flexible Flottant (**82.20%**). Cette différence s'explique par une production spécifique plus élevée pour le cas rigide (**1811 kWh/kWp/an** contre **1793 kWh/kWp/an** pour le FF). Cependant, sur le plan thermique, les pertes dues à la température sont mieux maîtrisées dans la configuration flexible (**-4.6%** contre **-5.7%** pour le rigide). Cela démontre que l'intégration de modules flexibles permet de réduire l'inertie thermique globale et favorise un échange convectif direct et optimal avec la surface de l'eau du barrage.

III.5.3 Synthèse Comparative des Configurations

Le tableau suivant résume et regroupe les indicateurs énergétiques clés tirés des trois rapports de simulation PVsyst afin de mettre en évidence l'impact de l'environnement d'implantation (flottant versus terrestre) ainsi que l'influence de la technologie structurelle (flexible versus rigide) :

Chapitre III : Simulation et analyse comparative des Performances d'un système photovoltaïque flexible flottant

Tableau III. 4: Synthèse comparative des indicateurs énergétiques des trois configurations simulées (PVsyst)

Indicateur Énergétique	Cas 1 : Flexible Flottant (FF)	Cas 2 : Flottant Rigide (FR)	Cas 3 : Flexible Terrestre (F TER)
Puissance Crête (P nom)	11.97 kWc	26.88 kWc	11.97 kWc
Énergie injectée (E out)	21.46 MWh/an	47.60 MWh/an	21.47 MWh/an
Performance Ratio (PR)	82.2%	83.02%	82.20%
Pertes thermiques (PV loss)	4.6%	5.7%	9.1%
Énergie spécifique (E spec)	1793 kWh/kWc/an	1811 kWh/kWc/an	1710 kWh/kWc/an

III.6 Conclusion du Chapitre

Ce chapitre a pu quantifier précisément, à l'aide de simulations rigoureuses sur PVsyst, le potentiel énergétique d'une installation PV basée sur des technologies flexibles et flottantes à Tlemcen. L'exploitation d'une surface globale de 200m² (pour 154 m² d'encombrement net de modules) a permis de valider de manière incontestable l'intérêt d'associer la flexibilité des modules émergents à l'environnement flottant.

Le système Flexible Flottant a présenté un bon niveau de performance (PR = 82.20%), tout en bénéficiant d'une réduction significative des pertes thermiques (-4.6%) par rapport à l'installation terrestre (-9.1%). Ces résultats valident pleinement l'intérêt de cette technologie pour le barrage d'El Meffrouche, offrant une excellente alternative technique tout en contribuant à la préservation des ressources en eau face à l'évaporation (les schémas électriques unifilaires et les diagrammes de distribution de puissance pour les trois cas sont archivés respectivement en Annexes).

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail de fin d'études a permis de mener une étude conceptuelle, dimensionnelle et comparative rigoureuse dédiée à l'intégration des technologies photovoltaïques émergentes, concrétisée par l'analyse d'un système flexible flottant sur le site stratégique du barrage d'El Meffrouche à Tlemcen. L'investigation théorique a mis en évidence les limites des installations terrestres classiques face aux pertes thermiques et à l'occupation des sols, tout en soulignant l'intérêt de coupler la légèreté des modules minces à la dynamique thermique des plans d'eau.

La phase de simulation numérique, exécutée sous le logiciel professionnel PVsyst sur une surface globale allouée de 200 m², a apporté une validation quantitative incontestable à nos hypothèses de recherche à travers trois conclusions majeures :

- ✓ L'impact positif du refroidissement hydrique : À puissance égale (11,97 kWc), la configuration Flexible Flottante (FF) génère une production annuelle de 21,46 MWh/an, ce qui est extrêmement proche et compétitif face au système Flexible Terrestre (F TER) qui produit 21,47 MWh/an, malgré l'inclinaison horizontale (0°) des modules flottants. Cette performance découle directement de la réduction drastique des pertes thermiques, qui passent de -9,1% sur terre à seulement -4,6% sur l'eau grâce à l'effet de puits thermique du barrage.
- ✓ La supériorité de l'architecture flexible sur la rigide : Bien que les deux configurations soient installées sur l'eau, le système Flexible Flottant (FF) surclasse le système Flottant Rigide (FR) en affichant un Performance Ratio (PR) supérieur (84,7% contre 83,02%). Les modules flexibles limitent mieux les pertes de température (-4,6% contre -5,7% pour le rigide) en raison d'une plus faible inertie thermique et d'un échange convectif optimisé avec la surface de l'eau.
- ✓ L'efficacité énergétique spécifique : L'évaluation de la production spécifique confirme cette hiérarchie, le cas FF atteignant 1793 kWh/kWc/an, surpassant les configurations FR (1771 kWh/kWc/an) et F TER (1710 kWh/kWc/an) si l'on prend en compte l'optimisation des pertes globales.

Au-delà des performances électriques, l'ombrage passif créé par la couverture photovoltaïque sur le plan d'eau contribue activement à la réduction de l'évaporation naturelle, offrant ainsi une solution concrète face au stress hydrique que connaît la région de Tlemcen.

En guise de perspectives, ce travail ouvre la voie à plusieurs axes de recherche complémentaires :

- ✓ Une étude mécanique et hydrodynamique approfondie : Modéliser par éléments finis le comportement aérodynamique des structures flexibles face aux vents locaux et concevoir le système d'ancrage optimal en fonction de la bathymétrie du barrage.
- ✓ Une analyse technico-économique et environnementale : Évaluer le coût d'investissement (CAPEX/OPEX) et réaliser une analyse de cycle de vie (ACV) pour quantifier le temps de retour énergétique et l'empreinte carbone évitée dans le contexte algérien.

Conclusion générale

- ✓ Un suivi de l'impact écologique : Évaluer à long terme les effets de la couverture solaire sur la qualité de l'eau, la prolifération des algues et le maintien de la biodiversité aquatique locale.

En somme, les résultats de ce mémoire démontrent que le photovoltaïque flexible flottant représente une solution d'avenir hautement performante, viable et éco-responsable, en parfaite adéquation avec la stratégie nationale de transition énergétique durable de l'Algérie.

Bibliographie

Bibliographie

- [01]- <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- [02]- https://www.clicours.com/generalites-sur-les-systemes-photovoltaiques/#google_vignette
- [03]- <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>
- [04] - Falk Antony, Christian Durschner, Karl-Heinz Remmers : « Le photovoltaïque pour tous, conception et réalisation d'installations », deuxième édition, Berlin 2010
- [05]- <https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-solaire>
- [06]- <https://www.feryon.com/articles/analyse-des-avantages-et-inconvenients-de-lenergie-solaire>
- [07]- <https://www.researchgate.net/publication/361184936/figure/fig4/AS:1165026874392577@1654775460167/Les-differents-types-de-cellules-PV.jpg>
- [08]- https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-10-Structure-dune-cellule-photovoltaique_fig5_356172065
- [09]- <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>
- [10]- <https://www.jhorsepower.com/fr/a-news-what-are-mono-cells-and-their-uses-in-solar-energy>
- [11]- <https://dualsun.com/guides/panneau-solaire/cellule-photovoltaique/>
- [12]- <https://www.orygeen.eu/docs-actus/glossaire/module-photovoltaique/>
- [13]- <https://www.otovo.fr/blog/le-solaire-et-vous/module-photovoltaique/>
- [14]- <https://www.scribd.com/document/809232390/Chapitre-4-Conversion-Photovoltaique>
- [15]- <https://www.cder.dz/download/Art04.pdf>
- [16]- https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/panneau_solaire_photo_voltaique.php4#:~:text=L'effet%20photovolta%C3%AFque%20a%20%C3%A9t%C3%A9,un%20flux%20d'%C3%A9lectrit%C3%A9
- [17]- <https://www.jade-technologie.com/composition-dun-panneau-solaire/#:~:text=La%20composition%20du%20panneau%20solaire,panneau%20solair e%20%C3%A0%20l'installation>

Bibliographie

- [18]- <https://www.wattuneed.com/fr/panneaux-solaires-rigides-flexibles-comparatif.htm>
- [19]- <https://www.monkitsolaire.fr/blog/panneau-solaire-perovskite-n386#:~:text=La%20diff%C3%A9rence%20notable%20tient%20dans,m%C3%A8tre%20carr%C3%A9%20de%20panneau%20photovolta%C3%AFque.>
- [20]- <https://www.ines-solaire.org/news/tandem-perovskite-silicium-nouveau-record-de-rendement-a-28.7-pour-une-cellule-de-9-cm/>
- [21] - <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666519024000499>
- [22] - <https://www.nature.com/articles/s41467-021-23343-1#:~:text=Flexible%20CZTSSe%20solar%20cells%20due,substrates%2C%20reducing%20additional%20process%20costs.>
- [23] - http://alioslab.uniwa.gr/mirror/OpenEducationalResources/www.labri.fr/perso/billaud/Helios2/resources/fr10/Chap_10_FR.pdf
- [24]-Jenny Nelson — The Physics of Solar Cells.
- [25]-Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013).Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world – A review.Energy Procedia.
- [26]-Mani, M., & Pillai, R. (2010).Impact of dust on solar photovoltaic performance: Research status, challenges and recommendations.Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [27]-Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013).Solar Engineering of Thermal Processes. Wiley.
- [28]-Vodapally, S. N., & Ali, M. H. (2023).A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic Technologies and Applications.Energies.
- [29]-Peng, J., Lu, L., & Yang, H. (2011).Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems.Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [30]-Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016).Floating photovoltaic power plant: A review.Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [31]-Trapani, K., & Santafé, M. R. (2015).A review of floating photovoltaic installations.Progress in Photovoltaics.
- [32]-Rosa-Clot, M., & Tina, G. (2018).Submerged and Floating Photovoltaic Systems.AcademicPress.

Bibliographie

[33]-ciel-et-terre.net/fr/anchoring-technologies-methods-floating-solar/28/04/25

[34]-Kaltenbrunner, M., et al. (2012). Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility. *Nature Communications*.

[35]-Someya, T., & Bao, Z. (2019). The rise of plastic electronics. *Nature*.

[36]-Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511–536.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>

[37]-Olabi, A. G., Wilberforce, T., Abdelkareem, M. A., Ramadan, M., & Alami, A. H. (2021). Renewable energy systems: Review of energy storage technologies. *Energy*, 214, 118987.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118987>

[38]-Rehman, S., Al-Hadhrani, L. M., & Alam, M. M. (2022). Energy storage systems for renewable energy integration: A review. *Journal of Energy Storage*, 44, 103–110.

<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103110>

[39]- <https://www.ouest-france.fr/leditiondusoir/2023-05-02/le-soleil-va-bientot-atteindre-son-pic-d-activite-quelles-consequences-pour-les-etres-humains-f33524c1-486e-4e92-ad9a-7aac20a96f4e>

[40]- <https://acsolue-energie.fr/wp-content/uploads/2024/01/Schema-cellule-PN-antireflet-acsolue-1.png>

[41]- https://www.ef4.be/images/photopages/schema_effet_photovoltaique_650.gif

[42]- <https://si.blaise-pascal.fr/wp-content/uploads/2020/05/CellulesPV.png>

[43]- https://cdn.shopify.com/s/files/1/0596/3713/7578/files/Monocrystalline-silicon-cell-and-photovoltaic-module_480x480.jpg?v=1710410654

[44]- <https://jadetech-95c4.kxcdn.com/wp-content/uploads/2019/11/cellule-polycrystalline.jpg>

[45]- <https://www.1panneau-solaire.fr/wp-content/uploads/2022/07/panneau-amorphe-souple-300x300.jpg>

[46]- https://www.batiproduits.com/img/panneau-photovoltaique-en-silicium-amorphe-et-microcristallin-luce-mcph-p7-002524463-product_maxi.jpg

[47]- <https://cdn.unitycms.io/images/710s8vwuKNNBJvF9d7Ri2n.jpg>

Bibliographie

- [48]- <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQqYzyep1iaCi5ddHPjNRVhfK5dtzc81KGWfw&s>
- [49]- https://mrmondialisation.org/wp-content/uploads/2016/03/infinityPVfoil_DSC05074.jpg
- [50]- <https://www.3sun.com/content/dam/threesun/immagini/news/2023-CELLULES-TANDEM-PIN-EVAP-CREDIT-CEA-CHERPIN-0007.jpg.resize.414.250.center.center.jpeg>
- [51]- <https://jadetech-95c4.kxcdn.com/wp-content/uploads/2020/07/composition-panneau-solaire.jpg>
- [52]- <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT1TBBH1ItFn6UnEriGAz4zsz1LygZFCG-6OQ&s>
- [53]- https://www.batiproduits.com/img/panneau-photovoltaique-jusqu-a-320-wc-bisol-xl-002585813-product_maxi.jpg
- [54]- https://inergy.mg/522-large_default/panneau-solaire-300-w-mono.jpg
- [55]- https://www.logicom-europe.com/6939-thickbox_default/kit-panneau-solaire-410w.jpg
- [56]- https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRNxAF9T7LIEpAiRw3_JEMdtwfy7yZIJpQkzw&s
- [57]- <https://solar-constructions.com/wp-content/uploads/2023/07/panneaux-solaire-souples-et-legere-montage-sans-penetration-de-toit-.jpg>
- [58]- <https://www.monkitsolaire.fr/blog/wp-content/uploads/2022/10/perovskite.jpg>
- [59]- https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRoW0XyWzOLNccU_dcWANbGIELiHg4DG0se9A&s
- [60]- https://www.french-institutes-technology.fr/wp-content/uploads/2025/04/UrbanPrint_cre%CC%81dit_Efficacy-1.jpg
- [61]- <https://solairecitoyenlescar.fr/wp-content/uploads/2023/12/Vue-sous-le-toit-Sedze-Maubec.jpg>
- [62]- https://lh5.googleusercontent.com/CNUCxz_15rP0Z6y4YNFEI8Bt2CAGYBPBlxj9-6K-

Bibliographie

[7aGHppDSfDerw0LAHR9nrLxc5FjOKNmetQaCkOJ0XIRZ6Id9OLCnHn7mDyPzaQbtQMCOjGWGHYpeC9nWCUHjaX01d3wXmh3iTtmsKX6tqg](https://lh5.googleusercontent.com/b29VrGhyBScgWOIaJzvRHWrGoSwmduwSQ2FZsLJx_AP_YoRkifAv2_lApopG0v5HgSnfoBmcBcxjqv1sSMtlslZ_Fdf6Ln9p4N1Wnmfl2kzfV8WyNHjg4FvxR1SCnmcIytli_VjFIz7oQ_q9w)

[63]-

https://lh5.googleusercontent.com/b29VrGhyBScgWOIaJzvRHWrGoSwmduwSQ2FZsLJx_AP_YoRkifAv2_lApopG0v5HgSnfoBmcBcxjqv1sSMtlslZ_Fdf6Ln9p4N1Wnmfl2kzfV8WyNHjg4FvxR1SCnmcIytli_VjFIz7oQ_q9w

[64]-

<https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTnIo7HEhCE99ir0qBLV5g5oOp2rNLV4-jKXQ&s>

[65]-

https://toten-occitanie.fr/local/adapt-img/900/10x/IMG/jpg/schema_photovoltaique_flottant_art1107.jpg?1771355644

[66]-

https://fr.jesferindustry.com/js/htmledit/kindeditor/attached/20220309/20220309024251_43591.jpg

[67]-

<https://ciel-et-terre.net/wp-content/uploads/2024/09/anchoring-installation-by-ciel-et-terre.jpg>

[68]-

<https://scx2.b-cdn.net/gfx/news/hires/2025/new-perovskite-silicon.jpg>

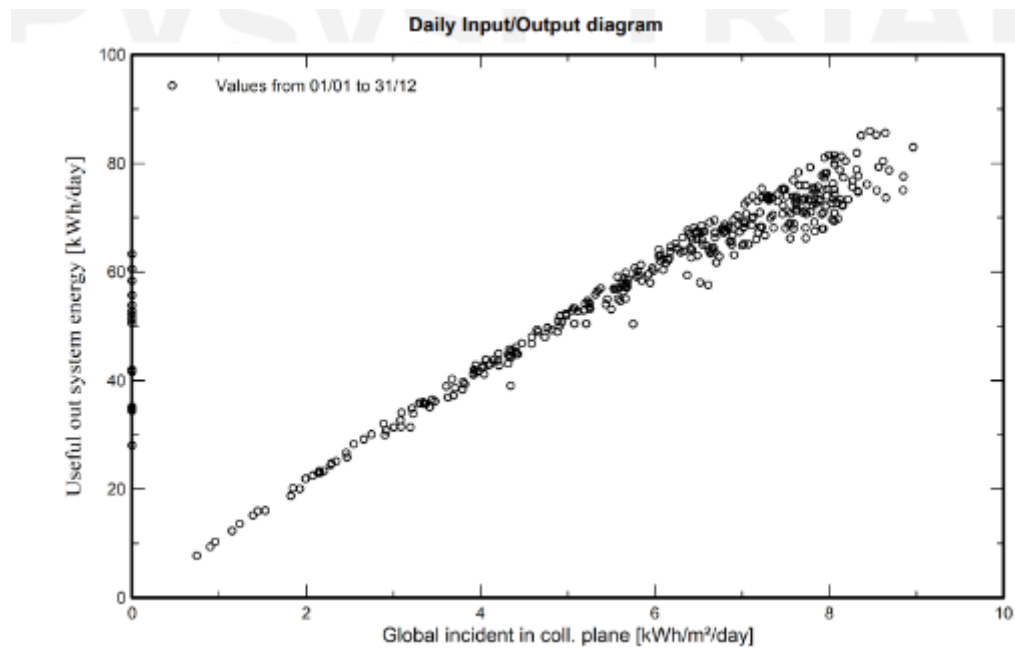
[69]- **Google Maps.** *Vue satellitaire du Barrage d'El Meffrouche, Tlemcen, Algérie.* Google, 2026. Disponible sur : <https://www.google.com/maps> (Accédé en Juin 2026).

[70]- **PVsyst SA.** *Logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, Version 7.4.* Rapports de simulation et dimensionnement, 2026.

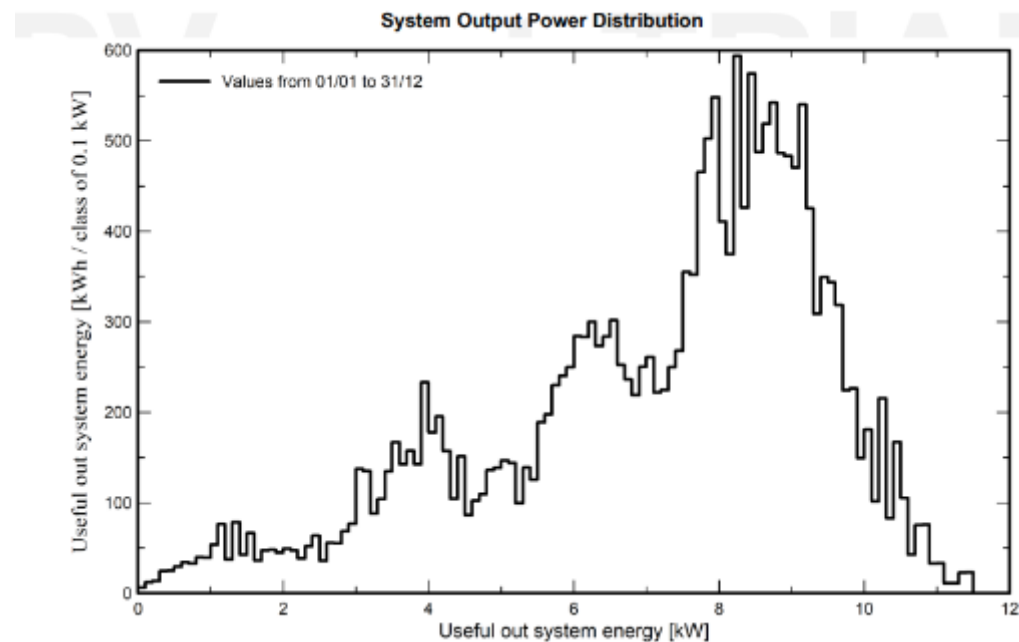
[71]- **Meteonorm.** *Base de données météorologiques mondiales, Version 9.0.* Données climatiques de la station Sidi Boumediene (Tlemcen), 2026.

Annexes

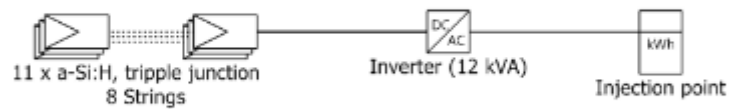
Système Flexible Flottant (FF)



Annexe 1 : Diagramme Entrée/Sortie journalier de l'énergie utile du système (Useful out system energy vs Global incident)

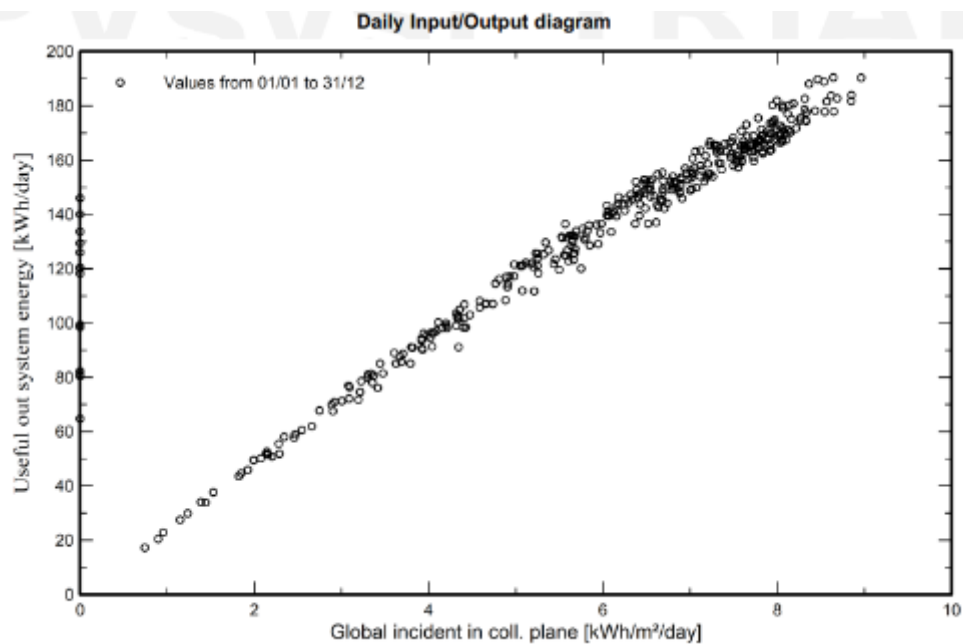


Annexe 2 : Distribution de la puissance de sortie du système (System Output Power Distribution) sur l'année

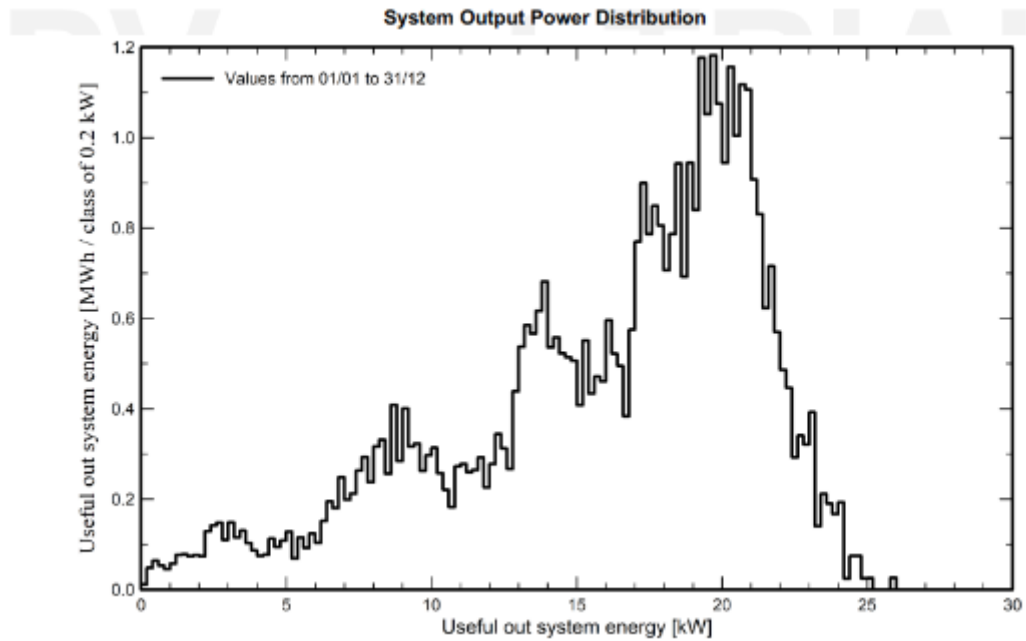


Annexe 3 : Schéma unifilaire (Single-line diagram) de l'installation photovoltaïque pour le cas Flexible Flottant (FF)

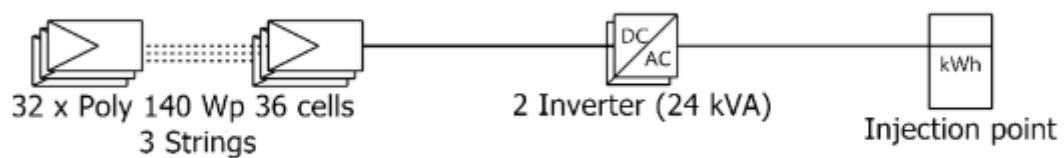
Système Flottant Rigide (FR)



Annexe 4 : Diagramme Entrée/Sortie journalier de l'énergie utile du système (Cas FR)

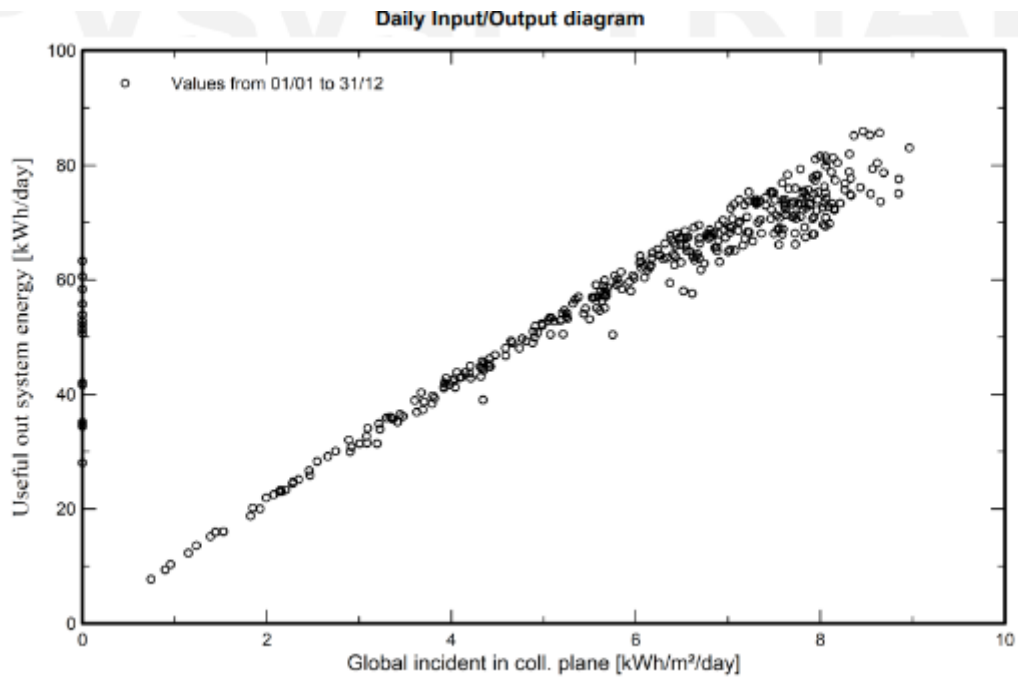


Annexe 5 : Distribution de la puissance de suite du système (System Output Power Distribution) pour le cas FR

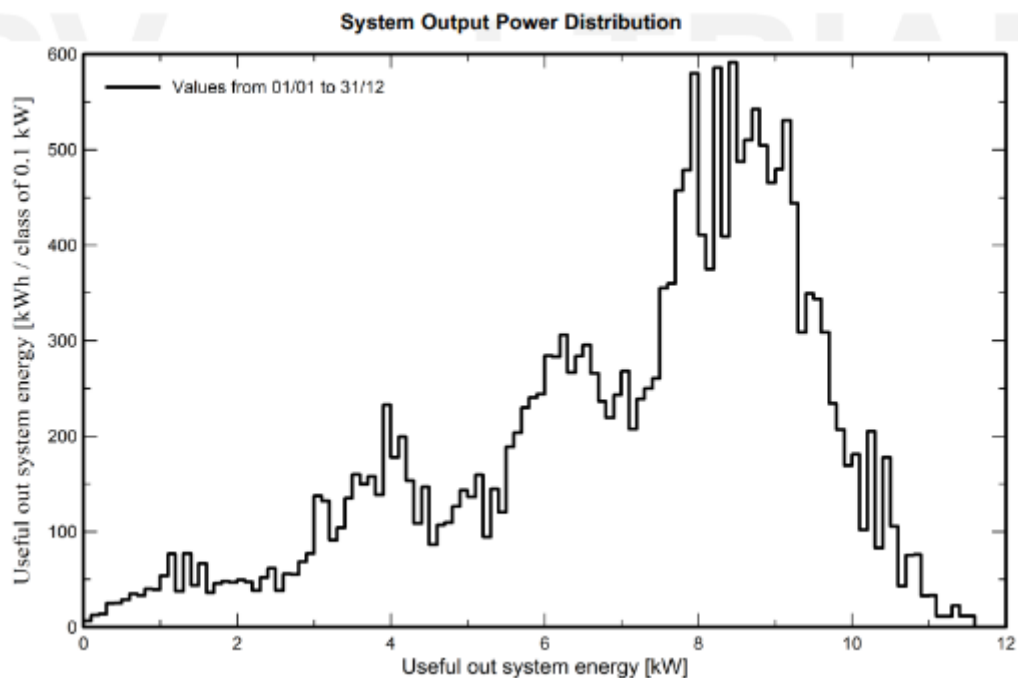


Annexe 6 : Schéma unifilaire (Single-line diagram) de l'installation photovoltaïque pour le cas Flottant Rigide (FR)

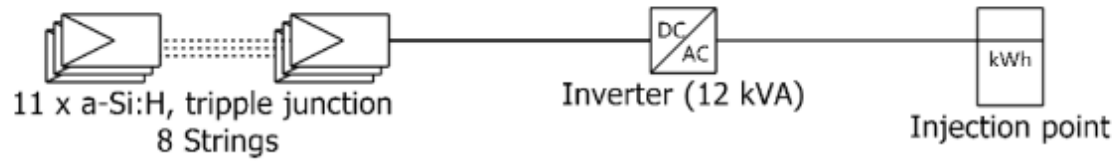
Système Flexible Terrestre (F TER)



Annexe 7 : Diagramme Entrée/Sortie journalier de l'énergie utile du système (Cas F TER)



Annexe 8 : Distribution de la puissance de sortie du système (System Output Power Distribution) pour le cas F TER



Annexe 9 : Schéma unifilaire (Single-line diagram) de l'installation photovoltaïque pour le cas Flexible Terrestre (F TER)