

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Centre de Développement des Energies Renouvelables

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

ETUDE DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES PARTICULES
ET LEUR IMPACT SUR LES PANNEAUX SOLAIRES

CHOUKI Yahia

AIT ALLALA Lucia

Sous la direction de : Promoteur M. H.MERABET Chercheur (CDER)
Co-promoteur Y.KERCHICH Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le 14/07/2021

Composition du Jury :

Président	Mme N. BELHANECHÉ	Professeur (ENP)
Promoteur	M. H.MERABET	Chercheur (CDER)
Co-promoteur	M. Y.KERCHICH	Professeur (ENP)
Examineur	M. Y.MOUSSAOUI	Professeur (U.Ouargla)

ENP 2021
10, Avenue Hacén Badi, El-Harrach, Alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie de l'Environnement

Centre de Développement des Energies Renouvelables

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
d'ingénieur d'état en Génie de l'Environnement

**ETUDE DE LA POLLUTION DE L'AIR PAR LES PARTICULES
ET LEUR IMPACT SUR LES PANNEAUX SOLAIRES**

CHOUKI Yahia

AIT ALLALA Lucia

Sous la direction de : Promoteur M. H.MERABET Chercheur (CDER)
Co-promoteur Y.KERCHICH Professeur (ENP)

Présenté et soutenu publiquement le 14/07/2021

Composition du Jury :

Président	Mme N. BELHANECHÉ	Professeur (ENP)
Promoteur	M. H.MERABET	Chercheur (CDER)
Co-promoteur	M. Y.KERCHICH	Professeur (ENP)
Examineur	M. Y.MOUSSAOUI	Professeur (U.Ouargla)

ENP 2021
10, Avenue Hacén Badi, El-Harrach, Alger

Dédicaces

Je dédie ce travail aux deux personnes m'étant les plus chères au monde, mes parents. Pour leur soutien et tous les sacrifices consentis.

A Salah et mes sœurs, qui n'ont cessé d'être là pour moi.

A mon binôme pour son énergie et l'immense travail accompli.

A mes amis, plus particulièrement Nadjet et Celyna pour leur soutien.

Lucia

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

A mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral,

A mes chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille, et mes amis Hicham, Abdeldjallil, Raid et Abir, A mon binôme Lucia et toute la famille AIT ALLALA.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible

Je vous dis merci.

Yahia

Remerciment

*Nous remercions monsieur **MERABET Hamza** qui nous a encadré et soutenu tout au long de notre travail.*

*Nos remerciements s'adressent également à Monsieur **KERCHICH Yacine**, notre co-promoteur à l'**ENP**, pour l'orientation, la confiance et ses bonnes explications.*

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à madame **CHEHTOU Amina** qui nous a accueillis, pris en charge et suivi durant toute la période de notre stage.*

Nous tenons également à remercier tous les enseignants du Département Génie de l'Environnement, à l'École Nationale Polytechnique auxquels nous devons notre formation d'ingénieur.

Enfin, nous remercions les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail.

Merci à vous tous.

AIT ALLALA Lucia
CHOUKI Yahia

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم وتحليل مستويات تلوث الهواء بالجسيمات الدقيقة في الموقع الحضري لبلدية الجزائر الوسطى ، وقد أجريت على أساس البيانات المتاحة من الجهاز الحبيبي لمركز تطوير الطاقة المتجددة

ترتبط مستويات التلوث في هذا الموقع بالانبعاثات الطبيعية والأنشطة البشرية وخاصة حركة المرور في شبكة الطرق المحيطة بموقع القياس. تلعب الظروف الجوية مثل الرياح والرطوبة دورا في القيم المسجلة من خلال التأثير على الخواص الميكانيكية للجسيمات مثل التشتت وسرعة الانخفاض والتفاعلات بينهما

تهدف هذه الدراسة أيضا إلى فهم وقياس تأثير هذه الجسيمات على كفاءة الألواح الشمسية الكهروضوئية في إنتاج الكهرباء على الموقع شبه الحضري لبن عكنون في مختبر مركز تطوير الطاقة المتجددة

لاحظنا أن الجسيمات تؤثر على كفاءة الألواح الشمسية بطريقتين مختلفتين ، مباشرة عن طريق الاستقرار على سطح هذه الألواح مما يؤدي إلى انخفاض الكفاءة وبشكل غير مباشر من خلال التأثير على مستوى الإشعاع الشمسي الذي يسقط على الألواح بطريقة مشابهة لتأثير السحب

الكلمات الرئيسية تلوث الجسيمات، الموقع الحضري، الموقع شبه الحضري PM10 ، PM2.5 ، PM1.0 ، FIDAS200، الألواح الشمسية الكهروضوئية ، التشعيع ، الكفاءة ، فقدان الطاقة

Abstract

This study aims to evaluate and analyze the levels of fine particulate air pollution in the urban site of the municipality of Algiers central and was carried out on the basis of available data from the Fidas200 device of the Renewable Energy Development Center CDER.

Pollution levels at this site are related to natural emissions, human activities, and especially traffic in the road network surrounding the measurement site. Weather conditions such as wind and humidity play a role in recorded values by affecting the mechanical properties of particles such as scattering, drop velocity and interactions between them.

This study also aims to understand and quantify the impact of these particles on the efficiency of photovoltaic solar panels in electricity production on the semi-urban site of Ben-Aknoun in the CDER laboratory.

We observed that particles affect the efficiency of solar panels in two different ways, directly by settling on the surface of these panels causing the decrease in efficiency. And indirectly by affecting the level of solar radiation falling on the panels in a manner similar to the effect of clouds.

Key words: Particulate pollution, urban site, semi-urban site, PM10, PM2.5, PM1.0, FIDAS200, PV solar panel, irradiation, efficiency, power losses.

Résumé :

Cette étude vise à évaluer et analyser les niveaux de pollution atmosphérique par les matières particules (PMi) dans le site urbain de la commune d'Alger centre et a été réalisée à partir des données disponibles de l'analyseur automatique Fidas200 du Centre de développement des énergies renouvelables CDER au niveau du CHU Mustapha Bacha.

Les niveaux de pollution de ce site sont liés aux émissions naturelles, aux activités humaines, et surtout à la circulation dans le réseau routier entourant le site de mesure. Les conditions météorologiques telles que le vent et l'humidité jouent un rôle dans les valeurs enregistrées en affectant les propriétés mécaniques des particules telles que la diffusion, la vitesse de chute et les interactions entre elles.

Cette étude vise également à comprendre et quantifier l'impact de ces particules sur l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques dans la production d'électricité sur le site semi-urbain de Ben-Aknoun dans le laboratoire du CDER.

Nous avons observé que les particules affectent le rendement des panneaux solaires de deux manières différentes, directement en se déposant sur la surface ces panneaux provoquant la baisse du rendement. Et indirectement en affectant le niveau de rayonnement solaire tombant sur les panneaux d'une manière similaire à l'effet des nuages.

Mots clés : Pollution particulaire, site urbain, site semi-urbain, PM10, PM2.5, PM1.0, FIDAS200, panneau solaire PV, irradiation, rendement, pertes en puissance.

Table des matières

liste des tableaux

liste des figures

Introduction.....	15
1 Atmosphère terrestre.....	19
1.1 Définition.....	19
1.2 Composition de l'atmosphère	19
1.2.1 Les différentes couches.....	19
1.2.2 Physique de l'atmosphère	20
1.2.3 Composition chimique.....	22
1.3 Pollution atmosphérique	23
1.3.1 Définition.....	23
1.3.2 Principaux polluants et leurs origines	23
1.4 Pollution particulaire.....	25
1.4.1 Définition.....	25
1.4.2 Les particules présentes dans l'atmosphère	26
1.4.3 Sources des particules.....	28
1.4.4 Propriétés des particules	31
1.4.5 Propriétés physiques:	32
1.4.6 Caractéristiques mécaniques	34
a. La vitesse de sédimentation:.....	34
b. La diffusion brownienne:.....	34
c. La coagulation.....	34
1.4.7 Paramètres climatiques influençant le mouvement et la dispersion des particules atmosphériques.....	34
1.4.8 Impacts des particules sur l'environnement:	36
2 Énergie solaire photovoltaïque	38
2.1 Introduction	38
2.2 Le rayonnement solaire	38
2.2.1 Le rayonnement direct	39
2.2.2 Le rayonnement diffus	39
2.2.3 Le rayonnement réfléchi	39
2.2.4 Rayonnement global	39
2.3 Cellules photovoltaïques	40
2.3.1 Introduction.....	40
2.3.2 Définition.....	40
2.3.3 Principe de fonctionnement.....	41
2.3.4 Technologie des cellules photovoltaïque	42
2.3.5 Paramètres caractéristiques	43

2.4	Module photovoltaïque :	47
2.4.1	Facteurs influençant le rendement d'un panneau solaire	49
2.5	Interactions particule/lumière:	51
2.5.1	Bilan radiatif.....	51
2.5.2	Absorption par l'atmosphère	51
2.5.3	Diffusion par l'atmosphère.....	51
2.5.4	Absorption par la Terre	52
2.5.5	Réflexion par l'atmosphère	52
2.5.6	Réflexion par la Terre	52
2.5.7	Albédo.....	52
2.5.8	Absorption et diffusion de la lumière par les particules.....	53
2.5.9	Absorption.....	54
2.6	Modélisation atmosphérique	54
2.6.1	Modèle Hysplit.....	54
2.6.2	Modèle MODIS	60
3	Analyse des données des PM _i de la station NESMA en utilisant un équipement de la division photovoltaïque du CDER	63
3.1	Station atmosphérique « Nesma ».....	63
3.2	Le site urbain d'Alger-centre.....	63
3.3	Méthode de prélèvement et d'analyse des PM _i et description de l'analyseur	65
3.3.1	Présentation de l'appareil FIDAS :	65
3.3.2	Le principe de fonctionnement :	67
3.4	Analyse de la qualité de l'air du site semi-urbain Ben Aknoun et l'influence de la poussière sur les PV.....	69
3.4.1	présentation du site semi-urbain de Ben Aknoun	69
3.4.2	Mode opératoire	69
3.4.3	Présentation de l'appareil portatif :	72
3.4.4	Mode d'utilisation du détecteur de qualité de l'air LifeBasis pour obtenir des données	73
4	Etude de la pollution de l'air par les particules	75
4.1	Traitement des données de l'analyseur de particules FIDAS200.....	75
4.1.1	Teneurs des particules ambiantes dans l'atmosphère.....	75
4.1.2	Influence des facteurs météorologiques sur les teneurs enregistrées :	83
4.1.3	La contribution du trafic routier sur le niveau de la pollution par les particules au niveau du site de prélèvement	88
4.2	Etude de l'impact des particules sur les panneaux solaires	92
4.2.1	L'influence de dépôt de poussières	92
4.2.2	Influence des particules en suspension	100
	Bibliographie.....	110

Liste des tableaux

<i>Tableau 1: Composants gazeux de l'atmosphère</i>	22
<i>Tableau 2: Les polluants atmosphériques primaires et leurs sources</i>	24
<i>Tableau 3: Estimations moyennes des émissions mondiales en matière particulaire de sources naturelles en Méga tonne[18]</i>	30
<i>Tableau 4: Estimations moyennes d'émissions mondiales de particules anthropiques en Méga tonne</i>	31
<i>Tableau 6: Exemples des données fournies par Terra/Aqua MODIS</i>	60
<i>Tableau 7: Types de données et limites de détection</i>	72
<i>Tableau 8: le niveau de qualité de l'air en fonction de la teneur en PM_{2.5}</i>	73
<i>Tableau 9: Valeurs journalières des PM_i remarquables</i>	75
<i>Tableau 10: Variations des teneurs en particules totales TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et paramètres météorologiques enregistrées durant la période de prélèvement (juin 2019)</i>	84
<i>Tableau 11: Les pertes de puissances en fonction des jours</i>	98

Liste des figures

Figure 1: Les différentes couches de l'atmosphère terrestre.....	20
Figure 2: variation de la pression et de la densité en fonction de l'altitude.....	21
Figure 3: sources des particules fines (LE FIGARO 2013)	28
Figure 4: Images de microscopie électronique à balayage de particules en suspension dans l'air	33
Figure 5: Composition du rayonnement solaire	39
Figure 6: Structure basique d'une cellule solaire.....	41
Figure 7: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	42
Figure 8: Module polycristallin (à gauche) et monocristallin (à droite)	42
Figure 9: Caractéristique I-V d'une cellule solaire.....	43
Figure 10: Courbe caractéristique P-V.....	45
Figure 11: coupe transversale d'un module photovoltaïque.....	48
Figure 12: Les différentes couches et matériaux composants un module photovoltaïque.	48
Figure 13: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) à T=25°C d'une cellule photovoltaïque.....	49
Figure 14: Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque.....	50
Figure 15: différents types du rayonnement solaire.....	53
Figure 16: Exemples de cartes fournies par HYSPLIT	56
Figure 17: Exemple d'une carte retro-trajectoire réalisée par le modèle HYSPLIT.....	59
Figure 18: Localisation du site de prélèvement de la station NESMA.....	64
Figure 19: Schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri	66
Figure 20: Vue de l'écran principal du FIDAS.....	67
Figure 21: Les étapes de détection des particules par le FIDAS 200	68
Figure 22: Carte satellite du site de mesure de Ben Aknoun	69
Figure 23: les deux modules PV nettoyé(A) et non nettoyé (B)	70
Figure 24: nettoyage quotidien du panneau solaire (A).....	70
Figure 25: l'équipement Agilent N3300A Keysight	71
Figure 26: image de l'appareil de qualité d'air LifeBasis Air Quality Detector.	72
Figure 27: Evolution des moyennes journalières des concentrations des PM _i mesurées en Juin 2019.....	76
Figure 28: Evolution des moyennes journalières des concentrations des PM _i mesurées en Juin 2019.....	77
Figure 29: L'évolution des concentrations horaires des PM _i pour le 07 juin 2019.....	79
Figure 30: L'évolution des concentrations horaire des PM _i pour le 26 juin 2019.	80
Figure 31: Rétro trajectoires des masses d'air venant du sud-est.....	81
Figure 32: Concentrations de poussières de sable modélisées pour la date du 26/06/2019 à 12h.....	81
Figure 33: Carte MODIS 26 juin 2019.....	82
Figure 34: L'évolution des concentrations horaires des PM _i 04 juin 2019.....	82
Figure 35: Les variations des teneurs TSP en fonction de vitesse du vent.....	86
Figure 36: Les variations des teneurs TSP en fonction de l'humidité relative	87
Figure 37: Les variations des teneurs TSP en fonction de la température	87
Figure 38: Routes principales situées aux alentours de la station NESMA.....	89
Figure 39: L'évolution des moyennes horaires des teneurs en PM _i (04 juin 2019)	90

<i>Figure 40:L'évolution des moyennes horaires des teneurs en PMi (22 juin 2019).....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 41:L'évolution des moyennes horaires des teneurs en PMi (27 juin 2019)</i>	<i>91</i>
<i>Figure 42:cellule solaire non nettoyée</i>	<i>92</i>
<i>Figure 43:image de la météo du mois de juin 2021 à Alger Ben Aknoun.</i>	<i>93</i>
<i>Figure 44:Analyse de l'irradiation à partir d'une cellule solaire non nettoyé.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure 45:Analyse de l'irradiation à partir d'une cellule solaire nettoyée</i>	<i>95</i>
<i>Figure 46:Analyse de la Puissance (W) d'un module PV (A) nettoyé en fonction du temps ...</i>	<i>96</i>
<i>Figure 47:Analyse de la Puissance (W) d'un module PV (B) non nettoyé en fonction du temps</i>	<i>96</i>
<i>Figure 48:Le graphe comparatif entre les deux panneaux (0001-sans nettoyage, 0002-avec nettoyage)</i>	<i>97</i>
<i>Figure 49:Variation des pertes de puissance en fonction des jours.....</i>	<i>99</i>
<i>Figure 50: Les teneurs en PMi enregistrées pour le 21 juin 2021</i>	<i>100</i>
<i>Figure 51:Les teneurs en PMi enregistrées pour le 22 juin 2021.....</i>	<i>101</i>
<i>Figure 52:Variations de l'IDN de la cellule solaire nettoyée.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 53:Pourcentage d'atténuation IDN</i>	<i>103</i>
<i>Figure 54:Variation des puissances maximale du panneau solaire nettoyé.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 55:Pourcentage d'atténuation des puissances maximales du panneau solaire nettoyé</i>	<i>105</i>

Introduction générale

Introduction générale :

Comme tous les êtres vivants présents à la surface de la planète, l'homme ne pourrait pas vivre sans énergie.

Aujourd'hui, plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles telles que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire. Cependant, il est devenu clair que ces formes de production ne sont pas infinies, et que leur combustion engendre des problèmes écologiques insurmontables et de plus en plus graves, tels que, le réchauffement climatique, qui perturbe les équilibres climatiques et détruit de nombreux écosystèmes et la pollution de l'air notamment aux particules fines, qui causent chaque année des milliers de décès.

Les énergies renouvelables, telles que, l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la biomasse, la géothermie, l'hydrogène vert et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour compenser les sources d'énergie de masse et protéger l'environnement.

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La transition vers ces dernières pourrait réduire jusqu'à 80 % d'ici 2050 les impacts de la pollution de l'air sur la *santé*.

À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Le type d'énergie renouvelable faisant l'objet du présent travail est l'énergie solaire photovoltaïque qui consiste en la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en électricité par le biais de panneaux photovoltaïques.

L'énergie solaire photovoltaïque a un grand intérêt d'un point de vue environnemental car elle remplace les sources d'énergies traditionnelles (carburants fossiles, bois et charbon). Néanmoins, le rendement énergétique de cette technologie est faible et les experts cherchent toujours d'augmenter le rendement et réduire les pertes.

Malgré les avancées technologiques, le développement de la technologie utilisée (matériau et construction des panneaux) est très important, l'étude de l'évolution et les variations dans les taux de production dans différentes conditions de travail va aider les chercheurs à éliminer les problèmes de production en fournissant des conditions optimales et de diriger le développement d'une manière efficace. L'énergie PV est directement liée aux conditions naturelles, car elle fonctionne extérieurement, donc, il est important de trouver le lien entre les PV et le plus grand problème du siècle : la pollution atmosphérique

La première partie (Théorique) est subdivisée en deux chapitres :

Nous présenterons tout d'abord dans le premier chapitre la thématique générale de la pollution particulaire, avec un rappel sur les connaissances de base sur l'atmosphère, nous détaillerons les principaux polluants atmosphériques et leurs origines. Nous présenterons également les différentes classes granulométriques des particules et leurs propriétés physico-chimiques ainsi que les mécanismes de formation de ces dernières. Ensuite, nous enchaînerons avec l'influence des facteurs météorologiques sur la dispersion et le comportement des particules. Enfin, nous décrirons les différentes techniques de mesure et d'évaluation de la pollution particulaire.

Le deuxième chapitre sera dédié à décrire la technologie des cellules photovoltaïques, les différentes générations et le principe de fonctionnement. Nous présenterons aussi dans ce chapitre les paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque et les facteurs influençant la performance d'un panneau solaire et une vue générale sur les phénomènes induisant une interaction entre les particules atmosphériques et la lumière solaire sera abordée.

Dans le troisième chapitre, nous présenteront deux le modèles atmosphériques Hysplit, et Modis qui permettent l'obtention des cartes sur différents phénomènes déroulant dans l'atmosphère (rétro trajectoire, dispersion...).

La deuxième partie de ce travail (Résultats et méthodes) sera consacrée, à l'étude de l'évolution des teneurs en PM dans la zone urbaine d'Alger-centre, le suivi de la production en électricité de deux panneaux solaires, ainsi que, la qualité de l'air au niveau du site semi-urbain de Ben Aknoun.

Elle se décomposera en deux parties. La première, sera consacrée à la description des zones étudiées, le matériel et les équipements utilisés et les méthodes d'analyses utilisées. La dernière partie, sera destinée à la présentation et la discussion des résultats.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de caractériser et de mettre en évidence l'effet des particules en suspension sur l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques.

Partie 1

Partie théorique

Chapitre 1 : pollution atmosphérique

1 Atmosphère terrestre

1.1 Définition

Le mot Atmosphère désigne l'enveloppe essentiellement gazeuse qui entoure le globe terrestre[1]. C'est l'un des plus grands biotopes existant sur terre, c'est-à-dire, un milieu naturel ayant des caractéristiques physico-chimiques uniformes et qui héberge des êtres vivants.

L'atmosphère est la plus fine couche d'air qui enveloppe la Terre. Sans elle, la vie n'est plus possible sur notre planète. L'atmosphère protège la vie sur Terre en absorbant le rayonnement solaire UV, en réchauffant la surface par la rétention de chaleur (effet de serre) et en réduisant les écarts de température entre le jour et la nuit. L'étude de climat passe forcément par l'étude de l'atmosphère et ces composantes, c'est au niveau de cette enveloppe que se produisent les processus météorologiques[1].

1.2 Composition de l'atmosphère

1.2.1 Les différentes couches

L'atmosphère terrestre est composée de différentes couches superposées qui diffèrent surtout par leurs compositions et leurs températures.

la troposphère La troposphère est la couche la plus basse, c'est-à-dire celle dans laquelle nous vivons. C'est aussi la plus dense[2]. Au fur et à mesure qu'on s'élève dans la troposphère la température décroît de façon régulière car l'air près du sol est plus chaud qu'en altitude étant donné que la surface réchauffe cette couche d'air[3].

La stratosphère La stratosphère est au-dessus de la troposphère. C'est dans la stratosphère qu'on trouve la couche d'ozone. Cette dernière est essentielle à la vie sur terre, car elle absorbe la majorité des rayons solaires ultraviolets. Cette absorption provoque un dégagement d'énergie sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température augmente lorsqu'on s'élève dans la stratosphère[3].

La mésosphère La mésosphère est au-dessus de la stratosphère. La température décroît avec l'altitude aussi. Les poussières et particules qui proviennent de l'espace (les météores) s'enflamment lorsqu'elles entrent dans la mésosphère à cause de la friction de l'air. Ce phénomène nous apparaît sous la forme « d'étoiles filantes » [3].

La thermosphère Dans cette couche se trouve la région où se forment les aurores boréales

et australes près des pôles. La température augmente avec l'altitude fortement à cause de dégagements de chaleur par des processus d'ionisation et la pression y devient presque nulle. La thermosphère atteint des milliers de kilomètres d'altitude et disparaît graduellement dans l'espace[3].

L'exosphère de 350-800 km d'altitude à 50 000 km d'altitude (cour) C'est la couche la plus élevée de l'atmosphère. Elle se dissipe peu à peu dans l'espace inter planétaire et l'air devient extrêmement rare.

La figure suivante représente les différentes couches de l'atmosphère :

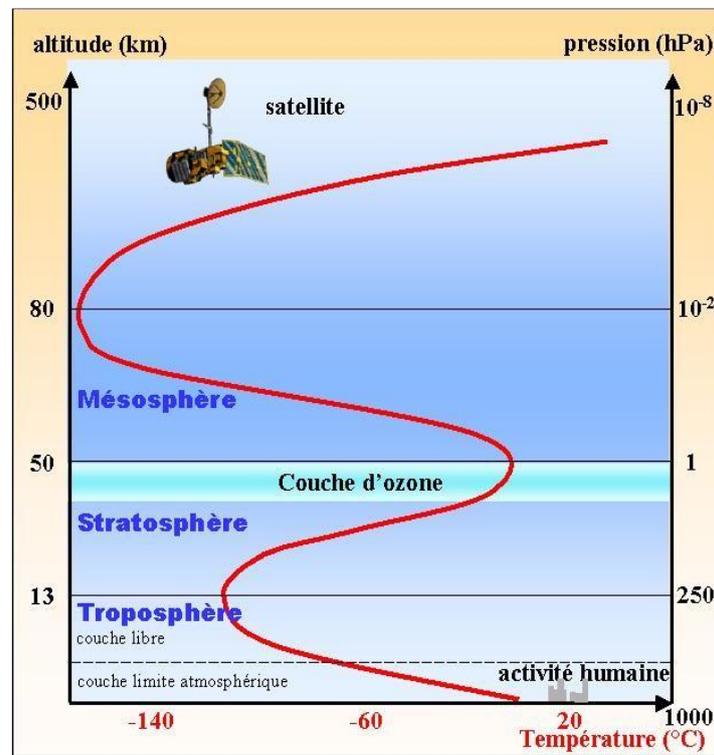


Figure 1: Les différentes couches de l'atmosphère terrestre[4]

1.2.2 Physique de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est omniprésente, elle fait partie de notre environnement immédiat. 99,9 % de la masse de l'atmosphère est comprise entre la surface et une altitude de 50 km. Au-dessus, l'air a une densité trop faible pour diffuser la lumière solaire[1].

1.2.2.1 Pression atmosphérique

L'air atmosphérique est compressible et expansible. Il n'a pas de forme particulière et cherche à occuper tout l'espace. L'interaction air-Terre se manifeste par les échanges convectifs de chaleur, de matière et d'eau. Ces échanges se font suivant des trajectoires « des courants » et des sens contrôlés par un gradient, c'est la pression atmosphérique.

La gravité terrestre retient l'atmosphère autour de la Terre, et par conséquent la pression atmosphérique et la densité diminuent avec l'altitude au-dessus de la surface de la terre[5].

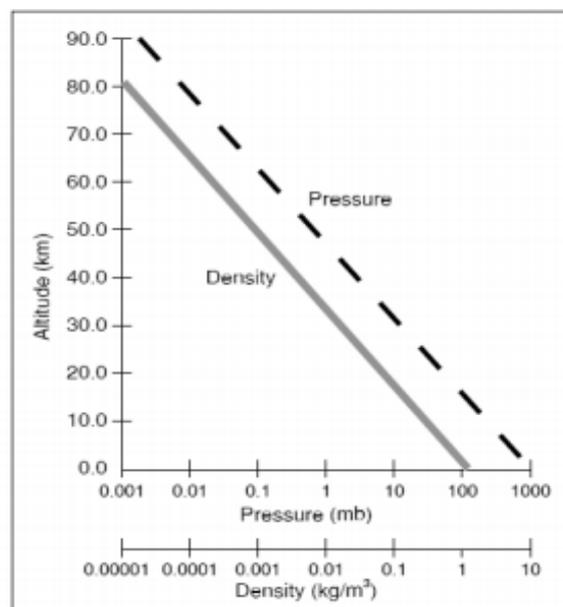


Figure 2: variation de la pression et de la densité en fonction de l'altitude[5]

1.2.2.2 La température

La température varie également en fonction de l'altitude dans l'atmosphère, mais de manière plus compliquée que la pression et la densité. Du sol jusqu'à 15 km d'altitude en moyenne, c'est la troposphère, température décroît fortement avec l'altitude[5].

- Puis la température augmente à nouveau et passe par un maximum vers 50 km, c'est la stratosphère.
- Au-dessus la température descend à nouveau, jusqu'à environ 85 km : c'est la

mésosphère.

- La température augmente fortement dans la thermosphère (partie supérieure).
- L'exosphère (à partir de 500 km) où la température continue à augmenter[6].

1.2.3 Composition chimique

- L'atmosphère terrestre est composée principalement des gaz N₂ (78 %), O₂ (21 %) et Ar (1 %),
- La vapeur d'eau est le deuxième constituant le plus abondant ; on la trouve principalement dans la basse atmosphère et sa concentration est très variable.

Les autres constituants gazeux, représentent moins de 1 % de l'atmosphère. Ces gaz à l'état de traces jouent un rôle crucial dans l'équilibre radiatif de la Terre et dans les propriétés chimiques de l'atmosphère[7].

Dans la troposphère, l'ensemble des gaz, dans les proportions restent constantes, forme l'air sec est considéré comme un gaz parfait.

Gaz	Concentration	Temps de résidence
Azote (N ₂)	78.084%	-
Oxygène (O ₂)	20.946%	-
Argon (Ar)	0.934%	-
Eau (H ₂ O)	[0.4..400] x 10 ² ppm	10 jours
Dioxyde Carbone (CO ₂)	370 ppm	4 ans
Néon (Ne)	18.18 ppm	-
Hélium (He)	5.12 ppm	2.10 ⁶ ans
Méthane(CH ₄)	1.75 ppm	10 ans
Krypton (Kr)	1.14 ppm	-
Hydrogène (H ₂)	0.4 ppm	-
Xénon (Xe)	0.87 ppm	-

Tableau 1: Composants gazeux de l'atmosphère[8]

1.3 Pollution atmosphérique

1.3.1 Définition

Une définition large de la pollution de l'air est donnée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), qui la caractérise par « la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère »[9]. On peut aussi définir la pollution atmosphérique par les contaminants présents dans notre atmosphère qui sont appelés polluants et qui se présentent sous forme de gaz, de gouttelettes de liquide ou de particules. Le terme aérosol est fréquemment utilisé pour décrire des gouttelettes ou des particules en suspension, suffisamment petites pour ne pas tomber rapidement sous la force de gravité.

1.3.2 Principaux polluants et leurs origines

Un polluant Désigne un agent physique, chimique ou biologique qui provoque une gêne ou une nuisance dans le milieu liquide ou gazeux.

Avec l'avènement de nos civilisations modernes, les quantités de substances diverses rejetées dans l'atmosphère, altérant la composition normale de l'air, n'ont cessé d'augmenter. La quasi-totalité des activités humaines est source de pollution de l'air, qui apparaît essentiellement sous deux formes :

- **Gazeuse** : présence de gaz nouveaux ou augmentation de la proportion d'un gaz existant[10].
- **Solide** : mise en suspension de poussières[10].

On peut considérer deux grandes classes de polluants :

1.3.2.1 Les polluants primaires

Sont les polluants que l'on trouve à l'endroit de l'émission[11].

Ces émissions sont catégorisées en deux types :

- **Biogénique** : liées à l'activité naturelle telle que l'activité photosynthétique, sels de mer, activité volcaniques, feux de forêts[8].
- **Anthropique** : liées à l'activité humaine tels que les processus industriels, transport,

production de l'énergie etc[8].

Le tableau représente les différents types des polluants primaires et leurs différentes sources :

Type	Source
CO ₂	Eruptions volcanique Les combustibles fossiles Animaux
CO	Moteurs à combustion interne Eruptions volcaniques
Composés sulfureux	Bactéries Les combustibles fossiles Eruptions volcaniques Embruns marins
Hydrocarbures	Moteurs à combustion interne Bactéries Plantes
Composés azotés	Bactéries Combustion
Particules	Eruptions volcaniques Action du vent Combustion Processus industriels Débris météoriques Embruns marins Feux de forêts

Tableau 2:Les polluants atmosphériques primaires et leurs sources[12]

1.3.2.2 Les polluants secondaires

Les particules secondaires sont issues de mécanismes d'oxydation, nucléation, condensation, coagulation transformant dans l'atmosphère des composés gazeux en particules liquides ou solides[11].

- Les aérosols secondaires organiques (contenant du carbone) se forment par exemples à partir de précurseurs dérivant de la végétation[13].
- Les aérosols inorganiques comme le nitrate d'ammonium contribuent à l'occurrence de pics de particules printaniers. Le nitrate d'ammonium se forme à grande échelle en faisant réagir deux précurseurs : les oxydes d'azote principalement issus du trafic routier (urbain et interurbain) et l'ammoniac (NH_3) émanant notamment des épandages agricoles d'engrais entre autres organiques (lisiers fumiers) se volatilisant plus facilement par températures douces[13].
- L'ozone : L'ozone résulte de la transformation photochimique de certains polluants dans l'atmosphère en présence de rayonnements ultra-violetes solaires. Ce gaz contribue indirectement à l'effet de serre. Il pénètre facilement jusqu'aux voies respiratoires les plus fines. C'est un polluant dit "secondaire" car il n'est pas émis directement par une activité. Il se forme à partir d'autres polluants tels que :

◇ Les oxydes d'azote NO_x (émis par les transports, les centrales thermiques et le chauffage).

◇ De composés appelés composés organiques volatils COV (hydrocarbures que l'on trouve principalement dans l'essence, les peintures, les colles, les solvants et les détachants d'usages domestiques et industriels) et sous l'action du rayonnement solaire et par vent faible (un vent fort aurait permis sa dispersion)[14].

1.4 Pollution particulaire

1.4.1 Définition

Selon l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis, le terme « Pollution particulaire, Particulate Matter PM en anglais » désigne un mélange de particules solides et

de gouttelettes liquides présentes dans l'air. Certaines particules, comme la poussière, la saleté, la suie ou la fumée, sont suffisamment grosses ou sombres pour être vues à l'œil nu. D'autres sont si petites qu'elles ne peuvent être détectées qu'à l'aide d'un microscope électronique.

La pollution particulaire est un mélange hétérogène complexe qui change avec le temps et l'espace. Il contient de nombreux composants chimiques et propriétés physiques différents. Chaque composant a plusieurs sources et chaque source génère plusieurs composants.

1.4.2 Les particules présentes dans l'atmosphère

Le mot « particule » a plusieurs significations selon le domaine concerné (chimie, physique, thermique...). Ainsi, dans le domaine de la protection de l'environnement, une particule désigne une petite partie de matière solide ou liquide en suspension dans l'air ou déposée sur une surface et susceptible de se mettre en suspension. Les particules en suspension ne forment pas un seul et unique polluant de l'air, mais représentent plutôt une classe de polluants constituée de plusieurs sous-classes variant dans une gamme de granulométrie de 0,005 μm à environ 100 μm . Chaque sous-classe de particules peut être constituée de ou contenir différentes espèces chimiques. Ainsi, selon leur origine, les particules ont une gamme de taille et une composition physico-chimique très variables, c'est pourquoi différentes terminologies existent pour classifier, définir ou nommer une classe de particules polluantes.

a) Les particules totales en suspension

Les particules totales en suspension, ou Total Suspended Particulates (TSP), représentent « toutes les particules en suspension dans un volume d'air » d'après les normes NF EN 12341 et NF EN 481. Aux États-Unis, les TSP sont définies comme les particules de diamètre aérodynamique inférieur à 40 à 50 μm , alors qu'en Europe, elles désignent toutes les particules en suspension inférieures à environ 100 μm [15].

b) Les particules grossières PM₁₀

Les PM₁₀ sont des particules, ou Particulate Matter (PM), de diamètre aérodynamique

équivalent inférieur à 10 μm . l'EPA (Environmental Protection Agency) considère que les PM10 représentent 40 à 70 % en masse des TSP, alors que la directive européenne propose une relation simple entre les deux indicateurs : $\text{TSP} = 1,2 \text{ PM}_{10}$ [15].

c) Les particules fines $\text{PM}_{2.5}$

Les PM 2,5 représentent les particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 2,5 μm . Cette classe de particules représente un facteur pertinent pour qualifier la qualité de l'air d'un point de vue sanitaire[15].

d) Les particules de diesel

Une classe spéciale de particules. La matière solide contenue dans les gaz d'échappement des moteurs diesel est connue sous le nom de particules diesel (DPM). Plus de 90 % des MPD ont un diamètre inférieur à 1 μm et constituent donc un sous-ensemble des $\text{PM}_{2.5}$.

e) Les particules très fines $\text{PM}_{1.0}$

$\text{PM}_{1.0}$ constituent la classe des particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 1 μm . Cette classe de particules fait l'objet d'études spécifiques en termes d'échantillonnage et d'impact sur la santé, elle n'est toutefois pas préconisée par les normes et décrets existants[15].

f) Les particules ultra fines PMU

PMU représentent les particules de diamètre aérodynamique équivalent inférieur à 0.1 μm [15].

g) Les poussières

Les poussières définissent l'ensemble des particules solides en suspension dans l'air. Le terme poussière regroupe en fait les particules solides totales en suspension (TSP solide). Le terme anglais «dust» désigne les particules de dimension inférieure à 75 μm issues de processus

mécaniques[15].

h) Les brouillards et brumes

Les brouillards et brumes sont formés par une suspension de gouttelettes dans l'air. La brume est formée par une suspension de gouttelettes liquides de taille supérieure à 1 μm dans l'air et correspond à des conditions de visibilité de 1 à 2 km. Selon les conventions internationales, lorsque les conditions de visibilité sont inférieures à 1 000 m, le terme de brouillard est utilisé[15].

1.4.3 Sources des particules

Les matières particulaires ambiantes sont un mélange complexe de particules solides et liquides en suspension dans l'air. La taille, la composition chimique et d'autres propriétés physiques et biologiques des particules varient en fonction du lieu et du moment. Cette variabilité des niveaux de polluants découle des différences entre les sources de polluants.

Les sources peuvent être naturelles, comme les feux de forêt, ou résulter d'activités humaines, comme la conduite de véhicules et l'exploitation d'usines de fabrication ou de centrales électriques[16].

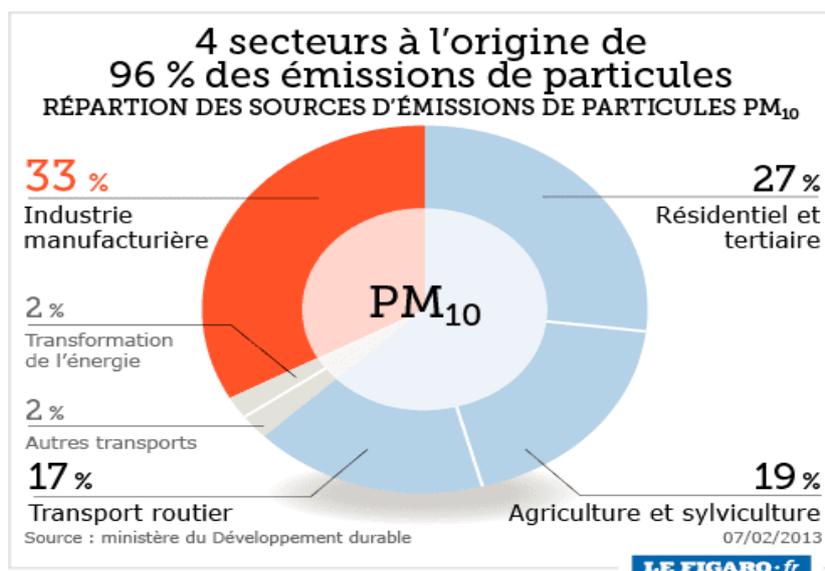


Figure 3: sources des particules fines (LE FIGARO 2013)

1.4.3.1 Les sources naturelles

Les aérosols naturels ont quatre sources principales :

1.4.3.1.1 La source terrigène

L'aérosol terrigène (ou crustal) est généré par l'érosion éolienne des sols. Lorsque le vent dépasse trois mètres par seconde, les composés crustaux sont arrachés du sol. La quantité d'aérosol injectée dans l'atmosphère est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Cet aérosol est principalement constitué d'oxydes métalliques (fer, manganèse) et d'aluminosilicates (oxydes d'aluminium et de silicium). On trouve aussi des composés organiques provenant des débris de plantes et de l'humus[17].

1.4.3.1.2 la source marine

L'aérosol marin est produit par le spray océanique. Sous l'action des vagues déferlantes, des gouttelettes d'eau de grosse taille sont projetées dans l'atmosphère (phénomène de bubbling). Après évaporation de l'eau de mer, les sels marins solides se retrouvent dans l'atmosphère et constituent des aérosols. Au niveau global ce type d'aérosol domine largement. Il est à l'origine de la formation des pluies sur les océans. La composition chimique de cet aérosol est proche de celle de l'eau de mer. On retrouve donc essentiellement du chlore et du sodium, mais aussi de grandes quantités de nitrates et de sulfates. Ce sulfate est formé par oxydation du SO_2 , qui provient lui-même de l'oxydation du diméthylsulfure émis par les algues. Il est appelé SS (sea sulfate). L'aérosol marin ne contient qu'une faible part de composés organiques[17].

1.4.3.1.3 la source volcanique

L'aérosol volcanique est injecté dans l'atmosphère, non pas de façon continue comme les deux précédents, mais par bouffées. Il est constitué de métaux et de sulfates provenant de la conversion du SO_2 gazeux, émis en abondance par les volcans. Cet aérosol se retrouve principalement dans la stratosphère, car la force de propulsion verticale est très forte. Les apports troposphériques sont faibles et on ne prendra pas en compte cette source[17]

1.4.3.1.4 la source biogénique

L'aérosol biogénique provient, d'une part de l'émission directe d'hydrocarbures lourds par les plantes et les arbres et d'autre part de l'oxydation atmosphérique d'hydrocarbures biogéniques plus légers comme l'isoprène. On trouve aussi des cires vasculaires (esters) à haut poids moléculaire. Cet aérosol est donc quasi exclusivement organique, même si on trouve aussi du potassium[17].

Type des particules	Particules	De toute taille	Plus petites que 5 µm
Primaires	Embruns marins	1000	500
	Poussières soulevées par le vent	500	250
	Éruptions volcaniques	10	25
	Débris météoriques	25	5
	Feux de forêts	-	-
	Total	1535 (61%)	780 (51%)
Secondaires	Sulfates	420	335
	Nitrates	75	60
	Hydrocarbures	75	75
	Total	570 (23%)	470 (31%)

Tableau 3:Estimations moyennes des émissions mondiales en matière particulaire de sources naturelles en Méga tonne[18]

1.4.3.2 Les sources anthropiques ou humaines

Les sources anthropiques sont la combustion de combustibles fossiles (notamment dans les véhicules et les centrales électriques), les processus industriels (production de métaux, de ciment, de chaux et de produits chimiques), les travaux de construction, l'exploitation de carrières et de mines, la consommation de cigarettes et le chauffage au bois[19].

Type des particules	Particules	De toute taille	Plus petites que 5 μm
Primaires	Processus industriels	56.4	12.4
	Source fixes de combustion	43.4	9.6
	Incinération de déchets	2.4	0.4
	Solides	2.2	1.8
	Transport	28.8	5.4
	Divers	-	-
	Total	133.2	29.6
Secondaires	Sulfates	220	200
	Nitrates	40	35
	Hydrocarbures	15	15
	Total	275 (11%)	250 (16%)

Tableau 4: Estimations moyennes d'émissions mondiales de particules anthropiques en Méga tonne[18]

1.4.4 Propriétés des particules

Afin de comprendre les différents comportements des particules, il est nécessaire de comprendre certaines de leurs principales propriétés mécaniques et physiques, ainsi que leur composition chimique. Ces caractéristiques jouent un rôle très important dans le dépôt de particules, la filtration et la condensation.

1.4.4.1 Composition chimique

La composition chimique des particules en suspension dépend de leur origine et des réactions qu'elles subissent au cours de leur séjour dans l'atmosphère.

Les principaux composés des particules sont :

1.4.4.2 Les composés carbonés

l'aérosol carboné est constitué d'une composante organique (OC) d'origine primaire et secondaire, regroupant plusieurs centaines de composés organiques différents, et d'une composante "black carbon" (BC) également appelé carbone-suie ou carbone élémentaire (EC), principalement d'origine primaire .

1.4.4.3 Les composés minéraux et des sels

(Carbonate de calcium, chlorure de sodium, etc.) Issus de phénomènes érosifs et de remises en suspension de poussières (érosions des sols et des routes, poussières désertiques, embruns, travaux de chantiers, etc.)

1.4.4.4 Les composés inorganiques

Tels les sulfates et les nitrates essentiellement formés secondairement dans l'atmosphère à partir de l'ammoniac et de formes acides (sulfurique et nitrique) produits par oxydation de soufre et d'azote.

1.4.4.5 Les métaux

Provenant d'émissions industrielles (sidérurgie, etc.), de phénomènes abrasifs (freinage des véhicules, remise en suspension, etc.), et de la combustion (chauffages, incinération, etc.)

1.4.4.6 Les composés d'origine biogène

Comme par exemple les pollens, les spores et divers micro-organismes (champignons, bactéries...).

1.4.5 Propriétés physiques:

1.4.5.1 Aspect morphologique :

La source d'émission est le principal facteur qui définit la forme d'une particule, on retrouve des particules sphériques telles que les cendres volantes et les pollens, des particules cubiques irrégulières, flocons tels que les minéraux, fibreuses telles que les fibres végétales et enfin flocons condensé tels que les fumées.

Leur proportion en masse est fonction du type d'aérosol rencontré[20].

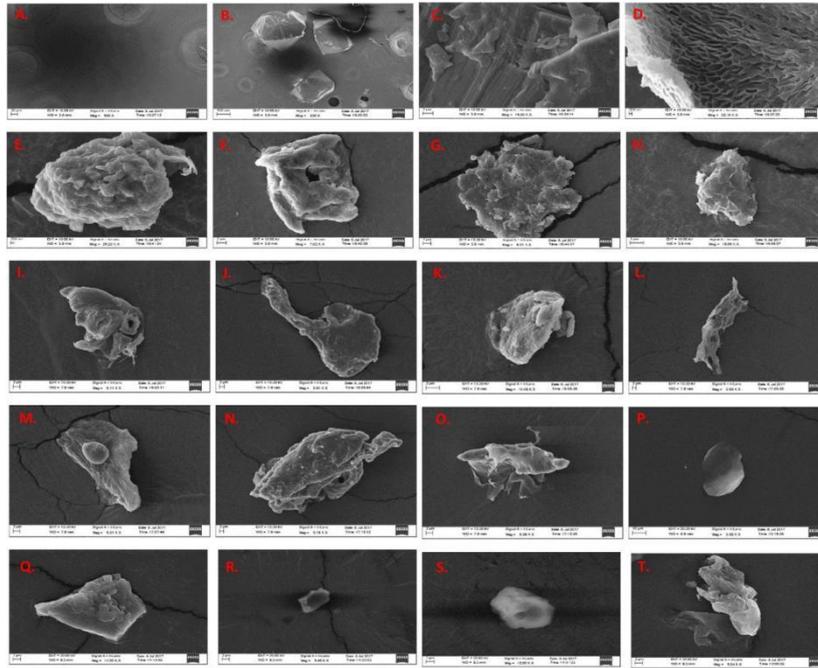


Figure 4: Images de microscopie électronique à balayage de particules en suspension dans l'air[21]

1.4.5.2 Diamètre aérodynamique:

La pollution atmosphérique particulaire est un mélange de particules solides, liquides ou solides et liquides en suspension dans l'air. Ces particules en suspension varient en taille, en composition et en origine. Il est pratique de classer les particules par leurs propriétés aérodynamiques car:

- Ces propriétés régissent le transport et l'élimination des particules de l'air ;
- Elles régissent également leur dépôt sur les différentes surfaces;
- Elles sont associées à la composition chimique et aux sources des particules

Ces propriétés sont commodément résumées par le diamètre aérodynamique, c'est-à-dire la taille d'une sphère de densité unitaire ayant les mêmes caractéristiques aérodynamiques. Les particules sont échantillonnées et décrites sur la base de leur diamètre aérodynamique, généralement appelé simplement la taille de la particule[22].

1.4.6 Caractéristiques mécaniques

a. La vitesse de sédimentation:

On appelle vitesse de sédimentation la vitesse de chute des particules en suspension dans un gaz (non turbulent) sous l'action de la gravité. La particule soumise à son poids et à la poussée d'Archimède atteint rapidement une vitesse verticale qui est appelée la vitesse de sédimentation. Cette vitesse dépend du rayon au carré et de la masse volumique (ou densité).

b. La diffusion brownienne:

C'est le mouvement irrégulier des particules qui résulte de leurs collisions avec les molécules du gaz. Ce déplacement devient appréciable et plus important que celui dû à la gravité lorsque le rayon aérodynamique de la particule devient inférieur à $0,1 \mu\text{m}$. Il s'agit là d'une propriété importante des petites particules. Dans une enceinte, dans une conduite, en raison de cette agitation brownienne, les particules vont se déposer sur les parois.

c. La coagulation

C'est le processus d'adhésion ou de fusion de particules entre elles. L'adhésion est d'autant plus forte que la dimension des particules est petite. Ce sont en effet des forces intermoléculaires à très court rayon d'action, comme la force de Van der Waals qui interviennent. La coagulation résulte essentiellement du mouvement brownien qui amène des particules à entrer en collision. Elle entraîne ainsi une diminution du nombre de particules dans l'aérosol et une évolution du spectre granulométrique, dans le sens d'un grossissement des particules. La masse volumique reste constante. La coagulation est un phénomène important lorsque le nombre de particules est élevé. Elle est d'autant plus efficace que les particules ont des dimensions différentes.

En raison de ce phénomène de coagulation, les particules les plus fines ne peuvent pas persister dans un aérosol en l'absence d'une production continue, et leur durée de vie est d'autant plus courte que la concentration numérique est élevée[23].

1.4.7 Paramètres climatiques influençant le mouvement et la dispersion des particules atmosphériques

Le phénomène de dispersion, c'est-à-dire le déplacement des particules depuis la source, est primordial puisqu'il détermine l'accumulation des particules ou sa dilution dans l'atmosphère. La dispersion dépend de plusieurs paramètres dont les conditions météorologiques.

1.4.7.1 Le vent

Le vent est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la dispersion des particules. Il intervient à toutes les échelles tant par sa direction que par sa vitesse. L'influence du vent sur la pollution particulaire est très variable selon la position de la source. Généralement la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Au fur et à mesure que les particules s'élèvent, la dispersion est facilitée par le vent. Plus le vent est fort, plus les niveaux de pollution seront bas. En revanche, un vent de faible vitesse favorise l'accumulation locale des particules[24].

1.4.7.2 La pression atmosphérique

En situation de basses pressions (dépression), la turbulence de l'air est généralement assez forte et engendre de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) ou la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des particules favorisent leur accumulation[24].

1.4.7.3 La stabilité et l'instabilité atmosphérique et la température

Une atmosphère est stable si une masse d'air, écartée de sa position d'équilibre, a tendance à y retourner. Elle est instable dans le cas contraire. Ces déplacements d'air sont guidés par des lois thermodynamiques. Si la masse d'air soulevée est plus froide que le milieu environnant, elle sera plus dense et donc redescendra à son niveau de départ (atmosphère stable). Si la masse d'air soulevée est plus chaude que le milieu environnant, elle sera plus légère et subira donc une élévation (atmosphère instable) [24].

1.4.7.4 Les précipitations

Les précipitations sont généralement associées à une atmosphère instable, qui permet également une bonne dispersion de la pollution atmosphérique. Par ailleurs, elles entraînent au sol certains polluants, et peuvent parfois accélérer la dissolution d'autres polluants. Mais, globalement, les concentrations en polluants dans l'atmosphère diminuent nettement par temps de pluie notamment pour les poussières et les éléments solubles tel que le dioxyde de soufre (SO₂). L'humidité influence la transformation des polluants primaires émis, sous l'action de l'humidité : de l'acide sulfurique (H₂SO₄) se forme à partir du SO₂, et de l'acide nitrique (HNO₃) à partir des NO_x[24].

1.4.8 Impacts des particules sur l'environnement:

De nombreuses études scientifiques ont montré que les particules réduisent la visibilité et ont également des effets néfastes sur le climat, les écosystèmes et les matériaux. Les PM, principalement les PM_{2.5}, affectent la visibilité en modifiant la manière dont la lumière est absorbée et diffusée dans l'atmosphère. En ce qui concerne le changement climatique, certains constituants du mélange ambiant de PM favorisent le réchauffement climatique (par exemple, le carbone noir), tandis que d'autres ont une influence refroidissant (par exemple, les nitrates et les sulfates), de sorte que les PM ambiantes ont à la fois des propriétés de réchauffement et de refroidissement du climat. Les PM peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes, notamment les plantes, le sol et l'eau, par le biais du dépôt de PM et de leur absorption ultérieure par les plantes ou de leur dépôt dans l'eau, où elles peuvent affecter la qualité et la clarté de l'eau. Les composés métalliques et organiques présents dans les PM sont les plus susceptibles d'altérer la croissance et le rendement des plantes. Le dépôt de PM sur les surfaces entraîne la salissure des matériaux.

Chapitre 2 : énergie solaire photovoltaïque

2 Énergie solaire photovoltaïque

2.1 Introduction

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique.

La limitation de la quantité de ces réserves et l'accroissement de la demande d'énergie ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement et d'autres forme d'énergie dite « *énergie renouvelable* ».

Dans le monde, le parc solaire photovoltaïque croît en moyenne de 42 % par an depuis 2000. L'AIE prévoit 1200 gigawatts de capacités supplémentaires pour les énergies renouvelables d'ici à 2024, une augmentation de 50 % par rapport au parc installé aujourd'hui.

L'énergie solaire est une source d'énergie accessible à tous (industriels, collectivités et particuliers). Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergies : l'énergie calorifique avec les installations solaires thermiques (chauffe-eau solaire ou climatiseur solaire), l'énergie électrique avec les installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique[25].

2.2 Le rayonnement solaire

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique composée de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium. Il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 15.10^6 °C. Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique.

En raison de la température superficielle du soleil (environ 5800°K), ce rayonnement électromagnétique se situe dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et dans le proche infrarouge (au-delà de 0,75 et jusqu'à 4 μm environ). L'énergie véhiculée par ce rayonnement, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de 340 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Un bilan énergétique montre que, sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système terre + atmosphère, environ 100 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ sont réfléchis vers l'espace ; seul le reste est absorbé, pour un

tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface de la terre[26].

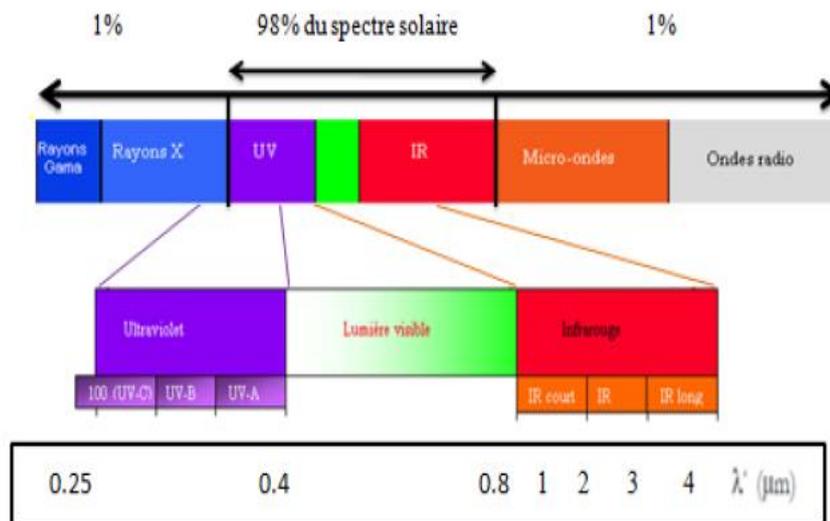


Figure 5: Composition du rayonnement solaire

2.2.1 Le rayonnement direct

Est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil et celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

2.2.2 Le rayonnement diffus

C'est l'éclairement énergétique provenant de toute la voûte céleste .il se manifeste lorsque le rayonnement solaire direct se disperse dans les nuages et les particules atmosphériques.

2.2.3 Le rayonnement réfléchi

C'est le rayonnement émis par la surface terrestre sous forme réfléchi ou diffuse.

2.2.4 Rayonnement global

C'est l'ensemble des trois précédents rayonnements (direct, diffus et réfléchi). C'est celui-ci qui est utilisé pour faire fonctionner les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques.

2.3 Cellules photovoltaïques

2.3.1 Introduction

Le marché de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire croît fortement depuis une dizaine d'années. Dans ce contexte, les générateurs photovoltaïques connectés au réseau de distribution de l'électricité prennent de plus en plus d'importance.

La technologie photovoltaïque permet de transformer une partie de cette énergie en électricité. Cette transformation s'effectue sans bruit, sans émission de gaz : elle est donc par nature totalement propre. Par ailleurs, l'absence de mise en mouvement de pièces mécaniques lui confère un niveau de fiabilité inégalable (durée de vie moyenne d'un module estimée à plus de 30 ans). D'autre part comme les sources d'énergie conventionnelle se réduisent vite et le coût de l'énergie augmente avec le développement industriel, le problème de la diminution d'énergie s'aggrave de plus en plus. La gravité des problèmes de l'environnement résultant fait que l'utilisation des systèmes à énergie renouvelable devient un objectif majeur pour l'humanité.

2.3.2 Définition

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, elle convertie directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière[27]. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température et du vieillissement de la cellule.

Les cellules photovoltaïques sont constitués de :

- Une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- Une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- Une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

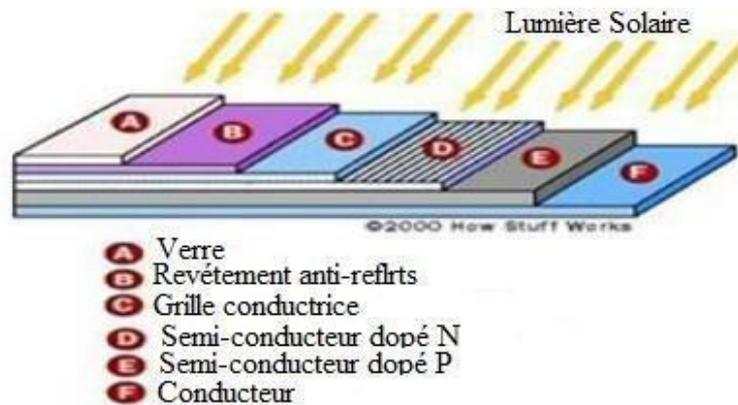


Figure 6: Structure basique d'une cellule solaire.

2.3.3 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement de la *cellule photovoltaïque* est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons (particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s), mettent en mouvement un flux d'*électrons*.

Le matériau qui compose la cellule photovoltaïque comporte deux zones, une dopée de type n (Phosphore) avec un excès d'électrons et l'autre dopée de type p (Bore) avec un déficit d'électrons. Lorsque ces deux zones sont en contact les électrons en excès de la première zone (dopée n) se propagent dans la seconde zone (dopée p). La première zone devient chargée positivement et la seconde devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue[27].

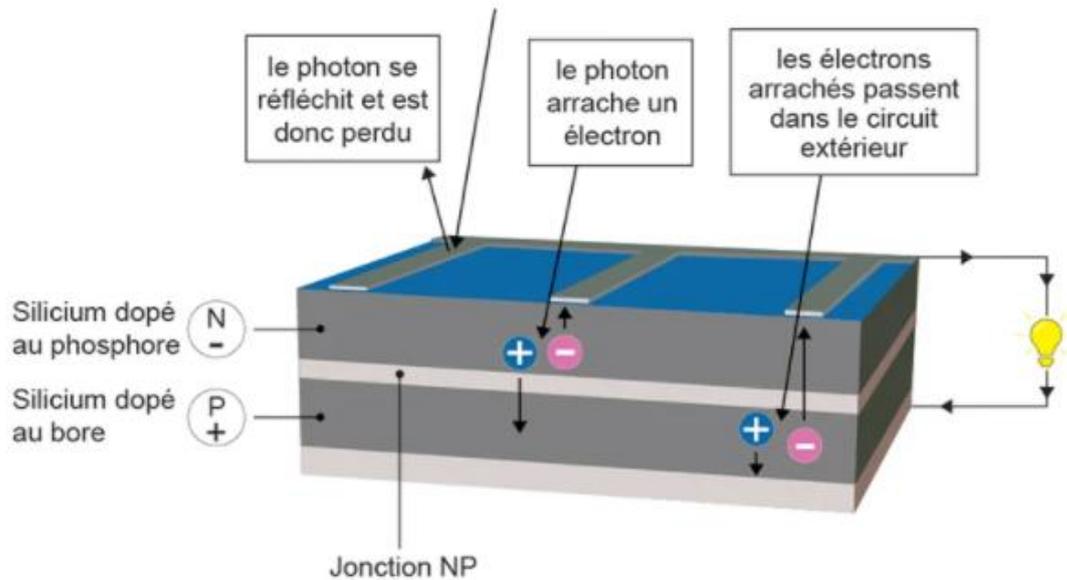


Figure 7: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

2.3.4 Technologie des cellules photovoltaïque

Une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être partagée en trois grandes familles selon les technologies utilisées

2.3.4.1 Technologies de la première génération à base de silicium cristallin

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire[28].



Figure 8: Module polycristallin (à gauche) et monocristallin (à droite)

2.3.4.2 Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince

Les couches minces inorganiques constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Le principe de ces cellules est d'utiliser un matériau absorbeur ayant un coefficient d'absorption optique supérieur à celui du silicium cristallin[29].

2.3.4.3 Technologie de la troisième génération

Cette génération répond à un besoin d'ordre économique. Elle a pour objectif principal de réduire le prix du kwh par l'amélioration des rendements ou par la diminution du coût de fabrication. Dans cette optique, différents concepts sont mis en œuvre dont les 4 principaux sont les cellules solaires à concentration, les cellules à colorants, les cellules organiques et les nouveaux concepts émergents.

2.3.5 Paramètres caractéristiques

2.3.5.1 Caractéristiques courant-tension

Les cellules sont caractérisées par des courbes courant-tension (figure)

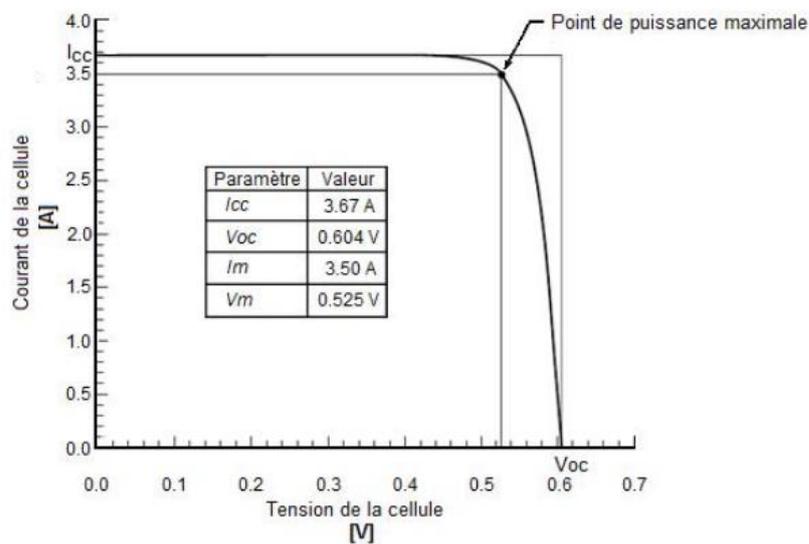


Figure 9:Caractéristique I-V d'une cellule solaire

La caractéristique I-V permet d'illustrer plusieurs paramètres externes d'une grande importance pour la caractérisation d'une cellule solaire: le courant de court-circuit I_{sc} , la tension en circuit ouvert V_{oc} , le point de puissance maximale P_m et le facteur de forme. Pour les faibles valeurs de la tension appliquée, le courant de diode devient négligeable. Quand la tension s'annule, le courant correspond exactement au courant de court-circuit. De l'autre côté, lorsque la tension est suffisamment élevée de sorte que le courant de diode (recombinaison) devient important, le courant de la cellule chute rapidement[30]

2.3.5.2 Densité de courant de court-circuit J_{sc}

Par définition, la densité de courant correspond au courant délivré par la cellule solaire par unité de surface. Elle s'exprime en mA/cm². La densité de courant de court-circuit J_{sc} correspond à la densité de courant photo-générée obtenue en appliquant une différence de potentiel nulle aux bornes du dispositif. Dans ce cas, les deux électrodes qui contactent la zone p et n sont en court-circuit et les porteurs minoritaires vont être drainés par le champ interne[31].

2.3.5.3 Tension en circuit ouvert V_{oc}

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{oc} = \ln \frac{nKT}{q}$$

n: Facteur d'idéalité de la diode.

K : constante de Boltzmann (1,381.10⁻²³ Joule/Kelvin).

T : Température de la jonction p-n des cellules.

q: Charge d'électron (1,602.10⁻¹⁹C).

Il peut aussi être calculé par :

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right)$$

I_{cc} : Courant continu de la cellule.

I_s : Courant de saturation de la diode.

2.3.5.4 Puissance maximale

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, etc..), la puissance électrique (P) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni (I) par une tension continue donnée (V) :

$$P = I.V$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt).

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

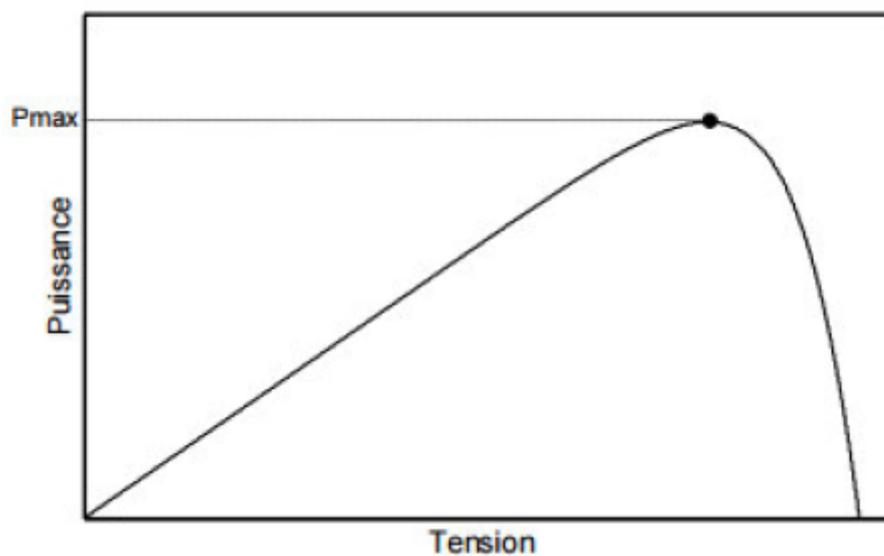


Figure 10: Courbe caractéristique P-V

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum $P_{\text{max-idéale}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{\text{max idéale}} = V_{\text{co}} * I_{\text{cc}}$$

$P_{\text{max_idéale}}$: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt).

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV(Volt).

I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV(Ampère).

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC). Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en général un ensoleillement de 1000W/m² et une température de 25°C).

2.3.5.5 Le facteur de forme FF

Appelé en anglais Fill Factor, le facteur de forme correspond au rapport entre la puissance au point de fonctionnement maximal P_{max} et la puissance théorique idéale. Il s'exprime par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{V_{\text{co}} I_{\text{cc}}}$$

2.3.5.6 Le rendement de conversion :

Le rendement de conversion photovoltaïque est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer une cellule et la puissance incidente de la lumière P_{inc} . Ce rendement est lié au facteur de forme par l'équation [32]:

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{incidente}}} = \frac{FF \cdot V_{\text{co}} \cdot I_{\text{cc}}}{P_{\text{incidente}}}$$

$P_{\text{incidente}}$: Puissance incidente.

D'autre part, comme toutes les charges générées ne peuvent pas être collectées aux bornes des électrodes, la cellule n'atteint pas son maximum d'efficacité. On introduit alors le paramètre rendement quantique externe afin de mieux évaluer l'efficacité d'une cellule solaire. Cette grandeur correspond à la réponse spectrale de la cellule.

2.4 Module photovoltaïque :

Une cellule solaire typique au silicium produit une tension de puissance maximale d'environ 475 millivolts aux conditions standards. Cette faible tension ne permet pas, en pratique, d'utiliser les cellules de façon individuelle. En général, les cellules solaires sont connectées en série et/ou parallèle pour produire une tension utile pour les applications pratiques. Cette combinaison de cellules solaires forme ce qu'on appelle le module photovoltaïque [33].

Le module photovoltaïque est un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, il consiste en un lot de cellules photovoltaïques connectées entre elles, puis enrobées dans une résine transparente.

La face arrière des cellules est recouverte d'un film multicouche recouvert de teldar et d'aluminium. La face avant est quant à elle recouverte d'un verre. Les connexions de sortie de la face arrière des cellules sont isolées électriquement par un film de polymère transparent, nommé Mylar. Cet assemblage est effectué à vide.

La plupart des modules photovoltaïques commercialisés contiennent 36 cellules connectées en série pour s'adapter à une tension de batterie de 12 V. On peut trouver aussi des modules contenant plus de 36 (72 et plus) [33].

Une coupe transversale d'un module photovoltaïque est représentée par la figure :

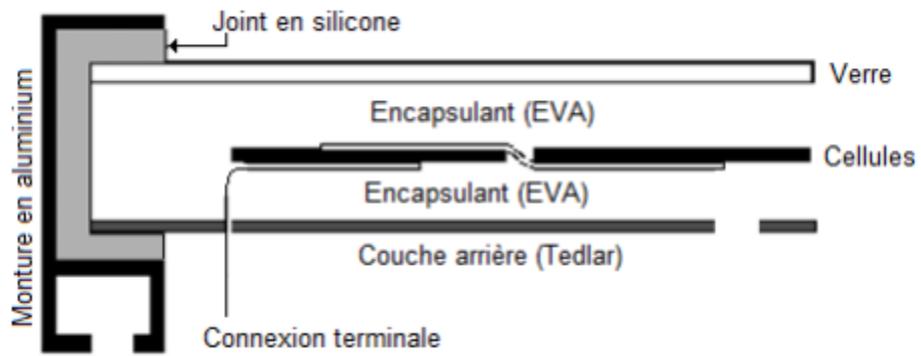


Figure 11: coupe transversale d'un module photovoltaïque

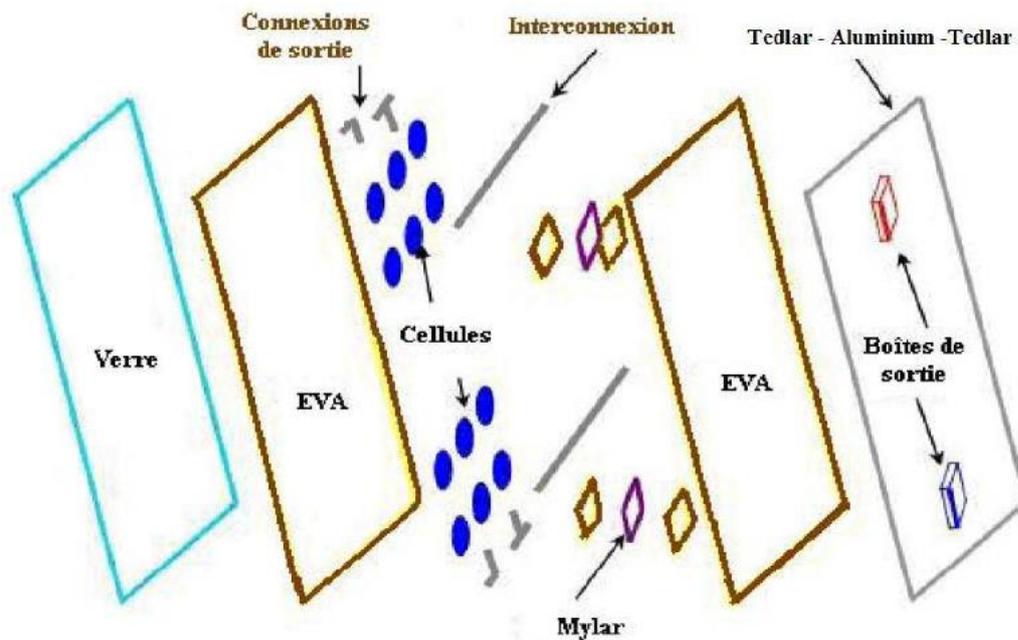


Figure 12: Les différentes couches et matériaux composants un module photovoltaïque.

2.4.1 Facteurs influençant le rendement d' un panneau solaire

Il existe trois facteurs principaux qui peuvent affecter l'efficacité d'un panneau solaire.

2.4.1.1 L'intensité d'éclairement du soleil

L'intensité de la lumière du soleil modifie l'efficacité des panneaux solaires tout au long de la journée. Dans l'après-midi, lorsque le soleil brille au plus haut sommet, les panneaux solaires peuvent générer plus d'énergie car ils peuvent capter plus d'énergie[34].

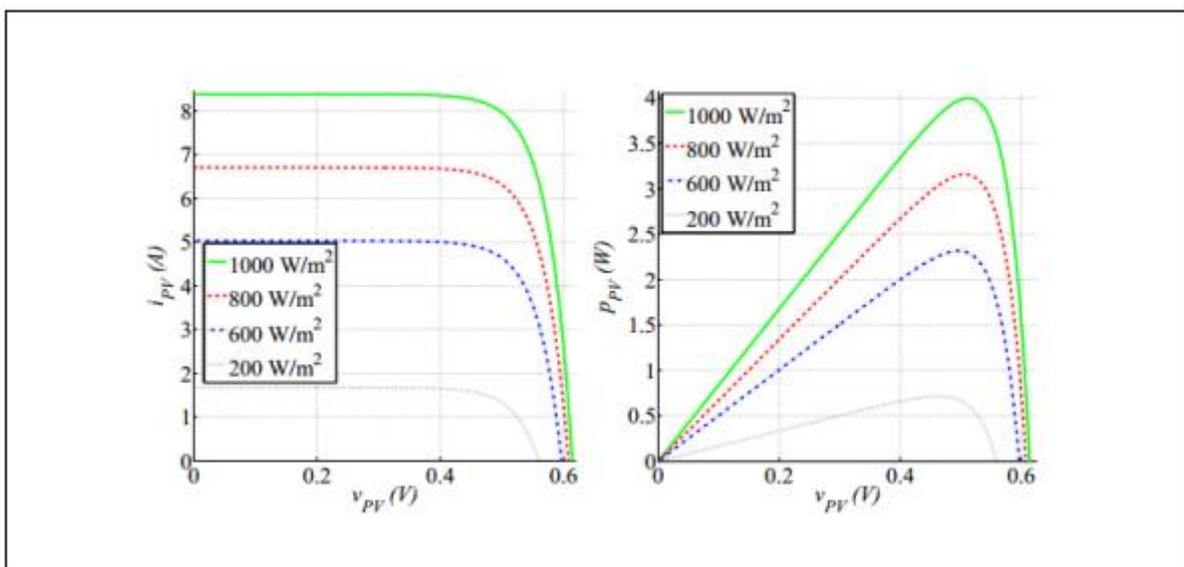


Figure 13:Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) à T=25°C d'une cellule photovoltaïque

2.4.1.2 Couvertures nuageuses

Une atmosphère nuageuse diminue l'efficacité des panneaux solaires en permettant à une quantité moindre de lumière solaire de tomber sur les panneaux solaires[34].

Les nuages peuvent provoquer la réflexion d'une partie du rayonnement solaire vers l'espace, diffuser le rayonnement incident qui n'a alors plus de direction préférentielle, ou bien absorber une partie du rayonnement solaire, c'est à dire de l'énergie qui ne pourra pas être captée par les panneaux photovoltaïques. Chacun de ces effets est plus ou moins fort selon le type de nuage, son épaisseur et son altitude.

2.4.1.3 La poussière

La présence de poussières et de particules dans l'atmosphère a deux effets principaux sur l'efficacité des panneaux solaires: le premier est similaire aux nuages en réfléchissant ou absorbant la lumière solaire incidente, et le second est lié au dépôt de poussière sur le panneau. Réduisant ainsi la surface efficace, et donc l'efficacité.

2.4.1.4 Accumulation de chaleur

Les panneaux solaires ne peuvent pas fonctionner efficacement à des températures élevées. Les régions au climat chaud sont généralement confrontées au problème de l'accumulation de chaleur dans les panneaux solaires. L'accumulation de chaleur peut réduire la production d'énergie de 10 à 25 % [34].

Lorsqu'un panneau solaire est exposé à des températures plus élevées, le courant augmentera et la tension diminuera. Lorsque la tension chute plus rapidement que le courant, l'efficacité du panneau solaire diminue [35].

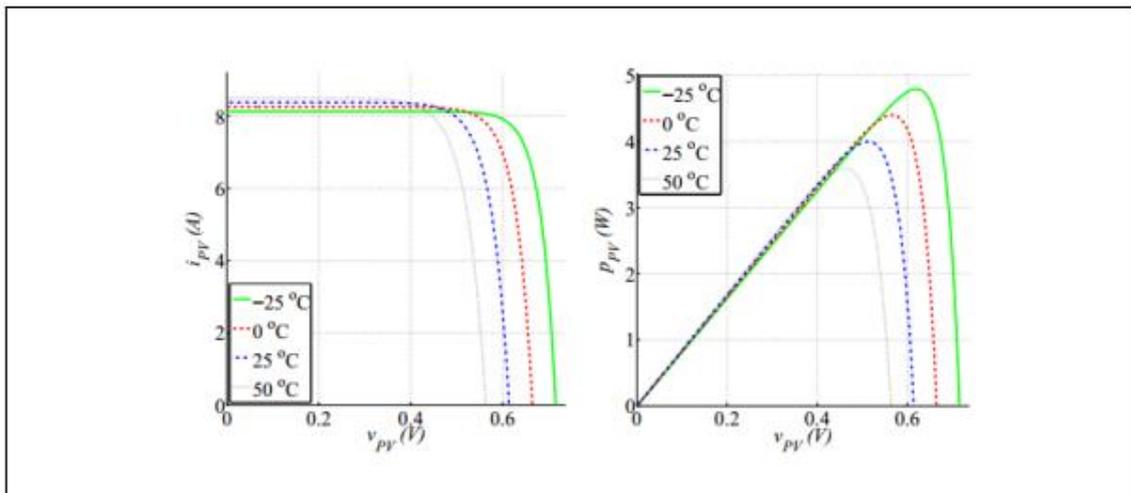


Figure 14: Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque

2.4.1.5 La dégradation

La dégradation est la détérioration progressive des caractéristiques d'un composant ou d'un système qui peut affecter sa capacité à fonctionner dans les limites des critères d'acceptabilité et qui est causée par les conditions d'exploitation[36].

Les panneaux solaires sont aussi susceptibles à la dégradation, cela a pour cause l'influence des facteurs climatiques et atmosphériques tels que le rayonnement ultraviolet, l'humidité, la température...etc [37].

On considère qu'un module PV est dégradé lorsque sa puissance atteint un niveau inférieur à 80 % de sa puissance initiale[38].

2.5 Interactions particule/lumière:

2.5.1 Bilan radiatif

Interactions du rayonnement solaire avec l'atmosphère et la Terre - l'albédo Le rayonnement solaire interagit avec la Terre et l'atmosphère (y compris les nuages) selon différents processus :

2.5.2 Absorption par l'atmosphère

L'énergie du rayonnement est alors fournie à l'atmosphère. Dans le domaine spectral du rayonnement solaire (essentiellement le domaine visible), cette absorption est modérée (environ 20 % de la puissance est absorbée)[2].

2.5.3 Diffusion par l'atmosphère

Le rayonnement solaire excite les molécules et particules de l'atmosphère qui réémettent un rayonnement de même longueur d'onde dans toutes les directions. Cette diffusion

se traduit par une diminution de la puissance transportée par le rayonnement solaire[2].

2.5.4 Absorption par la Terre

Toute la puissance solaire incidente sur la Terre (sols et océans) y est absorbée[2].

2.5.5 Réflexion par l'atmosphère

Une partie de la puissance solaire incidente est réfléchiée par l'interface entre l'espace et l'atmosphère ainsi que par les nuages[2].

2.5.6 Réflexion par la Terre

Une partie de la puissance solaire qui arrive sur la Terre est réfléchiée vers l'espace. Cette réflexion est particulièrement marquée sur les zones enneigées ou glacées (glaciers, banquises, calotte glaciaire...)[2].

2.5.7 Albédo

On appelle albédo terrestre le rapport entre les puissances réfléchiées ou diffusées par l'atmosphère et la surface terrestre et la puissance solaire incidente. L'albédo terrestre est voisin de 30 % (dont 4 % seulement sont imputables aux réflexions à la surface terrestre) : 70 % de la puissance solaire incidente est absorbée par l'atmosphère et la Terre, le reste repart vers l'espace[2].

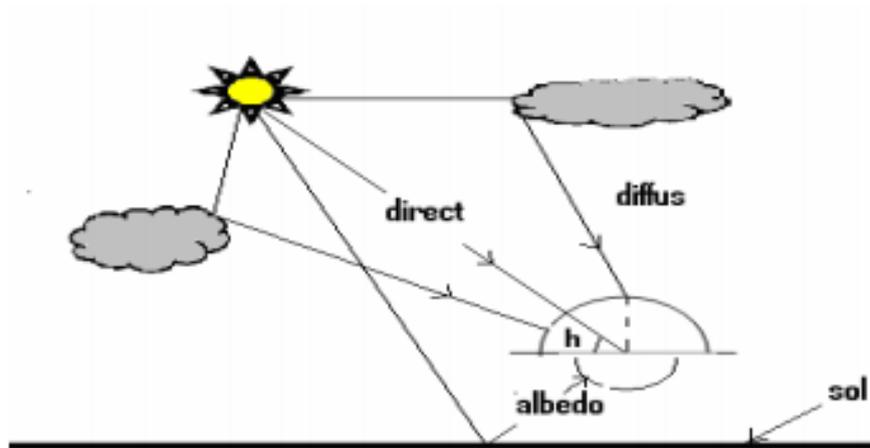


Figure 15:différents types du rayonnement solaire

2.5.8 Absorption et diffusion de la lumière par les particules

La diffusion est une interaction de la lumière avec la matière au cours de laquelle la direction du rayonnement incident et sa polarisation sont modifiées. La lumière ainsi diffusée porte l'information de dépolarisation.

La diffusion se produit lors de l'interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir. Il existe trois types de diffusion:

- la diffusion de Rayleigh
- la diffusion de Mie
- la diffusion non-sélective.

2.5.9 Absorption

L'absorption désigne un processus qui dissipe l'énergie électromagnétique dans un milieu, c'est-à-dire le phénomène par lequel l'énergie d'un photon est transmise à une autre particule. La loi de Beer-Lambert est une relation empirique qui décrit ce phénomène. Pour une longueur d'onde donnée, la relation s'écrit[39] :

$$I = I_0 e^{-\alpha X}$$

I est l'intensité du rayonnement en sortie, I_0 l'intensité du rayonnement en entrée, α le coefficient d'absorption du milieu et X la longueur du trajet optique.

Le coefficient α dépend à la fois de la longueur d'onde λ et de l'indice de réfraction k du matériel traversé. La relation qui les unit est la suivante[39] :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

2.6 Modélisation atmosphérique

2.6.1 Modèle Hysplit

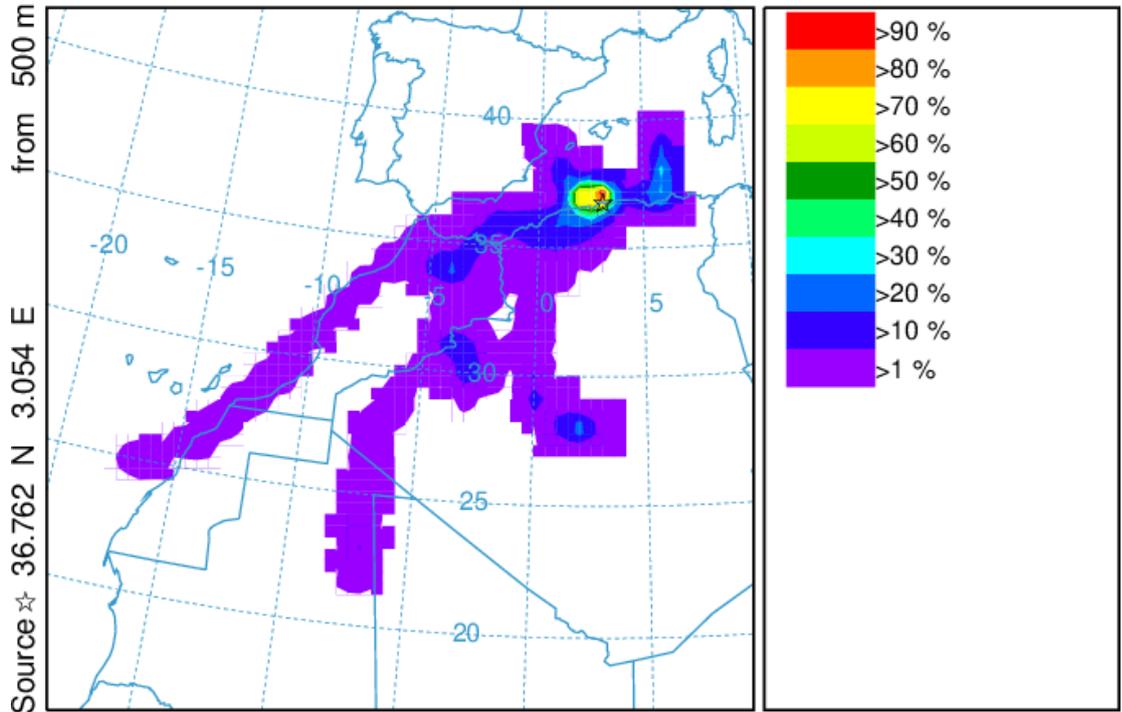
Le modèle Hysplit (The Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model) est un système complet de calcul de trajectoires simples de parcelles d'air simples ainsi que des transports complexes, de dispersion, de transformation chimique et de dépôt.

HYSPLIT continue d'être l'un des systèmes de transport et de dispersion atmosphérique les plus utilisés dans le domaine des sciences atmosphériques. L'une des applications les plus courantes du modèle est l'analyse de la rétro-trajectoire pour déterminer l'origine des masses d'air et établir les relations source-récepteur. HYSPLIT a également été utilisé dans une variété de simulations décrivant le transport atmosphérique, la dispersion et le dépôt de polluants et de matières dangereuses. Quelques exemples d'applications comprennent le suivi et la prévision de l'émission de matières radioactives ; la fumée d'incendie ; les polluants de la poussière soufflée par le vent provenant de diverses sources d'émission stationnaires et mobiles[41].

La méthode de calcul du modèle est un hybride entre l'approche lagrangienne, qui utilise un cadre de référence mobile pour les calculs d'advection et de diffusion lorsque les trajectoires

ou les paquets d'air se déplacent de leur emplacement initial, et la méthode eulérienne, qui utilise une grille fixe en trois dimensions comme cadre de référence pour calculer les concentrations de polluants dans l'air.

NOAA HYSPLIT MODEL - TRAJECTORY FREQUENCIES
 # endpts per grid sq./max # endpts in any grid sq. (%) 0 m and 99999 m
 Integrated from 1700 01 Jun to 2300 28 May 21 (UTC) [backward]
 Freq Calculation started at 0000 00 00 (UTC)



METEOROLOGICAL DATA

Job ID: 184281 Job Start: Wed Jun 2 21:16:07 UTC 2021
 Source 1 lat.: 36.761820 lon.: 3.053684 height: 500 m AGL
 Initial trajectory started: 1700Z 01 Jun 21
 Direction of trajectories: Backward Trajectory Duration: 48 hrs
 Frequency grid resolution: 1.0 x 1.0 degrees
 Endpoint output frequency: 60 per hour
 Number of trajectories used for this calculation: 8
 Meteorology: 0000Z 1 Jun 2021 - GDAS1

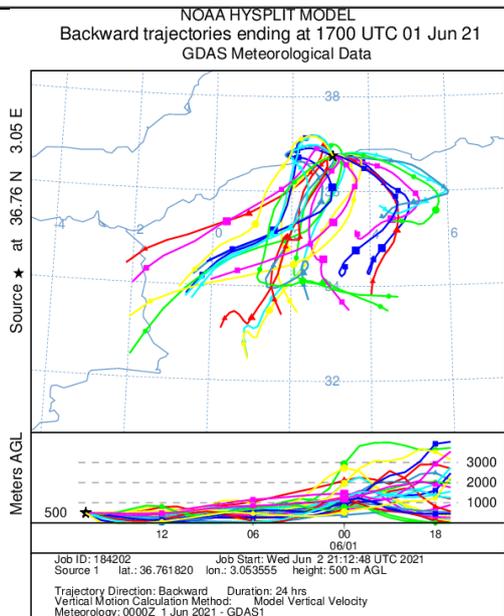
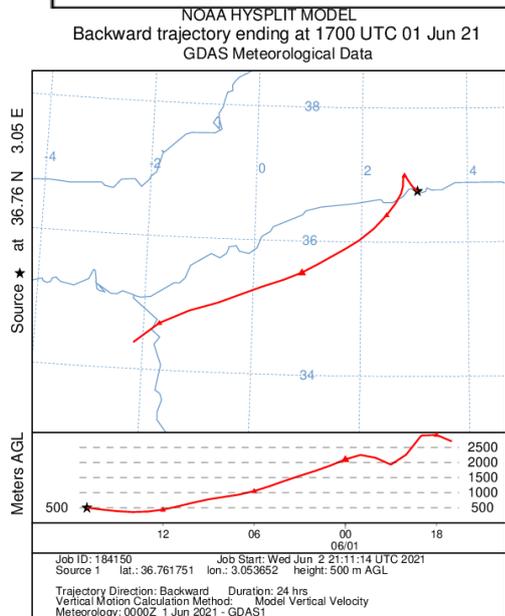


Figure 16: Exemples de cartes fournies par HYSPLIT

2.6.1.1 Les étapes d'obtention des trajectoires avec HYSPLIT :

- On accède la page d'accueil du modèle HYSPLIT.
- On choisit « Compute archive trajectories » (Calculer les trajectoires des archives).

2.6.1.2 Type de trajectoire:

On sélectionne « Number of Trajectory Starting Locations » pour spécifier le nombre de trajectoires à la position de départ (1,2 ou 3). Et on choisit un type de trajectoire (types : Normal, Matrix, Ensemble, Frequency).

On clique sur "Next/Suivant".

2.6.1.3 Météorologie et lieux de départ:

Dans le menu déroulant, on choisit un ensemble de données météorologiques

Pour notre travail on choisit "Modèle GFS (384h fcst, 3h à 192h, puis 12h, global, pression)" est sélectionné pour les prévisions GDAS et les données météorologiques (globales, 2006-présent).

On spécifie l'emplacement de la source « Source location » d'une des manières suivantes:

- En précisant l'emplacement directement sur la carte de la page du site.
- En ajoutant manuellement la longitude et la latitude des degrés décimaux.
- En précisant le pays et la ville.

On clique sur "Next/Suivant".

2.6.1.4 Fichier météorologique :

- On choisit la semaine qu'on veut étudier.
- On clique sur "Next/Suivant".

2.6.1.5 Détails de l'exécution du modèle:

Pour les paramètres du modèle on choisit :

- Trajectory direction (Direction de la trajectoire):

Forward (Trajectoire vers l'avant) : La masse d'air descendant du site.

Backward (Rétro-trajectoire) : La masse d'air arrivant au site.

2.6.1.6 Mouvement vertical :

Model vertical velocity (Modèle de vitesse verticale).

Isobaric (Isobare).

2.6.1.7 Start time :

- Le jour et l'heure de début (nécessairement de la semaine choisie précédemment).
- Total run time : La durée totale de mouvement des masses d'air.
- Level 1, 2, 3 height (Hauteur du niveau 1, 2, 3) : Les hauteurs des trajectoires (500,100,1500 m).
- On laisse les options d'affichage dans leur état par défaut.
- On clique sur «Request trajectory» pour obtenir le modèle et les graphiques sous format Gif ou Pdf.

2.6.1.8 Exemple d'obtention d'un rétrotrajectoire:

Number of Trajectory Starting Locations: 1.

Type: Normal.

Source location : Alger Centre (La Grande Poste).

Meteorology File: Current week.

Trajectory direction: Backward

Vertical motion: Model vertical velocity

Le jour et l'heure: Premier jour de la semaine à 17:00.

Total run time: 24H.

Level 1 height: 500.

Level 2 height : 0.

Level 3 height : 0.

Le résultat final est illustrée dans la figure suivante :

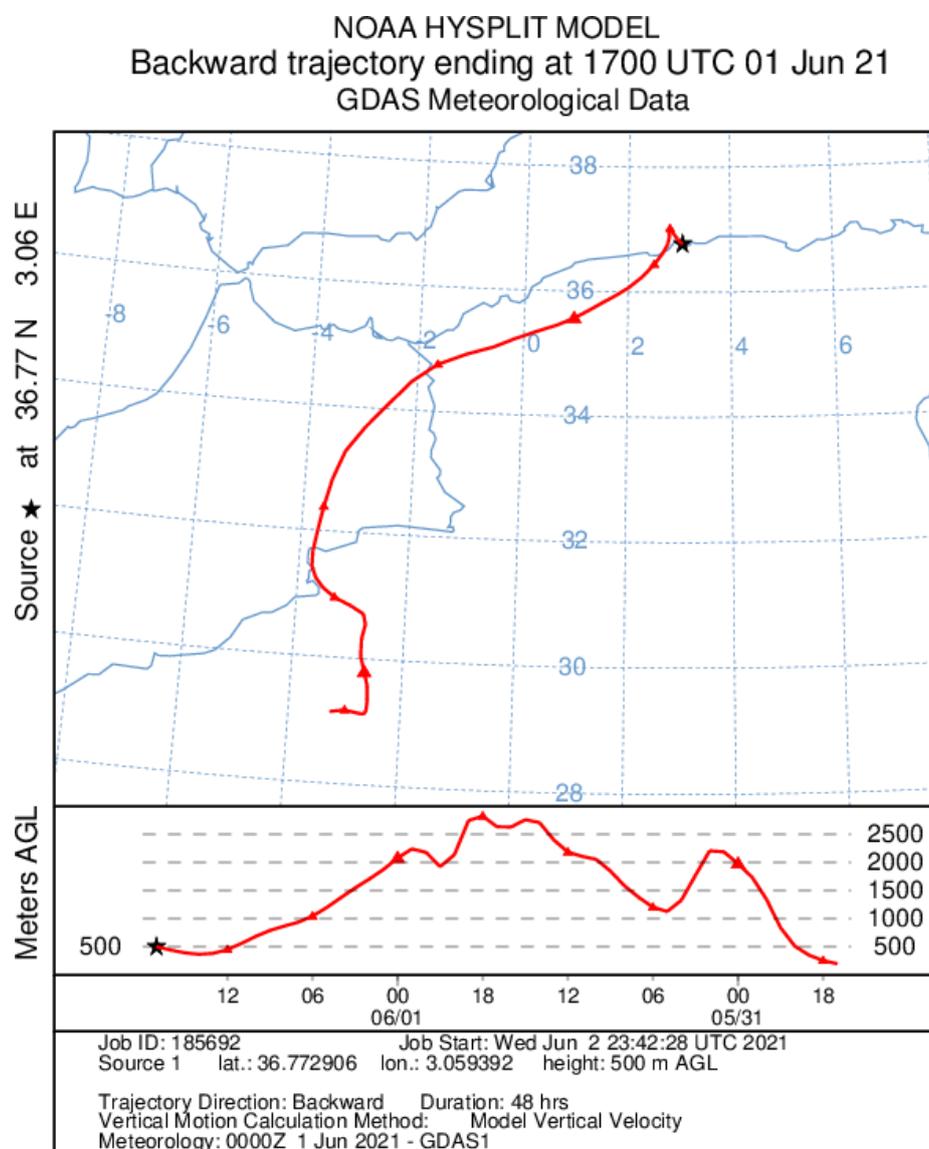


Figure 17: Exemple d'une carte retro-trajectoire réalisée par le modèle HYSPLIT

2.6.2 Modèle MODIS

MODIS (ou Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) est un instrument clé à bord des satellites Terra (initialement connu sous le nom d'EOS AM-1) et Aqua (initialement connu sous le nom d'EOS PM-1). Terra MODIS et Aqua MODIS observent la totalité de la surface de la Terre tous les 1 à 2 jours, acquérant des données dans 36 bandes spectrales (groupes de longueurs d'onde) avec des longueurs d'onde allant de 0,4 à 14,385 μm .

MODIS offre un large éventail de données sur les différents phénomènes qui se produisent sur terre :

Niveau 1	Radiances brutes. Radiances calibrées.
Produits atmosphériques	Produit aérosol. Précipitations totales. Produit nuageux. Profils atmosphériques. Produit commun atmosphérique.. Couvertures nuageuses.
Produits terrestres	Réflectance de la surface. Température de la surface terrestre. Produits de la couverture terrestre. Anomalies thermiques/incendies. Produit des zones brûlées.
Produits de la cryosphère	Couverture de neige. Glace de mer et température de surface de la glace.
Produits océaniques	Température de surface de la mer. Carbone organique particulaire. Carbone inorganique particulaire.

Tableau 5:Exemples des données fournies par Terra/Aqua MODIS

Ces données amélioreront notre compréhension de la dynamique globale et des processus qui se produisent sur la terre, dans les océans et dans la basse atmosphère. MODIS joue un rôle essentiel dans le développement de modèles du système terrestre validés, globaux et interactifs, capables de prévoir les changements planétaires avec suffisamment de précision pour aider les décideurs à prendre des décisions judicieuses concernant la protection de notre environnement.

Partie 2

Matériels et méthodes

Dans ce chapitre nous allons présenter la partie expérimentale effectuée. On étudie d'abord la qualité de l'air dans le site urbain d'Alger centre dans la station NESMA en analysant les données des PM_i fournies par l'analyseur FIDAS du CDER en 2019, et dans un second temps dans le site semi-urbain de Ben Aknoun où on établira l'impact des particules en suspension sur le rendement des panneaux solaires.

3 Analyse des données des PM_i de la station NESMA en utilisant un équipement de la division photovoltaïque du CDER

3.1 Station atmosphérique « Nesma »

La station de la qualité de l'air NESMA a été installée par les chercheurs du Centre de Développement et des Energies Renouvelables le 30-04-2017 au sein du Centre-Universitaire Mustapha Bacha (Alger-Centre) parmi ses principales missions :

- Mesure en continue des niveaux de pollution en particuliers les particules de carbone suie, les particules fines, l'ozone, les oxydes d'azote, le méthane, les hydrocarbures totaux, en plus des paramètres météorologiques dans un site urbains de la capitale.
- Détecter les pics de pollution et les périodes durant lesquelles les seuils limites sont dépassés.
- Alerter les autorités durant les situations critiques et informer la population des mesures à suivre pour minimiser l'impact sur la santé.

La station d'analyse destinée à la surveillance de la qualité de l'air a pour but de fournir un bilan quantitatif et qualitatif de la pollution du site destiné.

3.2 Le site urbain d'Alger-centre

La commune d'Alger-Centre est située au nord de la wilaya d'Alger. Elle occupe une superficie de 3.7 Km², avec une population de 75 541 habitants (en 2008), soit une densité estimée à 20 416 hab/km² en 2008.

Les données géographiques ainsi que la photo satellite relative au site (figures 09 et 10) sont obtenues grâce à Google Maps. Le site de mesure est situé à une latitude de

36,7724841 N et une longitude de 3,0551159 E.

L'hôpital Mustapha Pacha ou hospitalo-universitaire Moustapha Pacha d'Alger (CHUMA), fondé en 1854 dans la commune de Mustapha, devenue Sidi M'Hamed, est le plus grand hôpital d'Algérie. Le choix de ce site pour l'implantation de la station est dû, entre autre, au fait qu'au niveau de ce CHU, il existe une station de mesure du réseau Sama safia relevant du Ministère de l'environnement (ME) et qui n'est plus opérationnelle depuis plusieurs années.

Le site de mesure se trouve à environ 600 m de la mer. Il est ouvert sur la mer et subit de ce fait également une bonne ventilation naturelle.

Les sources, proches ou lointaines, potentiellement émettrices des particules sont

- Le trafic routier du grand carrefour de la Place du 1^{er} Mai avec ses routes fortement fréquentées (Vers Adis Abbéba en longeant l'hôpital, vers Belcourt, vers Alger).
- La gare ferroviaire d'Alger Agha à 1,5 km.
- Le port d'Alger à 2 Km.
- L'aéroport d'Alger à 10 Km.
- La carrière de Beb El Oued à 5 km.

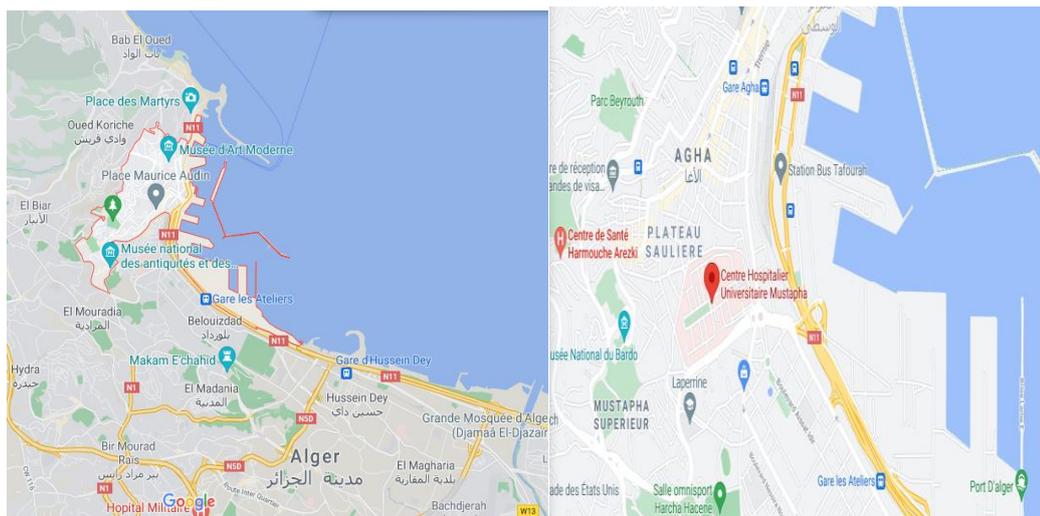


Figure 18: Localisation du site de prélèvement de la station NESMA.

3.3 Méthode de prélèvement et d'analyse des PMi et description de l'analyseur

La station de mesure NESMA se compose d'une cabine contenant cinq analyseurs des polluants atmosphériques:

- Un analyseur de particules FIDAS 200 ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, $PM_{4.0}$, PM_{10} , TSP ($\sum PM_i$)) et le nombre de particules par centimètre cube C_n),
- Un analyseur de carbone suie (aéthalomètre AE33),
- Un analyseur d'ozone.
- Un analyseur de composés organiques volatils.
- Un analyseur des oxydes d'azote ou NO_x .

La station est équipée aussi d'une station météorologique, des deux panneaux solaires photovoltaïques et deux stabilisateurs de courant et onduleurs pour la protection des appareils.

3.3.1 Présentation de l' appareil FIDAS :

Le granulomètre optique FIDAS 200 est un spectromètre optique, il permet de mesurer en temps réel et en continu les $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, $PM_{4.0}$, PM_{10} , ainsi que la concentration en nombre de particules et de l'indice d'humidité et la distribution granulométrique dans une plage de taille de 180 nm à 18 μ m, De plus, il mémorise à chaque seconde le nombre de particules dans chacun des 256 canaux de mesure.

Pour une utilisation sur les stations de mesure de polluants atmosphériques, le FIDAS dispose de toutes les fonctionnalités nécessaires pour fonctionner automatiquement et transmettre les données à distance.

L'analyseur FIDAS 200 est livré avec les éléments suivants :

- **Tête de prélèvement TSP type Sigma-2** : elle permet de s'affranchir de la problématique du vent. Elle doit être positionnée en tête de la ligne de prélèvement.
- **Ligne de prélèvement chauffée IADS** : La ligne de prélèvement chauffée IADS (longueur de 1,2 m) possède trois modes de régulation : OFF ; remove volatile/moisture compensation (asservissement par la sonde météorologique) ; remove volatil/semi-volatil (chauffage au maximum).

- Le mode de régulation à employer pour la surveillance réglementaire est : remove volatil/moisture compensation.
- Ce réglage est accessible à partir du menu principal (cf. figure 3) par le bouton « accessories », puis par le sous-menu « IADS ».
- **Sonde météorologique multi-paramètres (plusieurs modèles existants) :** elle permet d'enregistrer température, pression et humidité relative ambiantes.
- **Caisson de protection extérieure IP65 (en option) :** il est conçu pour faciliter l'installation et le maintien des différents éléments de l'analyseur.

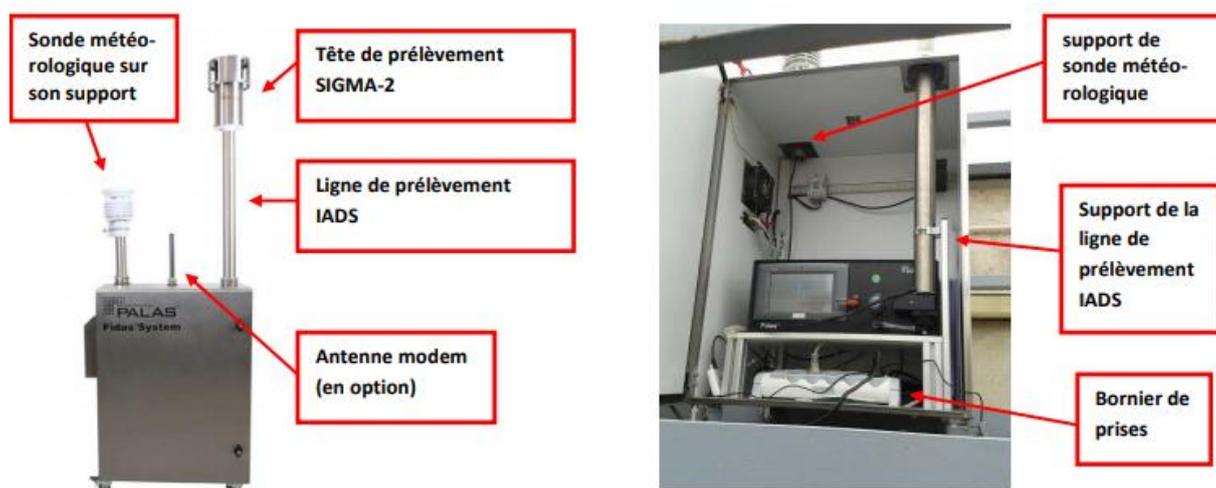


Figure 19: Schéma détaillé du FIDAS 200 équipé d'une station météorologique et d'un abri

Le FIDAS peut être mis en route, une fois la ligne IADS, la tête de prélèvement et la sonde météorologique installées.

L'accès aux différents menus se fait à partir de l'écran principal, à l'aide de l'écran tactile en façade du FIDAS.

Pour arrêter correctement le FIDAS, il convient d'utiliser d'abord le bouton rouge « SHUT DOWN » disponible sur l'écran principal dont un aperçu est donné sur la figure ci-après. Lorsque l'écran s'éteint et que sa LED passe du vert au rouge, il est possible d'éteindre le FIDAS avec l'interrupteur situé en façade arrière.

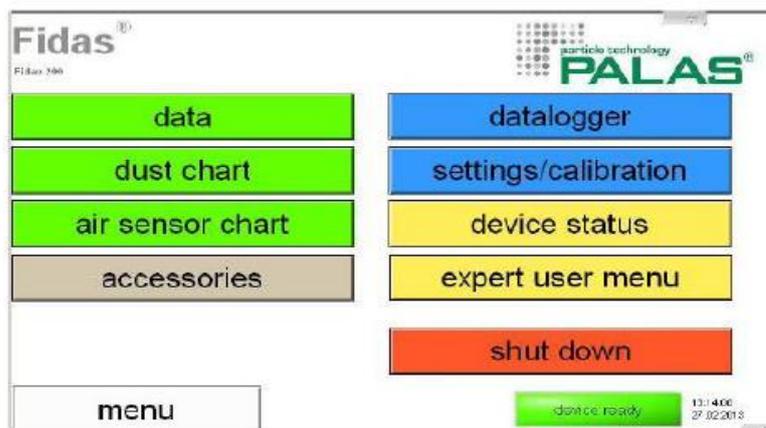


Figure 20: Vue de l'écran principal du FIDAS

3.3.2 Le principe de fonctionnement :

Le granulomètre optique FIDAS 200 est basé sur la détection de la lumière diffusée par les aérosols pour déterminer leur taille et leur nombre par classe de taille. Les étapes de détection de ces particules par le FIDAS 200 sont illustrées dans la figure III.19

Le FIDAS 200 présente les avantages uniques suivants:

- Grande résolution de la distribution en taille ;
- Bonne précision de la classification ;
- Excellente efficacité de comptage.

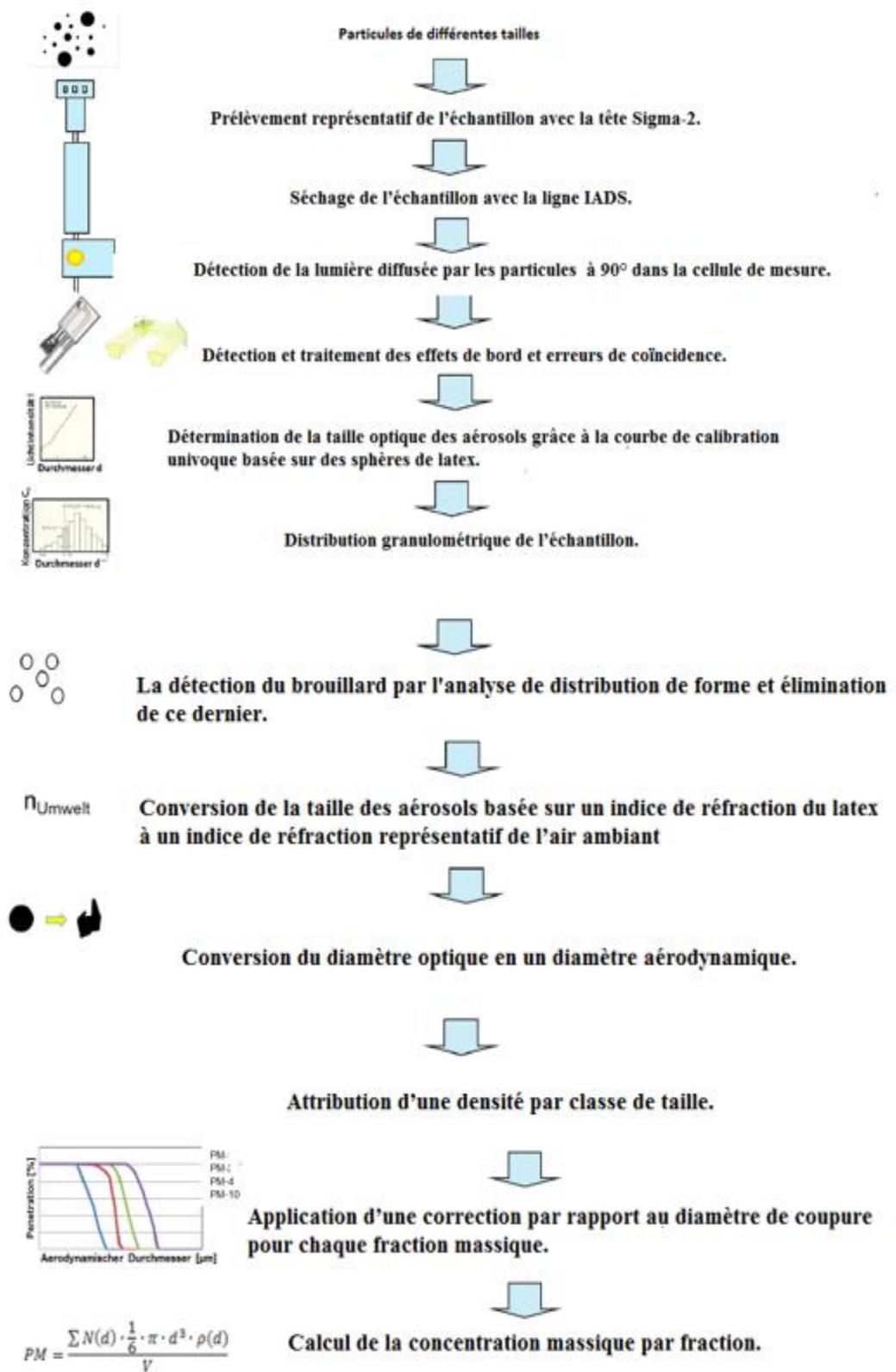


Figure 21: Les étapes de détection des particules par le FIDAS 200

3.4 Analyse de la qualité de l'air du site semi-urbain Ben Aknoun et l'influence de la poussière sur les PV

3.4.1 présentation du site semi-urbain de Ben Aknoun

La commune de Ben Aknoun est située à l'ouest de la wilaya d'Alger et à environ 7 km à l'ouest du centre-ville d'Alger, avec une population de 75 541 habitants (en 2008). Les données géographiques ainsi que la photo satellite relative au site sont obtenues grâce à Google Maps. Le site de mesure est situé Au cœur de l'ensemble universitaire autour du grand ensemble de l'ex-Université Alger au chemin Doudou Mokhtar à une latitude de $36^{\circ} 44' 45.50''$ N et une longitude de $3^{\circ} 00' 47''$ E.

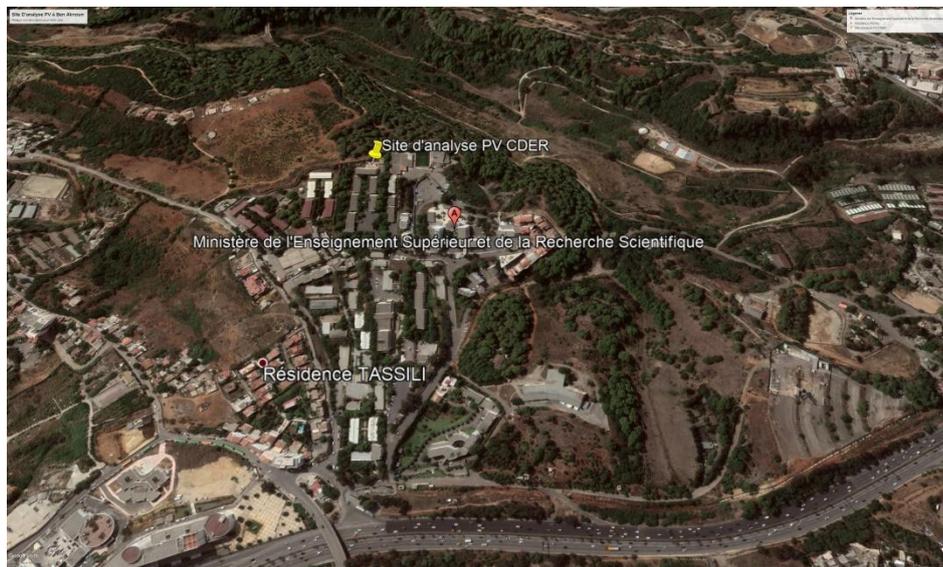


Figure 22: Carte satellite du site de mesure de Ben Aknoun

La carte ci-dessus montre que le site d'analyse de Ben Aknoun est un site semi-urbain avec une surface importante des espaces verts.

La pollution dans ce site est due principalement au trafic routier de la région notamment de la route nationale N°5 situé au nord à environ 300 m.

3.4.2 Mode opératoire

Dans cette expérience nous avons utilisé deux modules PV de type poly-cristallin avec les mêmes caractéristiques et d'une puissance de 150w. Le générateur PV utilisé dans notre travail a été divisé en deux groupes : module PV(A) nettoyé et le second PV (B) non nettoyé. Les

deux modules sont représentés dans la figure.

Notre étude a été effectuée durant la période du 14 juin 2021 jusqu'au 26 juin 2021 dans le site semi-urbain de Ben Aknoun. le module PV(A) est nettoyée chaque matin quant au second module PV(B) il reste non nettoyé durant toute la période expérimentale.



Figure 23:les deux modules PV nettoyé(A) et non nettoyé (B)

On nettoie le panneau solaire (A) avec un chiffon et de l'eau déminéralisée

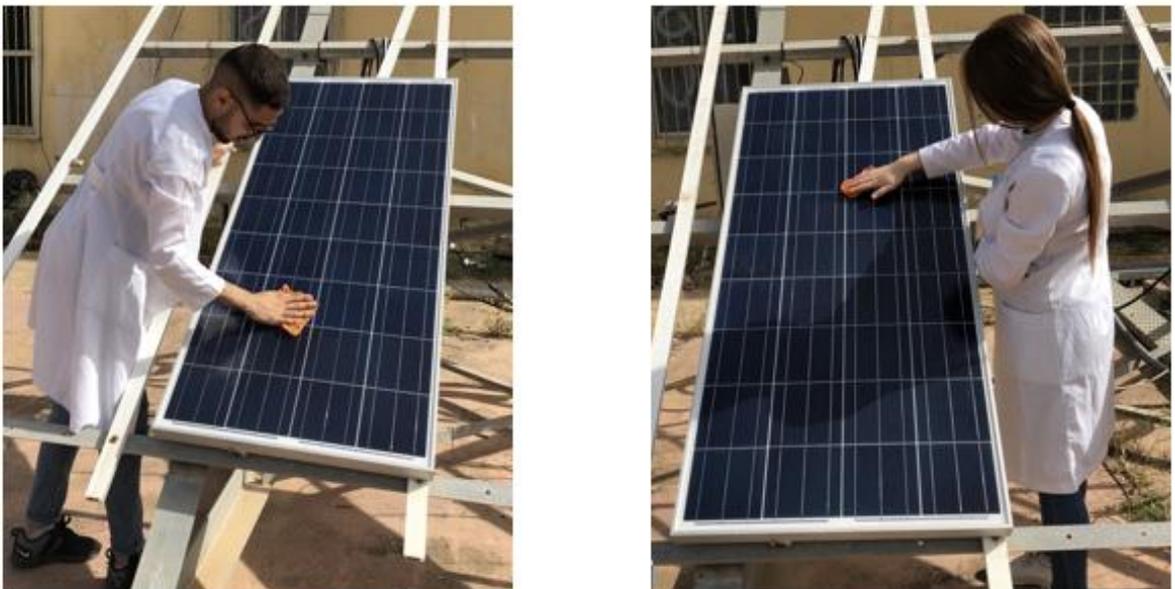


Figure 24:nettoyage quotidien du panneau solaire (A)

On mesure l'irradiation solaire et la puissance grâce à l'équipement Agilent N3300A Keysight fourni par le CDER chaque jour de 5h jusqu'à 20h tout au long de la période expérimentale.



Figure 25:l'équipement Agilent N3300A Keysight

Durant cette expérience, on évalue les concentrations des particules fines présente dans l'air dans le site de Ben Aknoun, grâce à l'équipement LifeBasis Air Quality chaque les 5min pour une période allant du 14juin 2021 jusqu'au 24 juin 2021 à fin de voir l'impact de ces dernières sur les panneaux solaires.

3.4.3 Présentation de l'appareil portatif :



Figure 26: image de l'appareil de qualité d'air LifeBasis Air Quality Detector.

L'équipement utilisé, **LifeBasis Air Quality Detector**, est un moniteur de qualité de l'air, qui peut fournir à l'aide des différents capteurs en temps réel et avec précision 7 types de données. (voir Fig) Le tableau suivant montre les types de données avec les champs de détection de périphérique :

Donnée	Champ de detection
PM _{2.5}	0~999 µg/m ³
PM _{1.0}	0~999 µg/m ³
PM ₁₀	0~999 µg/m ³
Formaldéhydes HCHO	0~1.999 mg/m ³
Composés Organiques Volatiles COV	0~9.999 mg/m ³
Température	-20~70 °C
Humidité	20~90 %

Tableau 6: Types de données et limites de détection

Cet appareil peut également utiliser la teneur en $PM_{2.5}$ comme facteur limitant pour fournir un indice décrivant la qualité de l'air : AQI (Air Quality Index/grade). Le tableau suivant donne le niveau de qualité de l'air en fonction de la teneur en $PM_{2.5}$

Niveau de qualité de l'air AQI	$PM_{2.5}$ (Valeur moyenne $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Excellent	0~35
Good	35~75
Slight pollution (légère)	75~115
Moderate pollution (modérée)	115~150
Severe pollution (grave)	150~250
Serious pollution (dangereuse)	>500

Tableau 7:le niveau de qualité de l'air en fonction de la teneur en $PM_{2.5}$

3.4.4 Mode d'utilisation du détecteur de qualité de l'air LifeBasis pour obtenir des données

- ✓ On allume l'appareil en appuyant sur le bouton d'alimentation pendant 3 secondes.
- ✓ On place l'appareil dans l'espace de détection, loin des parfums, de la peinture, des cigarettes (en raison de la haute sensibilité des capteurs) et à 80-150 cm du sol.
- ✓ Pour que les données soient stables et précises, on doit attendre 5 à 10 minutes avant d'extraire les valeurs.

Partie 3

Résultats et discussions

4 Etude de la pollution de l'air par les particules

4.1 Traitement des données de l'analyseur de particules FIDAS200

Les données sont obtenues à partir de l'analyseur FIDAS 200 pour une période de deux mois, du 31 mai 2019 au 30 juin 2019 avec un prélèvement chaque heure.

L'analyseur FIDAS 200 nous permet d'avoir les teneurs de 4 classes granulométriques de particules ($PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, $PM_{4.0}$, PM_{10}) ainsi que les particules totales en suspension TSP.

Dans cette partie, nous allons suivre l'évolution des différentes classes de particules et expliquer les profils de variation de ces dernières. Les valeurs journalières qui présentent une variation non-ordinaire vont être traitées séparément et plus profondément à l'aide des différentes modélisations atmosphérique.

4.1.1 Teneurs des particules ambiantes dans l'atmosphère

Nous allons d'abord calculer les paramètres mathématiques essentiels pour comprendre le comportement des variables étudiées. Ces paramètres sont :

Les moyennes, les extrémums et l'écart-type (journaliers). Les valeurs de ces variables sont données dans le tableau suivant :

PM_i ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	maximum	minimum	moyenne	Ecart-type
$PM_{1.0}$	20.798	4.132	8.998	3.677
$PM_{2.5}$	25.137	5.819	12.037	4.039
$PM_{4.0}$	37.304	11.189	20.234	5.470
PM_{10}	49.227	12.416	27.280	7.154
TSP	64.458	13.530	36.662	10.486

Tableau 8: Valeurs journalières des PM_i remarquables

A partir du tableau on remarque, que la valeur de l'écart-type augmente avec l'augmentation du diamètre aérodynamique des particules {3.667 ; 4.039 ; 5.470 ; 7.154 ; 10.486}, pour les $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, $PM_{4.0}$, PM_{10} , TSP respectivement, ce qui implique l'augmentation de la dispersion des valeurs (les différences entre les moyennes journalières plus importantes).

Le domaine de variation des teneurs en particules est relativement large, car il existe une différence importante entre les valeurs extrêmes de chaque classe de particules.

Les figures ci-dessous représente les variations des moyennes journalières des PM_i (1.0, 2.5, 4.0, 10) et les TSP en mois de Juin 2019 :

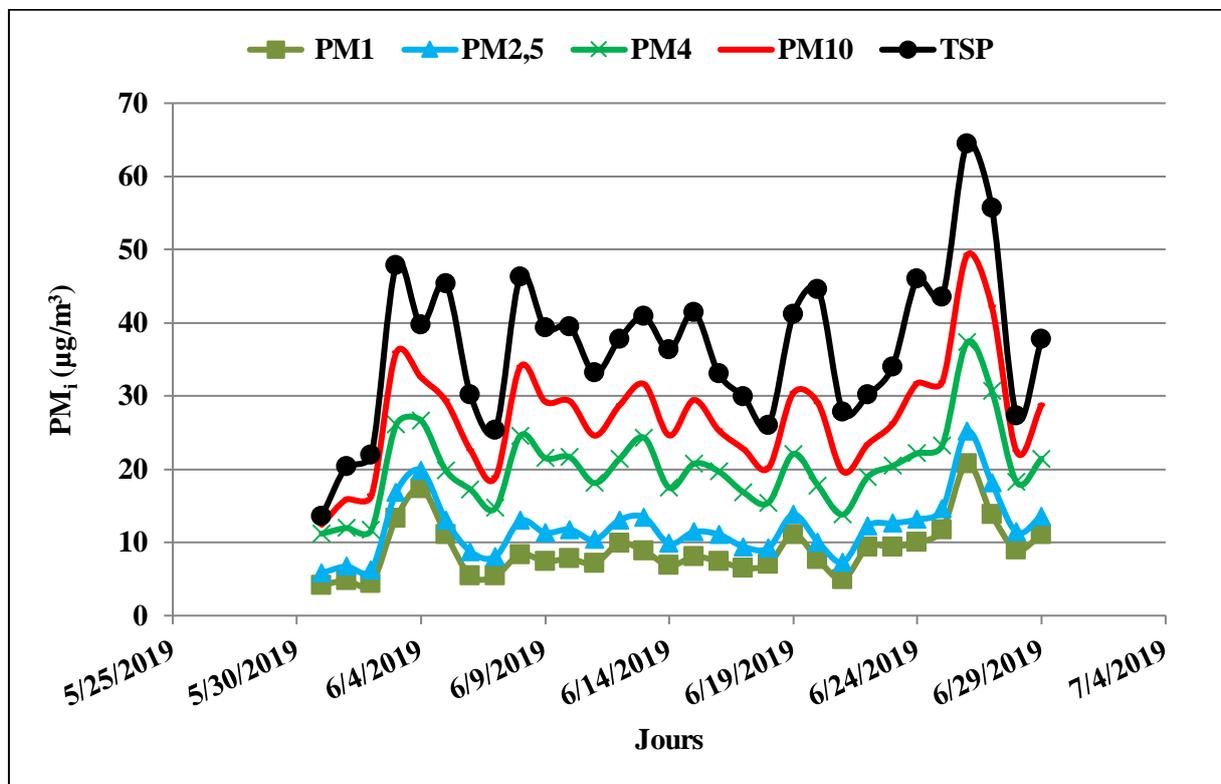


Figure 27: Evolution des moyennes journalières des concentrations des PM_i mesurées en Juin 2019

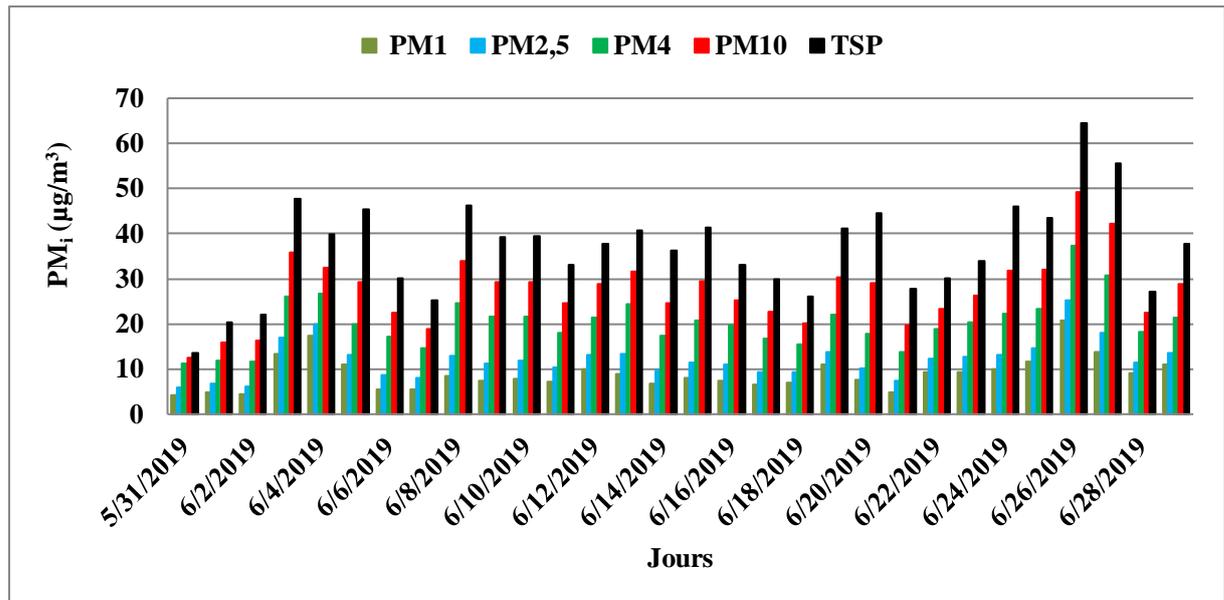


Figure 28: Evolution des moyennes journalières des concentrations des PMi mesurées en Juin 2019

Nous remarquons dans les figures ci-dessus des fluctuations dans les moyennes journalières des teneurs en PM_i, allant de {4.132 ; 5.819 ; 11.189 ; 12.416 ; 13.530 µg/m³} jusqu'à {20.798 ; 25.137 ; 37.304 ; 49.227 ; 64.458 µg/m³} pour les PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM_{4.0}, PM₁₀, TSP_{al} respectivement.

Nous observons aussi que l'ensemble des classes granulométriques présente le même profil de variation, ce qui suggère l'existence d'une relation entre elles (mêmes sources d'émission).

La fluctuation des teneurs mesurées peut s'expliquer par des nombreux facteurs notamment la quantité de polluants atmosphériques rejetés par les différentes sources naturelles (érosion, vents de sables, sels marins, etc...), ou anthropiques (trafic routier, industrie...) ; la proximité des sources et les conditions météorologiques, telles que la température de l'air; la stabilité de l'air et la vitesse et la direction du vent.

On a observé des faibles teneurs mesurées lors de la première semaine du mois juin le 01 juin (4,813918 ; 6,72749 ; 11,961523 ; 15,881252 ; 20,379618 µg/m³), 02 juin (4,341451 ; 6,234069 ; 11,710513 ; 16,36121 ; 21,959698 µg/m³), 07 juin (10,3036453 ; 5,430552 ; 8,060706 ; 14,657559 ; 18,867886 ; 25,310753 µg/m³), et des autres jours du mois, le 18 juin (7,051464 ; 9,241259 ; 15,433637 ; 20,172428 ; 26,029544 µg/m³), 28 juin (9,02152 ; 11,386097 ; 18,20977 ; 22,375617 ; 27,210426 µg/m³), pour les PM_{1.0}, PM_{2.5}, PM_{4.0},

PM₁₀, TSP respectivement, où les teneurs atteignent des valeurs minimales.

Les raisons possibles de ce déclin peuvent être les conditions climatiques de la journée, comme la présence du vent balayant la région car quand sa vitesse augmente, les particules sont mieux dispersées dans l'atmosphère et par conséquent les teneurs régionales en particules diminueront. Les précipitations peuvent aussi entraîner cette diminution car l'eau qui tombe va interagir avec les polluants présents lors de sa chute et ainsi les transformer ou les déposer au sol. Le lessivage du ciel induit alors la diminution des moyennes journalières des poussières.

Mais en consultant les bulletins météorologiques du mois de juin, nous avons remarqué que les conditions météorologiques étaient normales, la vitesse du vent était relativement faible avec de faibles précipitations.

Donc, on peut conclure que ces diminutions sont dues à d'autres facteurs, notamment la quantité des émissions atmosphériques principalement par le parc automobile (Alger centre, c'est la région la plus dense en Algérie). en effet le 1 et 2 juin, coïncident aux derniers jours du Ramadan, et il est connu que le trafic routier diminue durant ce mois et les activités humaines sont moins intenses.

Le 7 juin correspond au 3^{ème} jour après la fête d'Eid-El Fitr. Les variations de les moyennes horaires de cette journée sont représentées dans ce graphe ci-dessous :

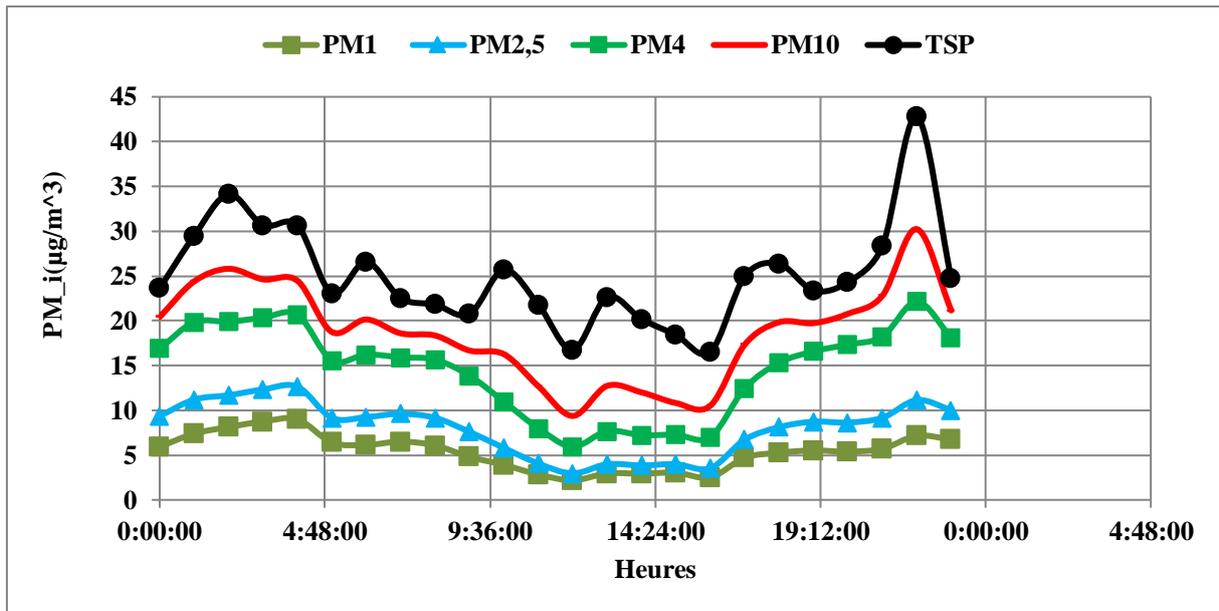


Figure 29: L'évolution des concentrations horaires des PMi pour le 07 juin 2019.

Pendant les jours du 5, 8, 20 et 24 juin, les teneurs en TSP sont très élevés atteignant 45,32 ; 46,24 ; 44,55 et 45,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le suivi des bulletins météorologiques a indiqué que ces journées étaient ensoleillées caractérisées par une stabilité de l'atmosphère (faible vitesse du vent) avec de faibles précipitations voire même nulles. Cette situation peut être due probablement à un trafic routier et à des activités humaines plus intenses ce qui a engendré un niveau élevé en TSP.

Il est intéressant d'examiner les cas spéciaux des journées du 3 et 26 juin, où les teneurs en TSP atteignent les valeurs les plus élevées. Caractérisées par des concentrations relativement élevées en TSP variant entre 47,81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et 64,45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

- **Le 26 juin 2019**

La journée du 26 juin a enregistré le pic le plus élevé du mois de juin et pour mieux comprendre cela, nous allons suivre l'évolution des moyennes horaires de cette journée (figure ci-dessous).

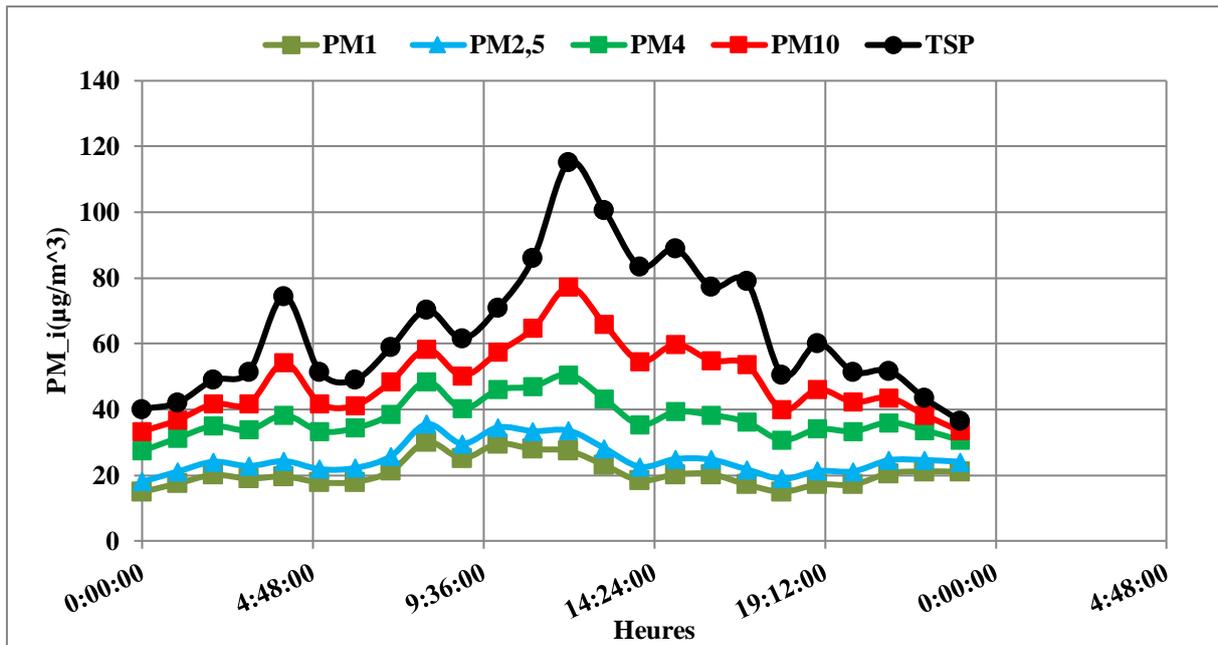


Figure 30: L'évolution des concentrations horaires des PM_i pour le 26 juin 2019.

Nous observons que le 26 juin 2019 a enregistré des moyennes horaires des PM_i très élevées avec des pics horaires atteignant 115, 77, 50, 35 et 30 µg/m³ pour les TSP, PM₁₀, PM_{4,0}, PM_{2,5} et PM_{1,0} respectivement.

On observe des pics bien marqué apparaissant le matin à l'heure de pointe 8h-9h et le soir 16h-17h, cependant durant la période 12h-13h le pic de concentrations en PM₁₀ atteint la valeur la plus élevé de la journée (77,28 µg/m³) à cause de la circulation des voitures qui engendre des émissions de particules qui est la source principal de la pollution dans ce site urbain.

Hors jours de pollution, le nombre de particules est faible durant la nuit à cause de l'arrêt de toute activité anthropique. Néanmoins on observe des fortes teneurs en PM_i {19,56 ; 24,25 ; 38,25 ; 54,1 ; 74,36 µg/m³} pour les PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM_{4,0}, PM₁₀, TSP respectivement, durant la période 4h-5h

Pour déterminer les source de ces moyennes horaire très élevée nous avons élaborée une carte des sources des masses d'air en utilisant le modèle Hysplit (figure). La carte Hysplit montre que les vents prédominants à Alger à 12h étaient du sud-est et venant du grand Sahara (sud de l'atlas du Maroc) ceci explique la concentration élevée des teneurs en PM_i.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 1200 UTC 26 Jun 19
 GDAS Meteorological Data

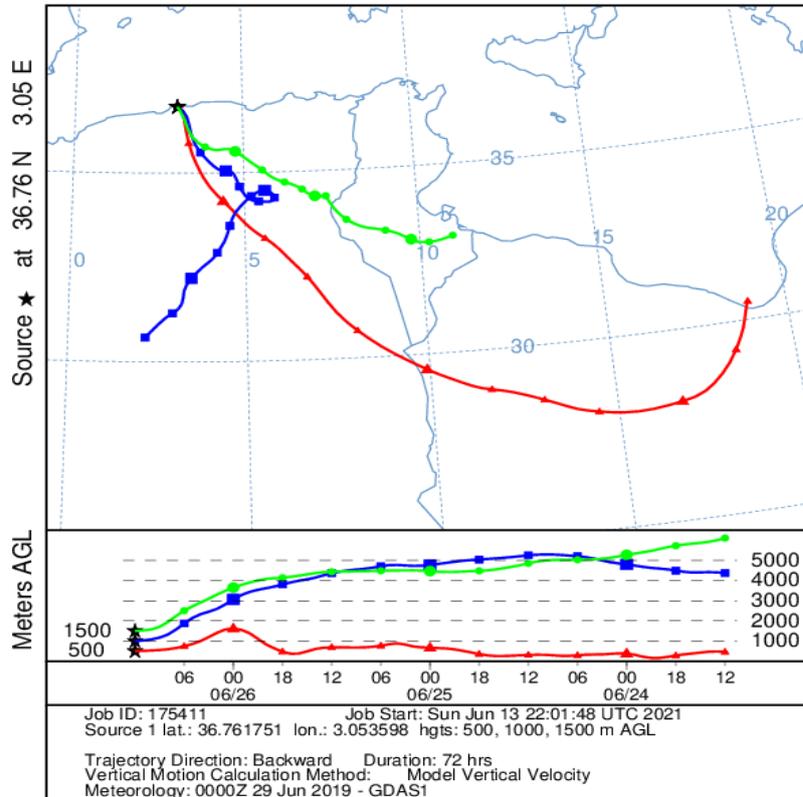


Figure 31:Rétro trajectoires des masses d’air venant du sud-est

Dans le but de confirmer les niveaux des aérosols dans l’air durant le jour du 26 juin 2019, nous avons élaborée deux cartes de modélisation de la présence de poussières, une par le Centre de Prévisions de Poussière de Barcelone (figure) et l’autre par le modèle MODIS qui montrent la présence d’un nuage de poussières dans le nord d’Algerie et dans le grand Sahara et confirment le résultats mesurés.

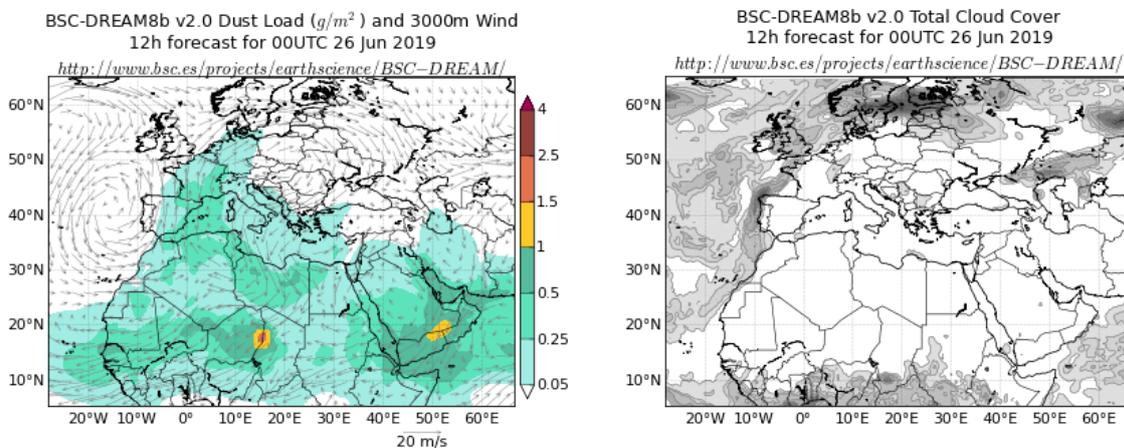


Figure 32:Concentrations de poussières de sable modélisées pour la date du 26/06/2019 à 12h

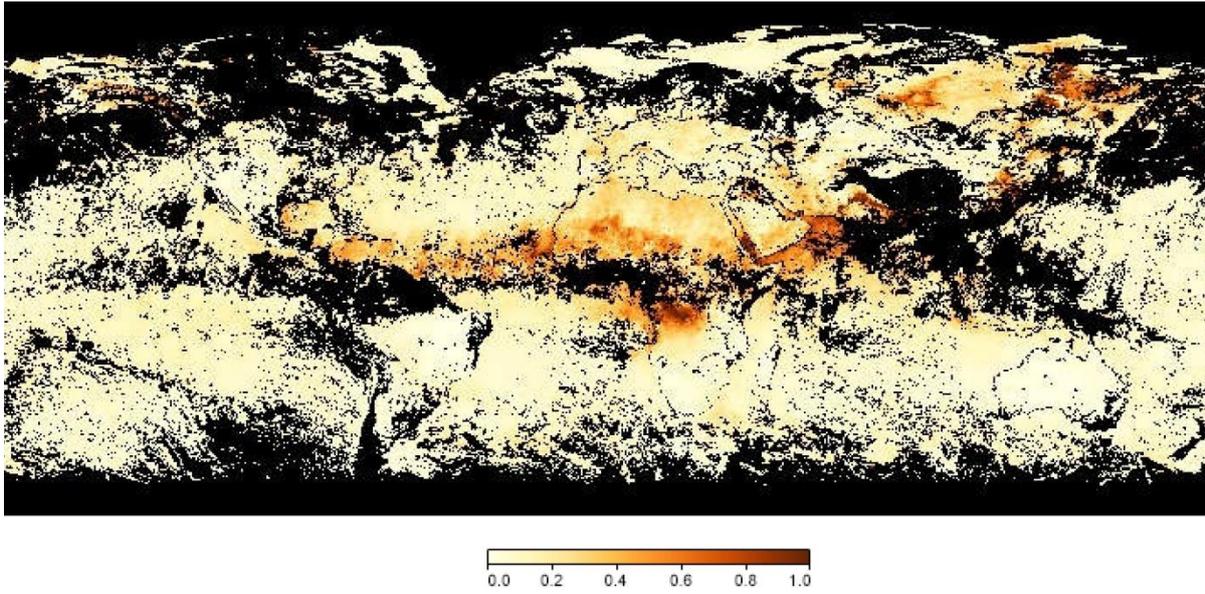


Figure 33: Carte MODIS 26 juin 2019

- Le 04 juin 2019

On établit le graphe des variations des moyennes horaires du 4 juin 2019

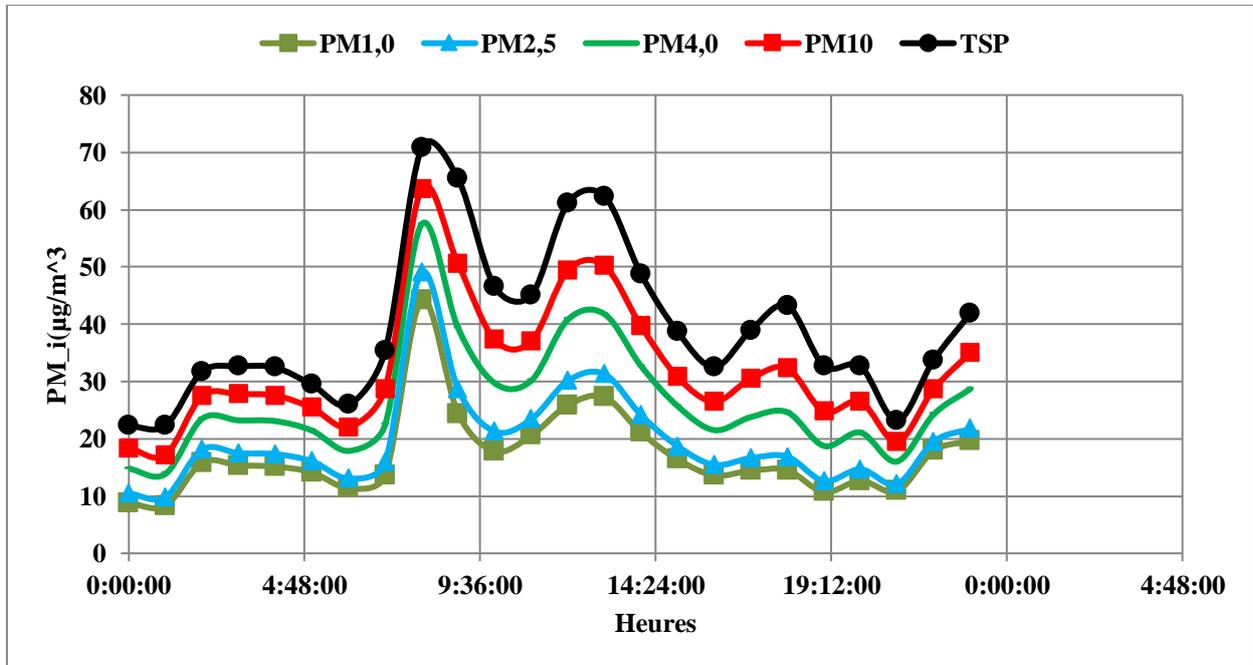


Figure 34: L'évolution des concentrations horaires des PMi 04 juin 2019.

On observe un pic intense apparaissant le matin à l'heure de pointe 8h-9h avec une teneur en PM_{10} de $70,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à cause du territoire urbain vaste et aux déplacements plus nombreux, plus longs et majoritairement effectués à l'aide de transports motorisés individuels notamment le matin ou la majorité des personnes se rendent à leur lieu de travail, ce qui provoque mécaniquement une augmentation de la consommation énergétique Cette dépense accrue en énergie fossile génère une plus grande pollution de l'air .

On observe aussi un pic à 12h-13h, lié à l'activité économique aux alentours du site de mesure : trajet « travail – domicile ».

En dehors de ces intervalles, on a une pollution de fond vu que c'est un site urbain.

4.1.2 Influence des facteurs météorologiques sur les teneurs enregistrées :

Les données météorologiques sont essentielles pour analyser et mieux comprendre les variations des concentrations et la composition des polluants, car elles conditionnent l'accumulation, la dispersion ou l'entraînement des polluants par lessivage. Le tableau suivant montre les variations des teneurs en particules totales TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) et les paramètres météorologiques enregistrées durant la période de prélèvement (juin 2019) :

Date	C _n [P/cm ³]	TSP (µg/m ³)	Vent(km/h)	Humidité(%)	Précipitation (mm)	Température maximale (°C)	Température minimale (°C)
31/05/2019	101,1721	13,5307	19	54	0	22	18
01/06/2019	104,0651	20,37962	19	47	0	24	21
02/06/2019	92,83151	21,9597	15	48	0	25	29
03/06/2019	353,3788	47,81427	12	53	0	30	26
04/06/2019	505,7372	39,76795	12	49	0	25	22
05/06/2019	314,9928	45,32469	22	43	0	28	26
06/06/2019	90,10395	30,11309	16	54	1	25	22
07/06/2019	103,0365	25,31075	13	59	1	27	22
08/06/2019	162,5229	46,24609	19	66	2	25	22
09/06/2019	150,0982	39,33037	18	73	1	24	21
10/06/2019	157,3799	39,4541	13	58	0	26	23
11/06/2019	152,0447	33,1452	13	62	0	26	22
12/06/2019	251,335	37,80512	18	53	0	26	24
13/06/2019	183,0527	40,81747	11	47	0	41	29
14/06/2019	152,97	36,25639	20	73	0	27	22
15/06/2019	179,9662	41,39781	14	67	0	25	23
16/06/2019	154,1519	33,02273	21	67	1	24	22
17/06/2019	148,3705	29,87934	15	78	6	24	20
18/06/2019	187,235	26,02954	10	60	0	29	25
19/06/2019	296,3692	41,19801	12	74	1	28	24
20/06/2019	194,7687	44,55809	12	59	1	27	24
21/06/2019	104,8399	27,78694	13	58	0	26	23
22/06/2019	245,5866	30,15131	19	70	0	25	23
23/06/2019	239,485	34,00447	14	59	0	30	27
24/06/2019	262,6292	45,99614	12	63	0	29	25
25/06/2019	303,3886	43,5175	13	65	0	29	27
26/06/2019	406,2732	64,45823	12	53	0	31	30
27/06/2019	293,9664	55,64443	13	44	0	32	31
28/06/2019	245,4913	27,21043	19	39	0	31	30
29/06/2019	316,7512	37,73747	14	39	0	33	30

Tableau 9: Variations des teneurs en particules totales TSP (µg/m³) et paramètres météorologiques enregistrées durant la période de prélèvement (juin 2019)

L'examen du tableau IV.8 permet de constater que les pics des TSP sont enregistrés durant les 03, 26 et 27 juin avec des concentrations respectives : 47.81, 64.46 et 55.64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ces niveaux correspondent à l'absence de précipitation, généralement pendant les périodes chaudes qui engendrent des températures élevées (30, 31 et 32 °C respectivement) et à l'occurrence des vents de vitesses relativement faibles (12, 12, 13 km/h respectivement), en effet ces vents sont susceptibles d'entraîner facilement, par remise en suspension, des poussières de sol vers le poste de mesure, mais pas assez fort pour faire un balayage de la région.

En outre, on constate l'existence de 3 tendances dans cette période de mesure. La période s'étalant du 31/05/19 au 03/06/19 est caractérisé par des concentrations relativement faibles variant entre 13.5 et 21.96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La moyenne des concentrations enregistrées durant cette première période est de 18.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. On peut attribuer ce faible niveau des TSP aux précipitations et humidités enregistrés. Le lessivage de l'atmosphère par les précipitations et la mouillabilité du sol empêchant la resuspension des poussières peuvent expliquer ces teneurs des TSP.

Une augmentation brutale des concentrations est ensuite observée à partir du 24/06/2019, Cette période est printanière et estivale caractérisée par une température élevée. La moyenne observée durant cette deuxième période est de 52.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A partir du 27/0/19, on remarque du nouveau une diminution des concentrations en TSP. Généralement, les concentrations minimales sont associées aux week-ends ou sont attribuables à des conditions météorologiques particulières telles que les précipitations, l'humidité et les vitesses de vents.

Les paramètres météorologiques qui influent sur la dispersion des polluants sont la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique, le taux d'humidité, la température ainsi que les précipitations. Le changement des paramètres physiques de l'air conduit à la modification de sa densité. Un taux plus élevé de l'humidité influe sensiblement sur l'augmentation de la densité de l'air qui gêne la dispersion des particules en suspensions porteuses des polluants d'origines naturelles et anthropiques. Le vent constitue un moyen important dans le transport et la dispersion des polluants, cette dispersion dépend de la vitesse et la direction du vent, ainsi si le vent est très faible (calme), la dispersion est très limitée, dans le cas de fortes vitesses, la dispersion est importante. La position du site de prélèvement par rapport à la direction du vent et la source émettrice des polluants est importante, en effet on ne peut rien collecter si le vent chasse les polluants loin du dispositif d'analyse. La période de qui s'est

étalée du 31/05/2019 au 29/06/2019 a été caractérisée par :

- Une humidité relative moyennement élevée avec des valeurs comprises entre 39% et 78% (la moyenne est de l'ordre de 57.8 %).
- Une température saisonnière relativement élevée variant entre 18 °C et 33 °C.
- Un manque de précipitation, la plupart du temps sec (pas d'effet de lessivage de l'atmosphère).
- Des vents à vitesses moyennes durant cette période de prélèvement avec des vitesses allant de 10 km/h à 22 km/h avec une moyenne de 15 km/h (phénomène de remise en suspension des particules déposées sur le sol).

Ces conditions sont à l'origine des concentrations enregistrées. Les corrélations entre les TSP et les paramètres météorologiques sont illustrés dans les graphes ci-dessous :

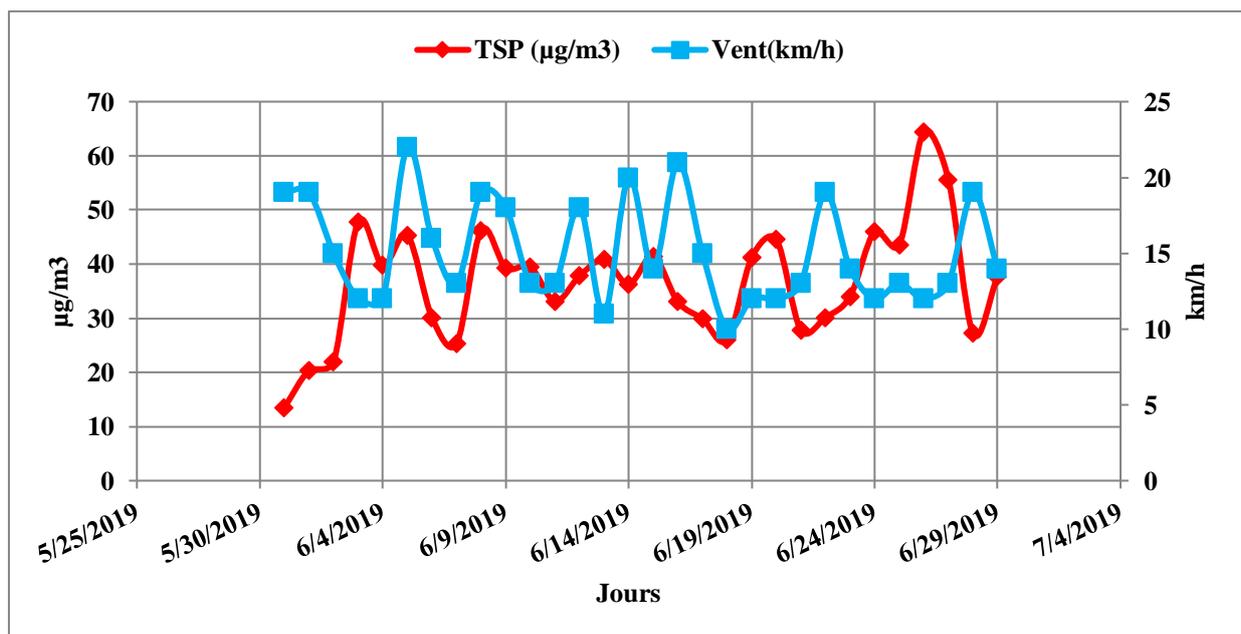


Figure 35: Les variations des teneurs TSP en fonction de vitesse du vent

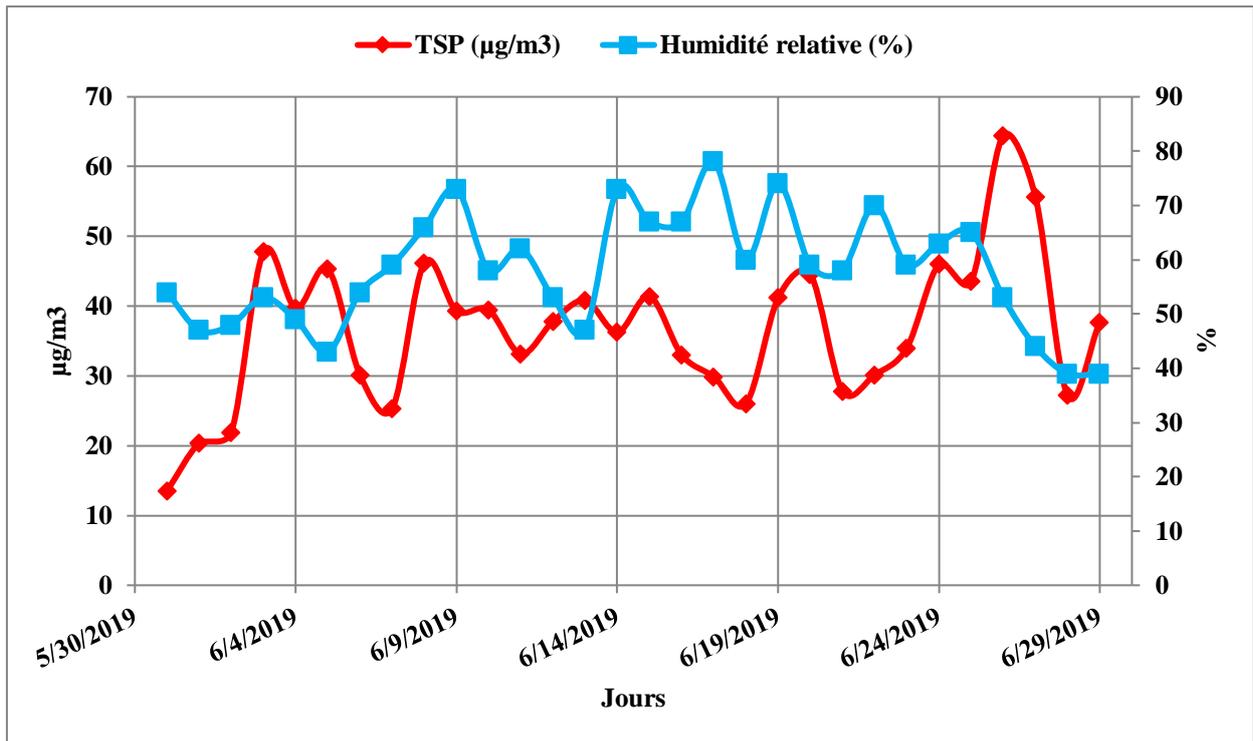


Figure 36: Les variations des teneurs TSP en fonction de l'humidité relative

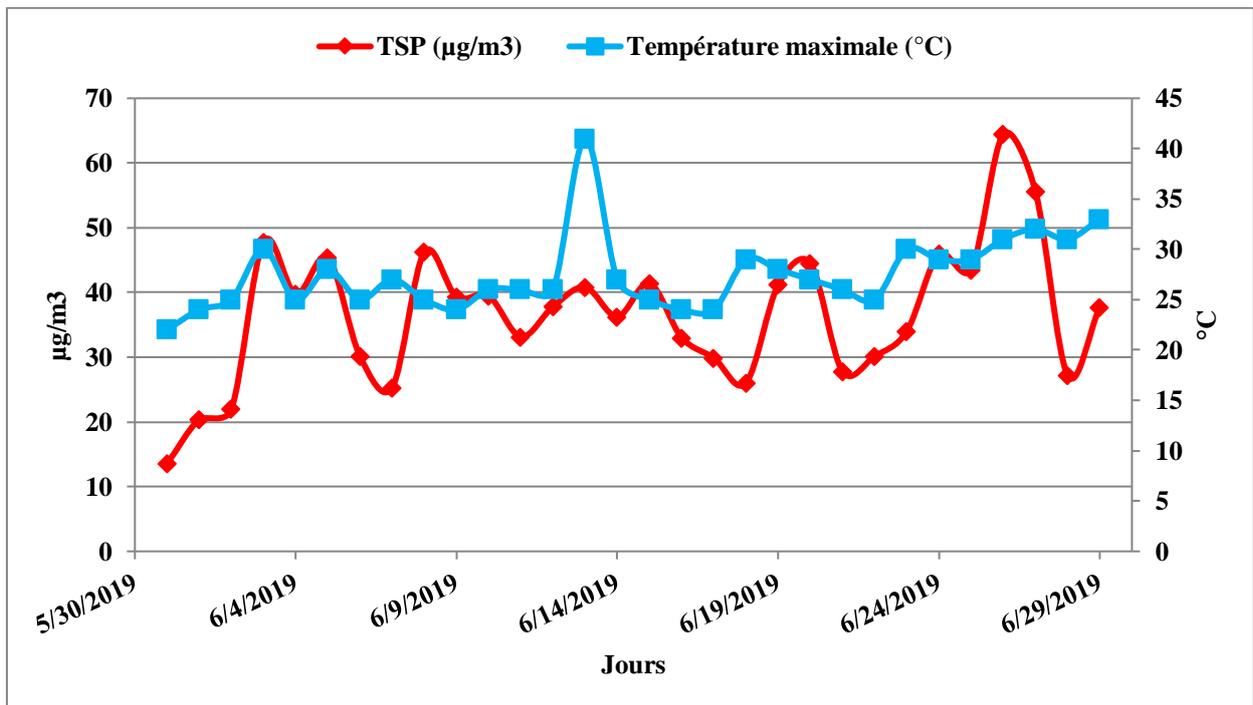


Figure 37: Les variations des teneurs TSP en fonction de la température

En observant ces graphes, on ne peut pas établir une relation directe entre chacun des facteurs météorologiques et le niveau de la pollution enregistré au niveau de la station de mesure, car ces derniers interagissent de façon complexe entre eux, d'une part, et avec les particules atmosphériques d'autre part.

4.1.3 La contribution du trafic routier sur le niveau de la pollution par les particules au niveau du site de prélèvement

Les émissions des véhicules sont une source importante de polluants atmosphériques, notamment le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), les composés organiques volatils (COV) ou les hydrocarbures (HC), oxydes d'azote (NO_x), et les particules en suspension (PM_i).

Il existe deux types d'émissions de PM liées à la circulation automobile : les émissions de gaz d'échappement, qui correspondent aux rejets de PM liés à la combustion du carburant dans le moteur, et les émissions hors gaz d'échappement, y compris les émissions liées au carburant. L'usure des pneus et des freins et la remise en suspension des particules fines.

Un environnement fortement urbanisé présente certaines caractéristiques qui affectent directement ou indirectement les émissions des véhicules en circulation.



Figure 38:Routes principales situées aux alentours de la station NESMA

La carte ci-dessus montre que la région qui entoure le site de prélèvement dispose d'un grand réseau routier (site fortement urbanisé), avec un nombre important de véhicules qui circulent chaque jour dans toutes les directions.

Selon les statistiques de la Direction des transports de la wilaya d'Alger, pas moins de 128000 véhicules circulent à Alger centre aux heures de pointe (7h-8h) et près de 325000 autres véhicules y entrent par les différents accès (sud, nord et ouest) ce qui provoque d'importants embouteillages aux heures d'affluence.

Pour mettre en évidence la contribution du trafic routier dans la pollution, nous allons étudier les profils journaliers des variations horaires des teneurs en PM_{10} dans 03 jours du mois 4, 22, 27 juin.

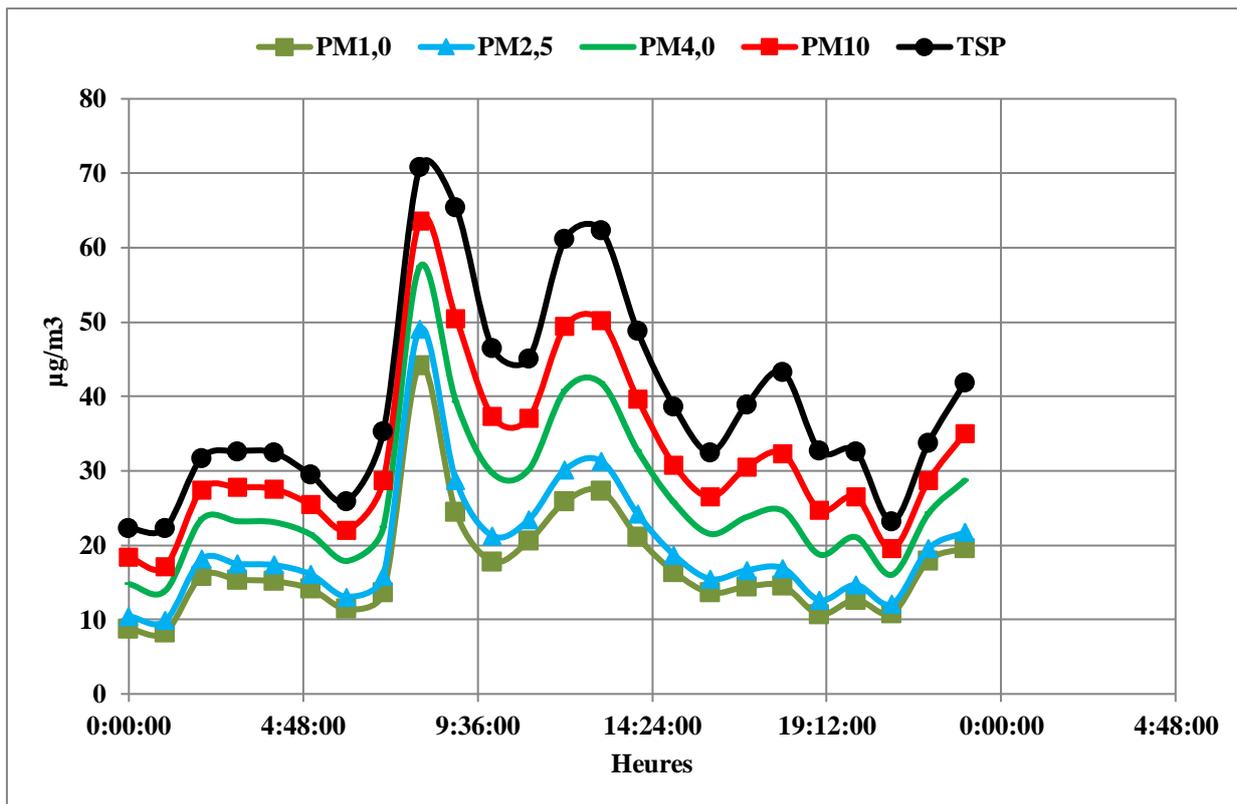


Figure 39:L'évolution des moyennes horaires des teneurs en PMi (04 juin 2019)

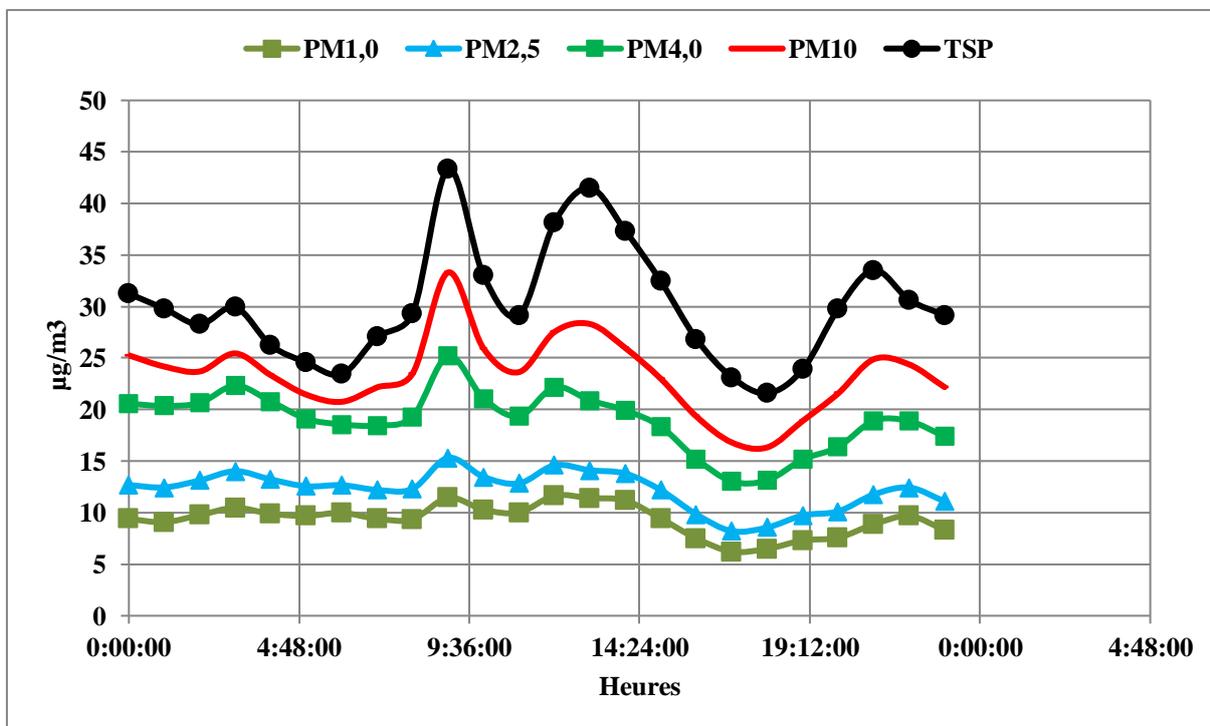


Figure 40:L'évolution des moyennes horaires des teneurs en PMi (22 juin 2019)

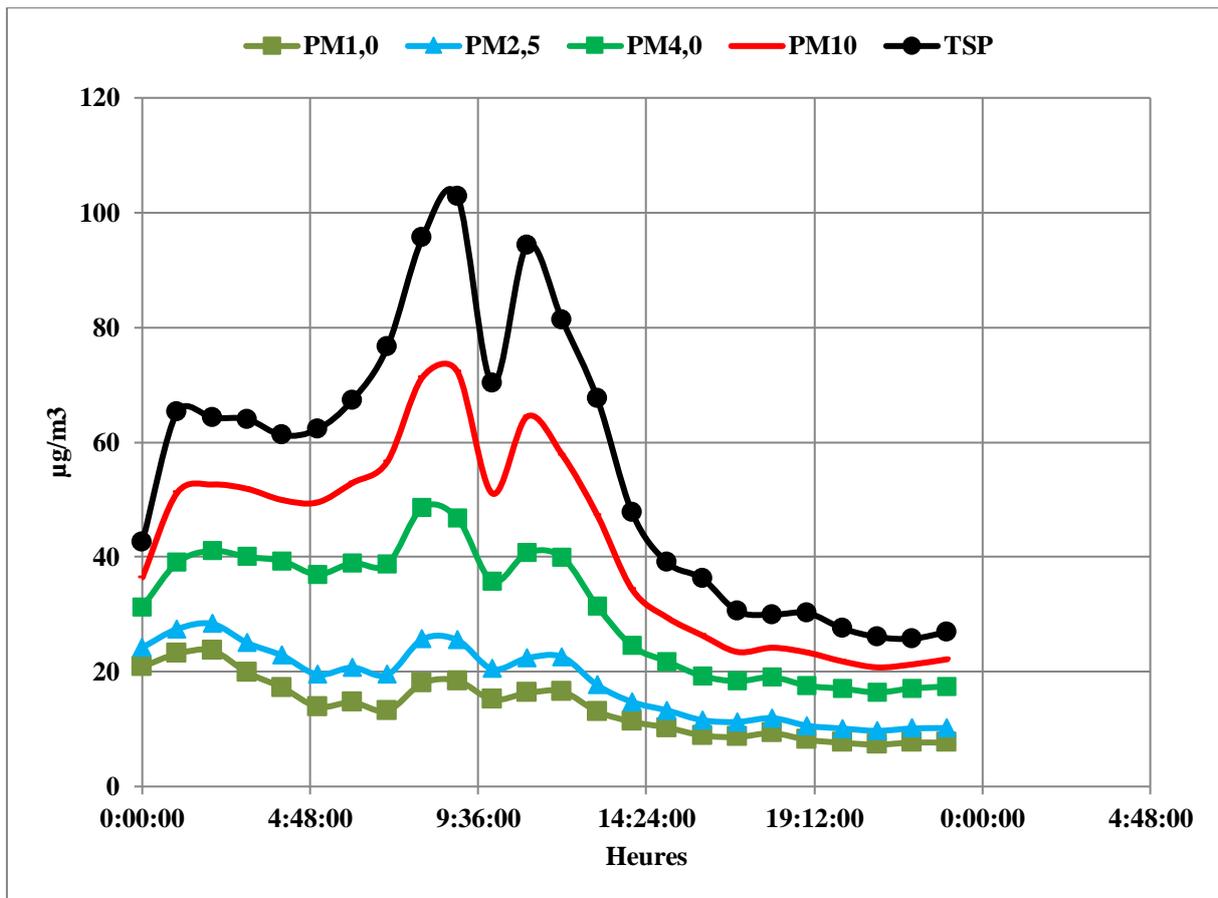


Figure 41: L'évolution des moyennes horaires des teneurs en PM_i (27 juin 2019)

Les profils journaliers des teneurs en particules (PM₁₀, PM_{4,0}, PM_{2,5} et PM_{1,0}) la présence de deux pics, où les teneurs atteignent des valeurs maximales pour la totalité de PM_i. Les pics les plus élevés de PM_i se produisent à peu près au même moment pour toute la gamme granulométrique.

Le premier pic est observé le matin entre 7:00 et 09:00, et le second pic est observé à midi entre 12:00 et 14:00, ce pic est moins important que le premier pic mais il reste plus élevé par rapport à la moyenne journalière.

Les heures de pics sont celles où l'on observe le maximum de trafic routier. Le matin, les gens se rendent à leur travail, et la journée de travail commence. Le midi, est aussi une période où le trafic est très important. Avec ces remarques, nous pouvons confirmer la contribution du trafic routier dans les niveaux élevés de pollution.

La dispersion et le dépôt des polluants d'origine automobile sont fonction de nombreux

facteurs. La quantité de polluant dispersée et déposée aux abords de la route est d'abord fonction du trafic et du parc automobile (nombre de véhicule par jour ; type de véhicule, de motorisation ; vitesse, etc.). Cette quantité varie donc dans le temps selon les pointes de trafic qu'on observe généralement à l'échelle journalière, hebdomadaire et/ou annuelle. La dispersion des polluants émis varie selon la structure du site (vallée, route en déblai, en remblai, pente, etc.) et surtout selon la météorologie. Ce qui explique la différence entre les valeurs de pics enregistrés[42].

4.2 Étude de l'impact des particules sur les panneaux solaires

4.2.1 L'influence de dépôt de poussières

Pour mettre en évidence l'effet de la poussière sur les radiations solaires et le rendement des panneaux solaires photovoltaïques, nous allons tracer les courbes de l'irradiation en fonction des jours d'exposition de la cellule sans nettoyage (du 14 au 18 juin 2021) et avec nettoyage (du 20 au 24 juin 2021), ainsi que le tracé de la puissance en fonction des jours d'exposition des modules (du 14 au 24 juin 2021).



Figure 42: cellule solaire non nettoyée

La figure 42 représente la météo du mois de juin à Alger, et le quadrillage rouge concerne les jours où notre analyse a été réalisée.



Figure 43: image de la météo du mois de juin 2021 à Alger Ben Aknoun.

La Figure 43 représente l'irradiation analysée par une cellule solaire non nettoyée. L'impact de la poussière sur cette dernière fait un effet de diminution sur l'irradiation spécialement pour les journées nuageuses et pluvieuses (du 14 au 17 juin 2021).

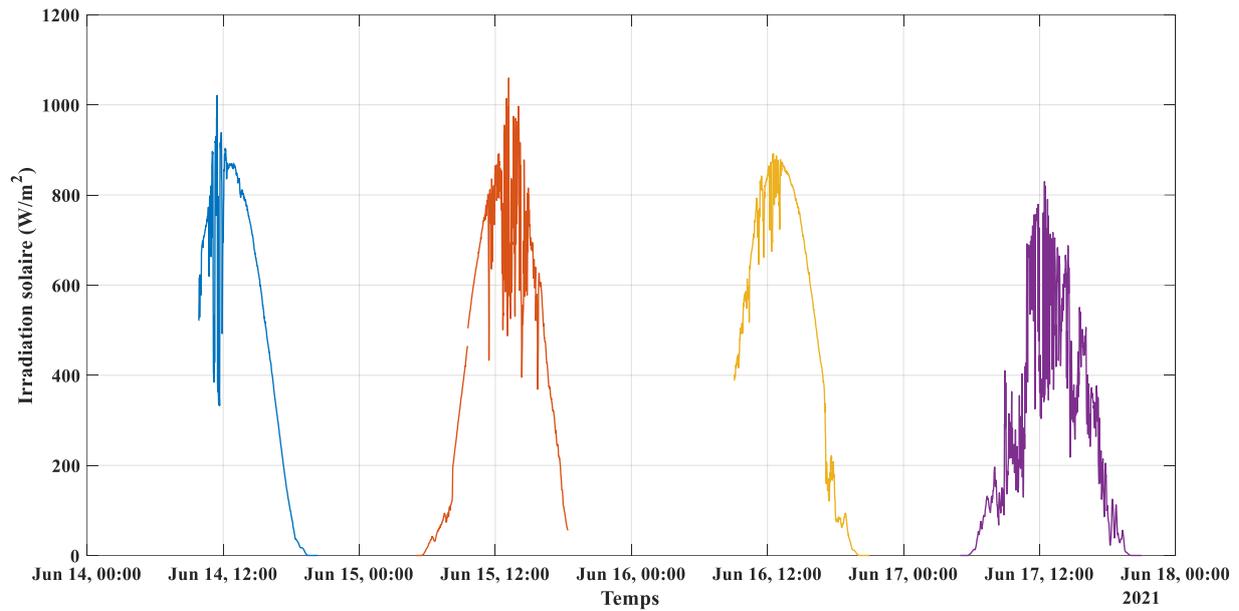


Figure 44: Analyse de l'irradiation à partir d'une cellule solaire non nettoyé

On observe que durant les 16 et 17 juin 2021 le taux de l'irradiation a fortement réduit à cause du vent fort provenant du sud algérien (vent de sable) ainsi que quelques gouttes de pluie ce qui a atténué la propagation de l'onde lumineuse contrairement aux journées du 14 et 15 juin 2021 où l'irradiation était suffisamment élevée (1010w/m² et 1030w/m² respectivement).

La Figure 44 représente l'irradiation analysé par une cellule solaire nettoyé.

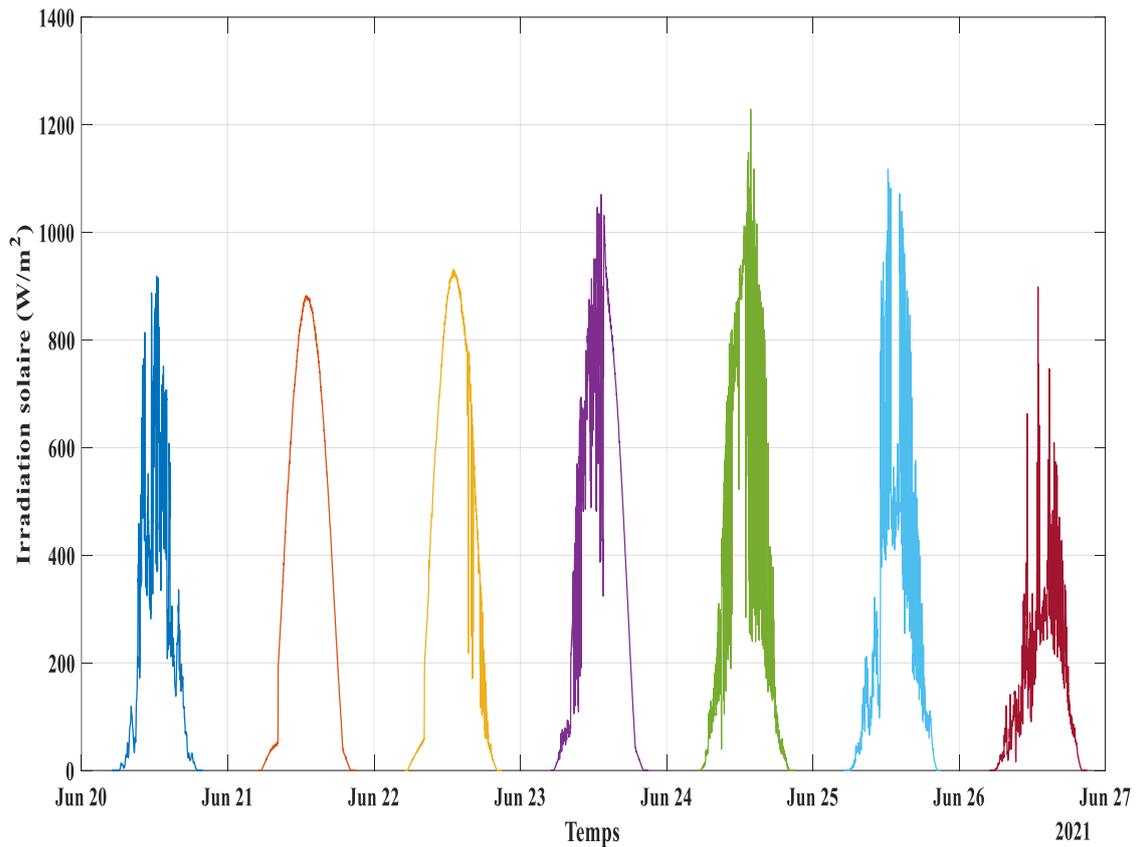


Figure 45: Analyse de l'irradiation à partir d'une cellule solaire nettoyée

Le 21 juin 2021 était une journée ensoleillée avec une faible couverture nuageuse et un vent de vitesse très faible. Ces conditions ont permis d'obtenir un graphe sans bruit.

La luminosité influence considérablement la performance des cellules, comme le montre le graphique (Figure 44) 24 juin 2021 enregistre le pic le plus élevé (la journée était ensoleillée et sans couverture nuageuse)

Le 25 juin 2021 l'irradiation était assez élevée alors que la journée était nuageuse, ceci s'explique du fait que le panneau solaire en fonctionnement utilise aussi le rayonnement diffus où les rayons sont dispersés dans les nuages et les particules de poussière et contribuent à la production photovoltaïque.

L'absence de la poussière sur la cellule solaire fait une différence remarquable sur l'irradiation. En effet d'après les deux graphes le rayonnement solaire a subit une atténuation marquée sous l'effet des polluants par contre quand l'atmosphère est chargée de gouttelettes d'eau ou de poussières la composante diffuse augmente ceci explique les résultats obtenus.

Les figures 45 et 46 représentent respectivement l'analyse monitoring d'un module PV à l'état propre et à l'état avec une quantité de poussière sur la surface.

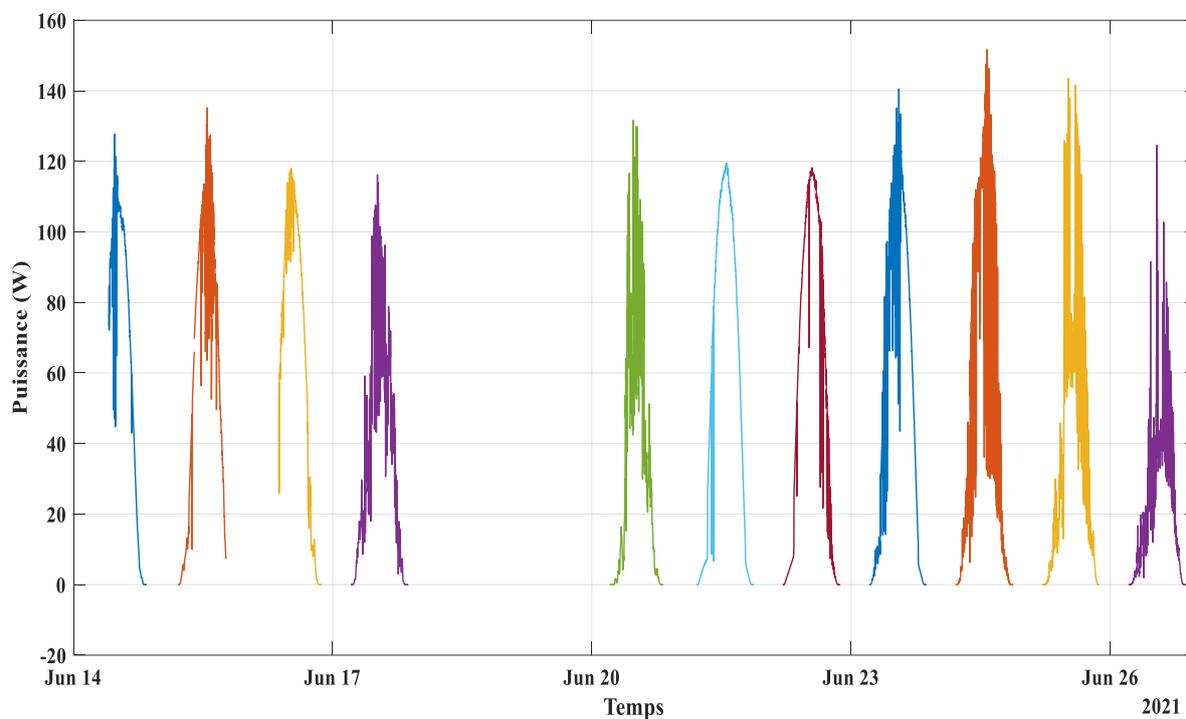


Figure 46: Analyse de la Puissance (W) d'un module PV (A) nettoyé en fonction du temps

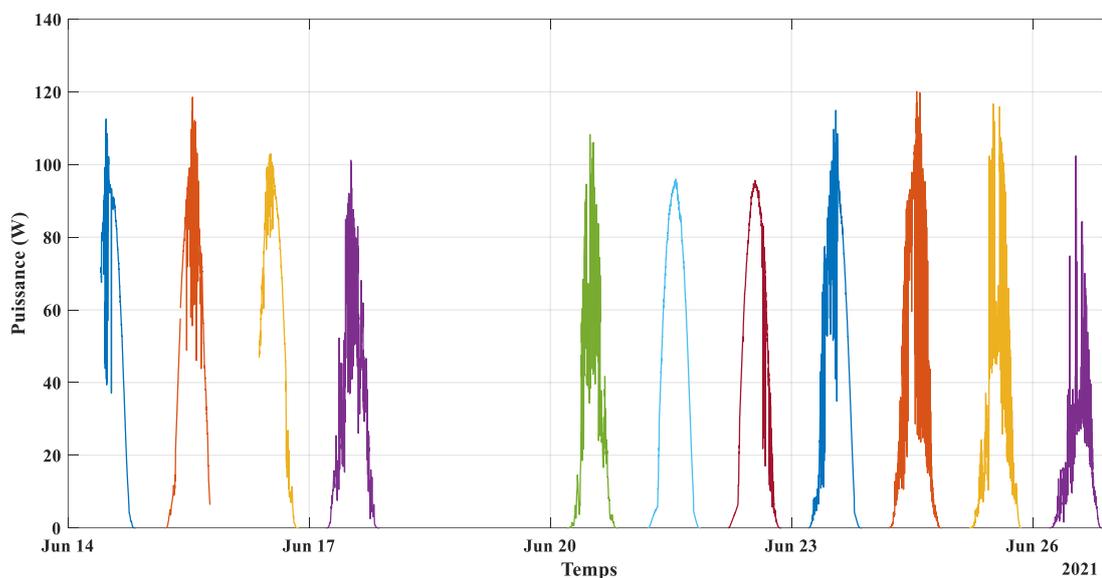


Figure 47: Analyse de la Puissance (W) d'un module PV (B) non nettoyé en fonction du temps

Les graphes montrent les puissances maximales en fonction du temps, L'analyse est faite dans des journées ensoleillées et non ensoleillées, ce qui a permis de faire le calcul de la différence de puissance chaque jour.

On observe une variation de puissance, due à plusieurs paramètres, tels que l'impact des aérosols sur le spectre solaire, qui dépend aussi des propriétés de ces dernières (la taille des particules...) ainsi que le type du rayonnement solaire, la température...

On remarque qu'il y'a une relation proportionnelle entre la puissance et l'irradiation, en effet plus le taux d'irradiation est élevé, plus la puissance des panneaux solaires est plus grande.

La figure 47 représente la superposition des deux graphes précédents dans le but de pouvoir faire la comparaison.

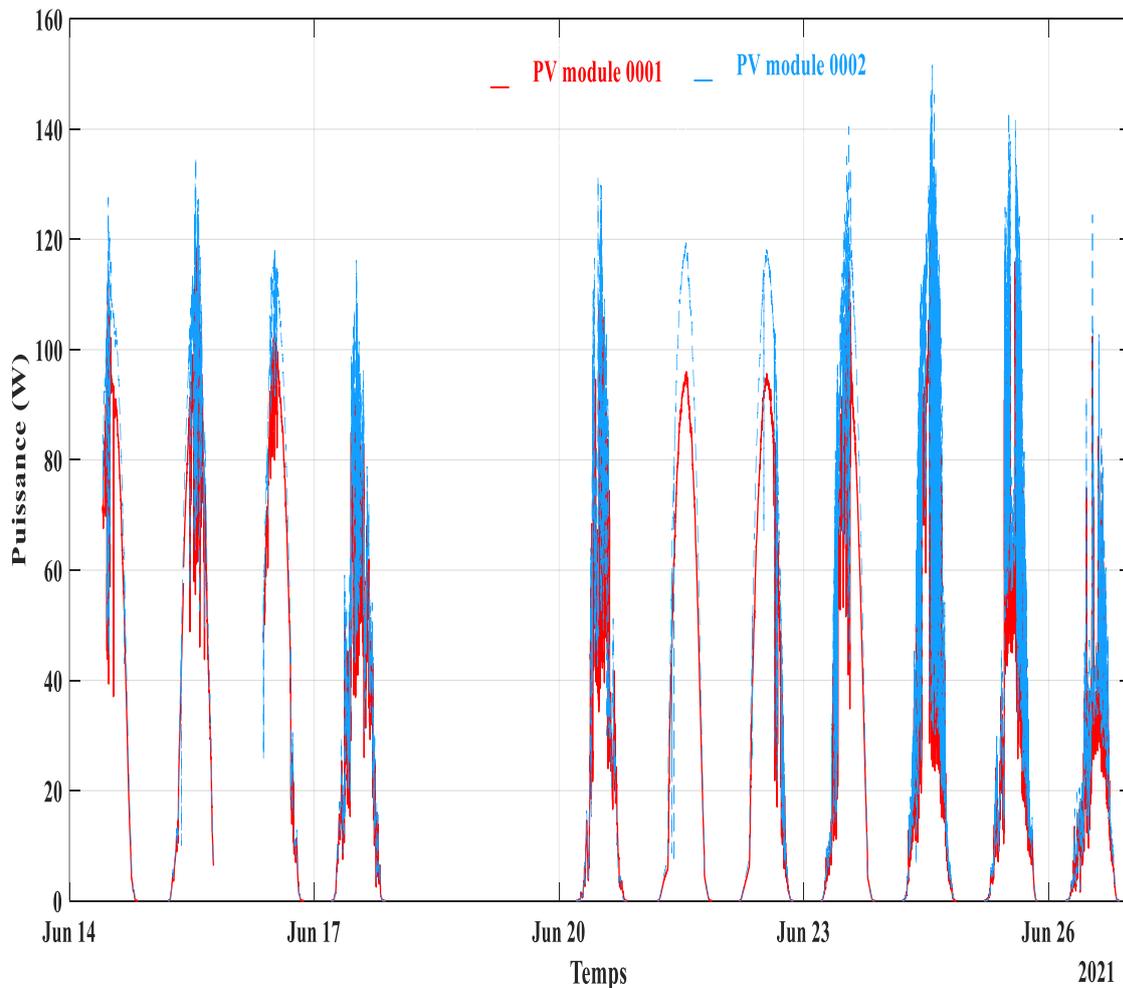


Figure 48:Le graphe comparatif entre les deux panneaux (0001-sans nettoyage, 0002-avec nettoyage)

D'une manière générale, nous remarquons que les puissances moyennes des deux modules ne sont pas régulières, elles sont variables, car l'ensoleillement n'est pas continu et varie en fonction des heures de la journée, et la période où notre expérience s'est déroulée est caractérisée par le passage des nuages, qui rendent l'irradiation incidente faible ainsi que le vent et un manque d'ensoleillement lors de quelques jours. On constate aussi que la puissance moyenne du module nettoyé est supérieure à celle du module non nettoyé.

Cela s'explique par le fait que le module nettoyé reçoit la totalité de l'ensoleillement sur sa surface et que le module non nettoyé en perd une partie (effet du dépôt de la poussière ou la salissure).

Quel que soit le temps de l'expérience (ciel dégagé ou nuageux), les deux courbes montrent clairement l'impact des dépôts de poussière sur les modules PV.

Afin de mettre en évidence l'effet du dépôt de poussières sur les panneaux solaires on calcule les pertes de puissance par la relation suivante :

$$\text{Power losses \%} = \frac{\frac{P_{\text{max clean PV}}}{P_{\text{max refclean PV}}} - \frac{P_{\text{max dirty PV}}}{P_{\text{max refdirty PV}}}{\frac{P_{\text{max clean PV}}}{P_{\text{max refclean PV}}}}$$

Avec: $P_{\text{max refclean PV}} = 150\text{w}$ et $P_{\text{max refdirty PV}} = 150\text{w}$

Les résultats obtenus sont inscrit dans le tableau suivant :

jour	Pmax PV A (Watt)	Pmax PV B (Watt)	Perte de puissances %
14/06/2021	127,64	112,51	11,8536509
15/06/2021	135,16	118,52	12,3113347
16/06/2021	118,06	102,98	12,7731662
17/06/2021	116,22	101,18	12,940974
20/06/2021	131,58	108,27	17,7154583
21/06/2021	119,47	95,99	19,6534695
22/06/2021	118,19	95,62	19,0963703
23/06/2021	140,54	114,91	18,2368009
24/06/2021	151,65	120,12	20,7912957
25/06/2021	143,49	116,66	18,6981671
26/06/2021	124,51	102,36	17,7897358

Tableau 10: Les pertes de puissances en fonction des jours

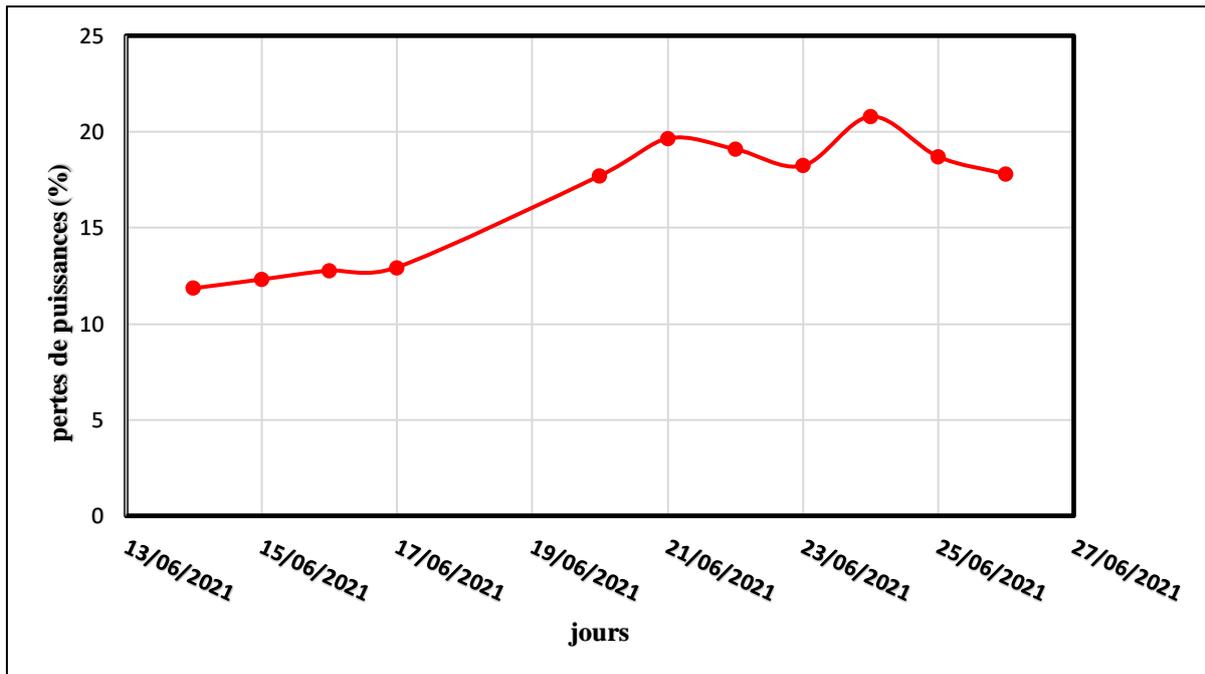


Figure 49: Variation des pertes de puissance en fonction des jours

La figure IV.46 représente les pertes de puissances du module PV nettoyé et non nettoyé. On constate que la perte de puissance augmente avec le temps elle atteint jusqu'à 20% après 9 jours de dépôt alors qu'au début de l'expérience la perte de puissance était presque de 12%. Dans notre étude on voit clairement l'effet du dépôt de poussière sur le panneau solaire, ainsi que le taux d'irradiation en effet plus la différence de captation des irradiances par les panneaux photovoltaïque est grande, plus les pertes de puissance augmentent, et ceci est dû à l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires qui réduit l'intensité solaire que reçoit ce dernier ce qui peut nous ramener à conclure que les pertes de puissances dépendent de la clarté du ciel et le taux de saleté du panneaux.

On observe un pic lors de la journée du 24 juin 2021, car d'après la figure IV.39 le temps était ensoleillé et sans couverture nuageuse.

Même interprétation pour la journée du 21 juin 2021.

4.2.2 Influence des particules en suspension

La présence des particules en suspension dans l'atmosphère pourrait être un autre facteur potentiel de diminution de la production d'énergie solaire photovoltaïque (PV).

Dans ce but, nous avons analysé deux paramètres : l'irradiation directe normale IDN et la quantité de production d'énergie solaire PV (la puissance maximale en Watt) du panneau nettoyé chaque cinq minutes. En même temps et en utilisant l'équipement portatif Life Basis nous avons obtenu les données relatives à la qualité de l'air dans le site d'installation des PV. Ces données sont les teneurs en PM_{10} , $PM_{2.5}$ et $PM_{1.0}$ en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.2.2.1 Influence sur l'irradiation (Irradiation directe normale IDN)

Les figures 47 et 48 représentent les variations des teneurs en PM_i durant les deux journées en ciel clair le 21 et 22 juin 2021.

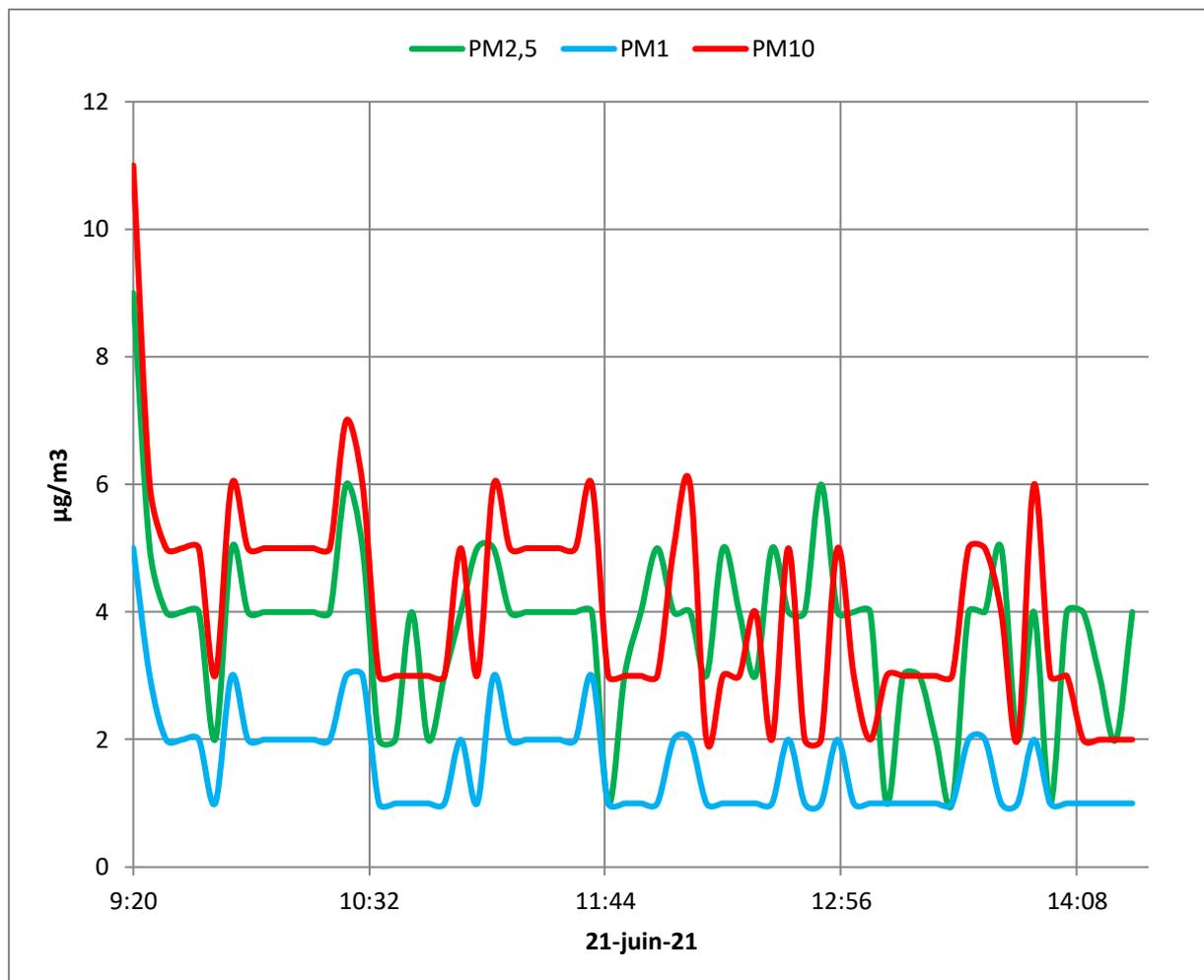


Figure 50: Les teneurs en PM_i enregistrées pour le 21 juin 2021

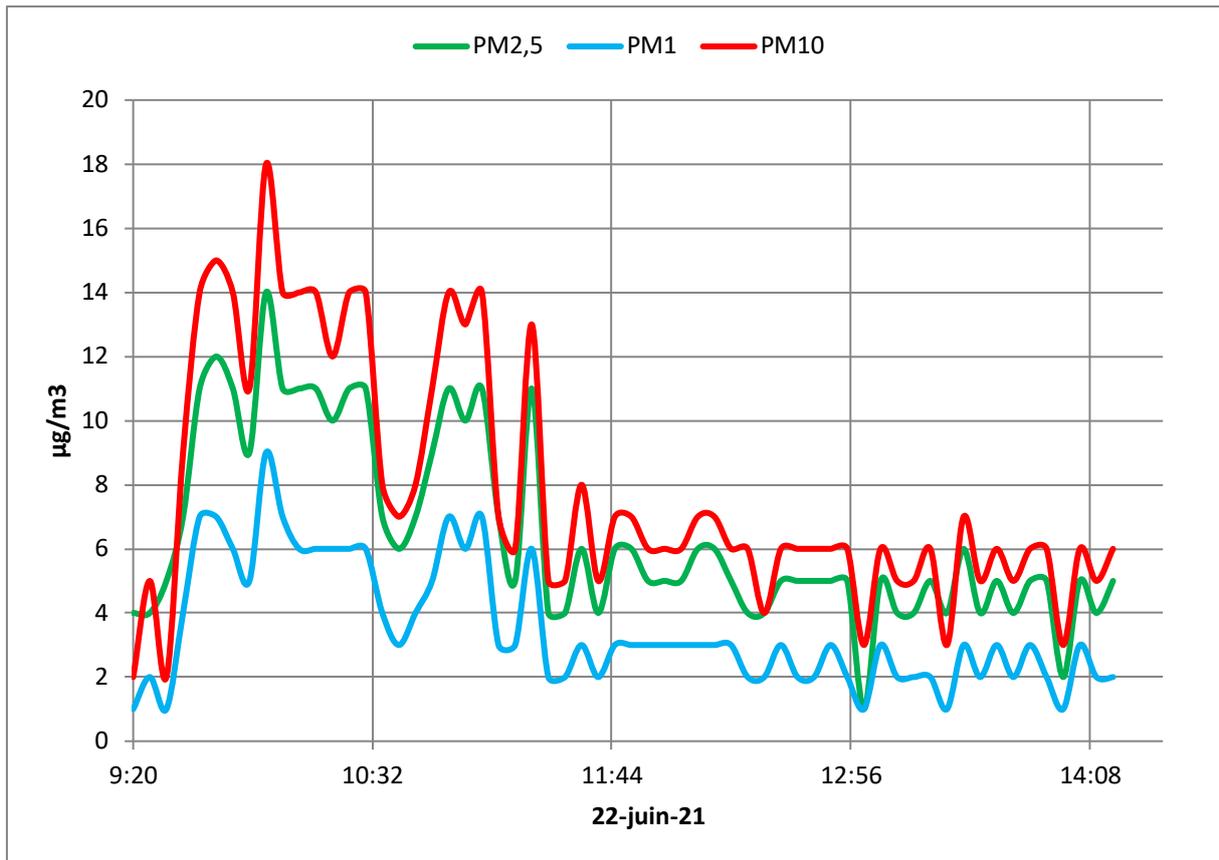


Figure 51: Les teneurs en PM_i enregistrées pour le 22 juin 2021

Les deux graphes ci-dessus montrent que le niveau de la pollution au site de mesure est relativement faible et l'appareil portatif Life Basis indique un indice de qualité de l'air « Excellente ».

Durant la période de 09:20 à 11:30, les concentrations de particules du jour 22 juin étaient plus élevées que celles du 21 juin, avec une valeur maximale enregistrée le jour 22 juin de 18, 14, et 9 µg/m³ pour les PM₁₀, PM_{2.5} et PM_{1.0}, respectivement.

La deuxième période de 11:30 à 14 :30, est caractérisée par des concentrations en PM_i proches, avec une légère différence en faveur de la deuxième journée (21 -juin-2021).

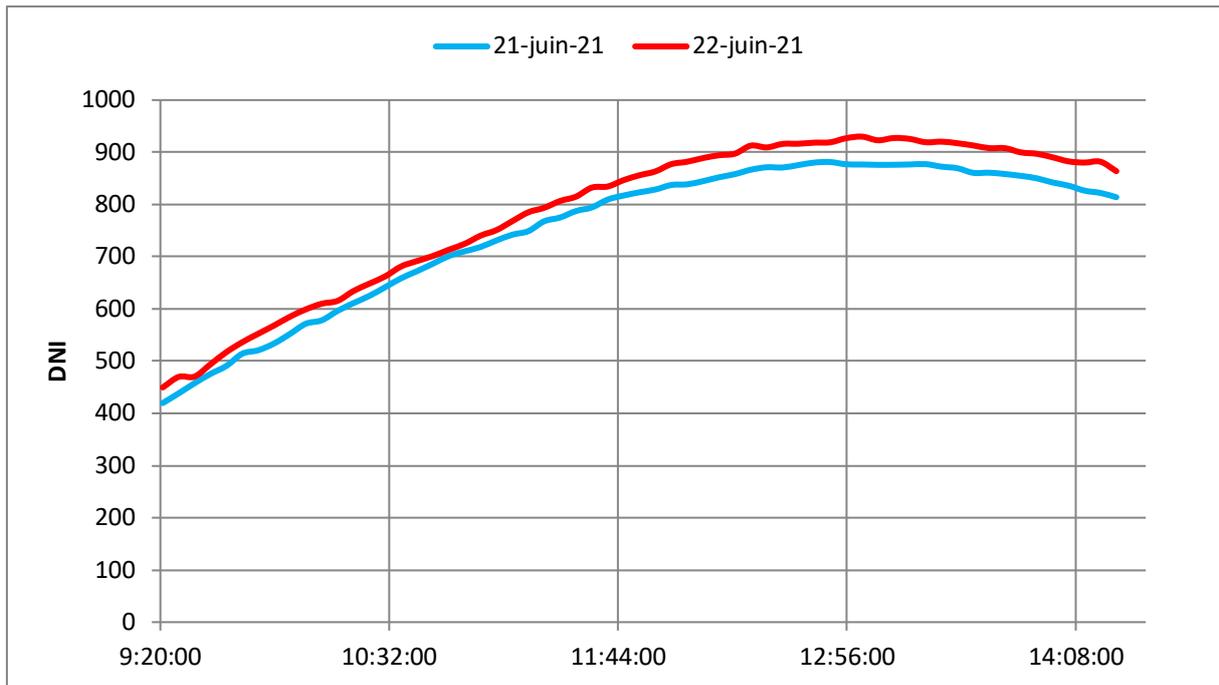


Figure 52: Variations de l'IDN de la cellule solaire nettoyée

La figure 49 représente la variation de l'irradiation normal direct DNI en fonction du temps durant les deux journées ensoleillées du 21 et 22 juin 2021. On observe que les deux courbes évoluent simultanément, et cela est dû au fait que les deux jours enregistrés ont à peu près les mêmes conditions météorologiques de chaleur, d'humidité et de vent (voir bulletin météorologique). L'irradiation varie entre 449 et 920 w/m² pour le 21 juin 2021 et entre 449 et 930 w/m² pour le 22 juin 2021. On constate qu'au milieu du jour (à 13h) l'irradiation est maximale car les rayons du soleil qui traversent la terre sont perpendiculaires à la surface.

Cependant, nous avons observé une différence dans la quantité de rayonnement tombant sur la cellule solaire entre les deux jours à ciel clair, et cette différence est due à l'effet des particules dans l'air, même s'il est moindre que l'effet de dépôt direct sur la surface.

Afin de voir la diminution des IDN d'une façon plus claire, on va calculer le pourcentage de diminution en utilisant la relation suivante :

$$\text{Diminution IDN}\% = \frac{\text{IDN}_1 - \text{IDN}_2}{\text{IDN}_1}$$

IDN : Irradiation directe normale en W/m²

Avec : $IDN_1 > IDN_2$

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 50 :

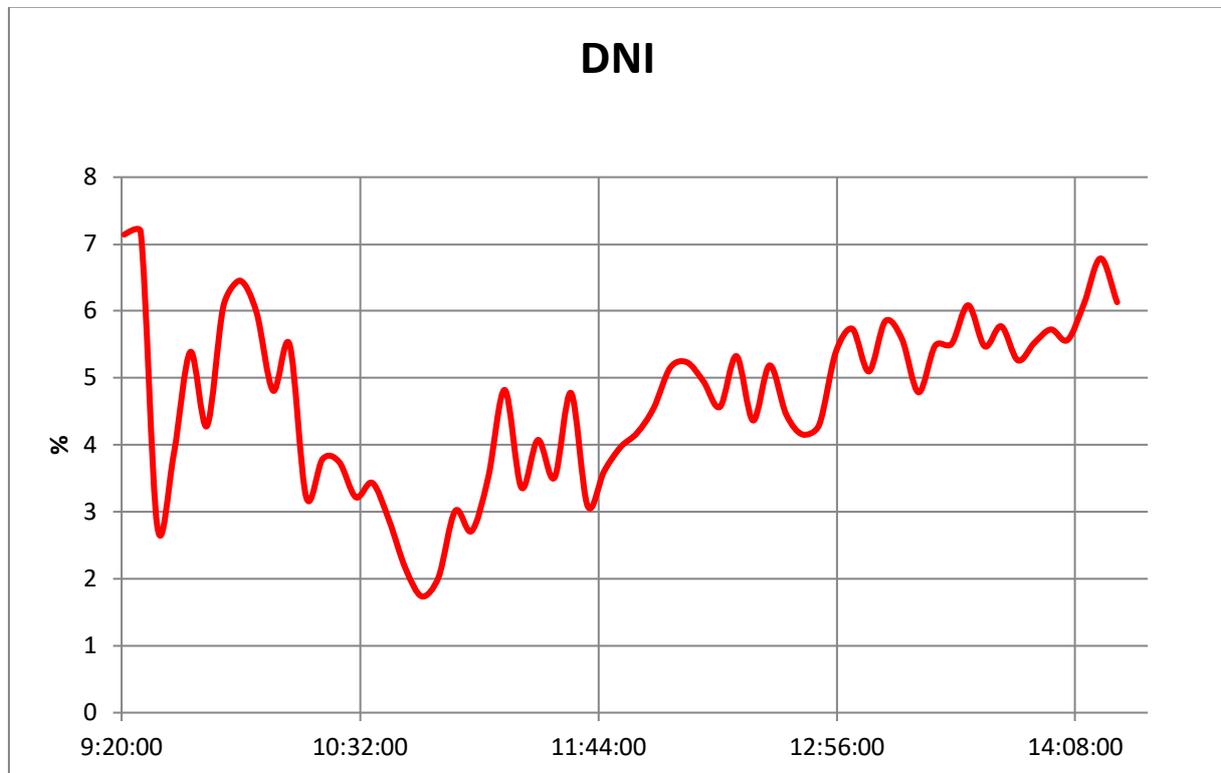


Figure 53: Pourcentage d'atténuation IDN

La figure ci-dessus représente le pourcentage de diminution du DNI entre les deux journées du 21 et 22 juin 2021 pour chaque 5 min. La valeur maximale du pourcentage de diminution du DNI est de 7,2%, enregistrée à 9h25 min et la valeur minimale est de 1,7% atteinte à 10h50.

Cette diminution du rayonnement solaire direct due aux matières particulaires se fait selon deux phénomènes, absorption (telle que le carbone suie) et réflexion (telle que les SO_4^{-2}). La coagulation des aérosols induisent la formation de particules plus denses qui absorbent ou réfléchissent le rayonnement solaire d'une manière plus importante.

Étant donné que l'énergie produite par le panneau solaire est directement liée à la quantité de rayonnement qui tombe, on s'attend à ce que le gain du panneau soit affecté de la même manière que le niveau de rayonnement.

4.2.2.2 Influence sur les puissances maximales enregistrées :

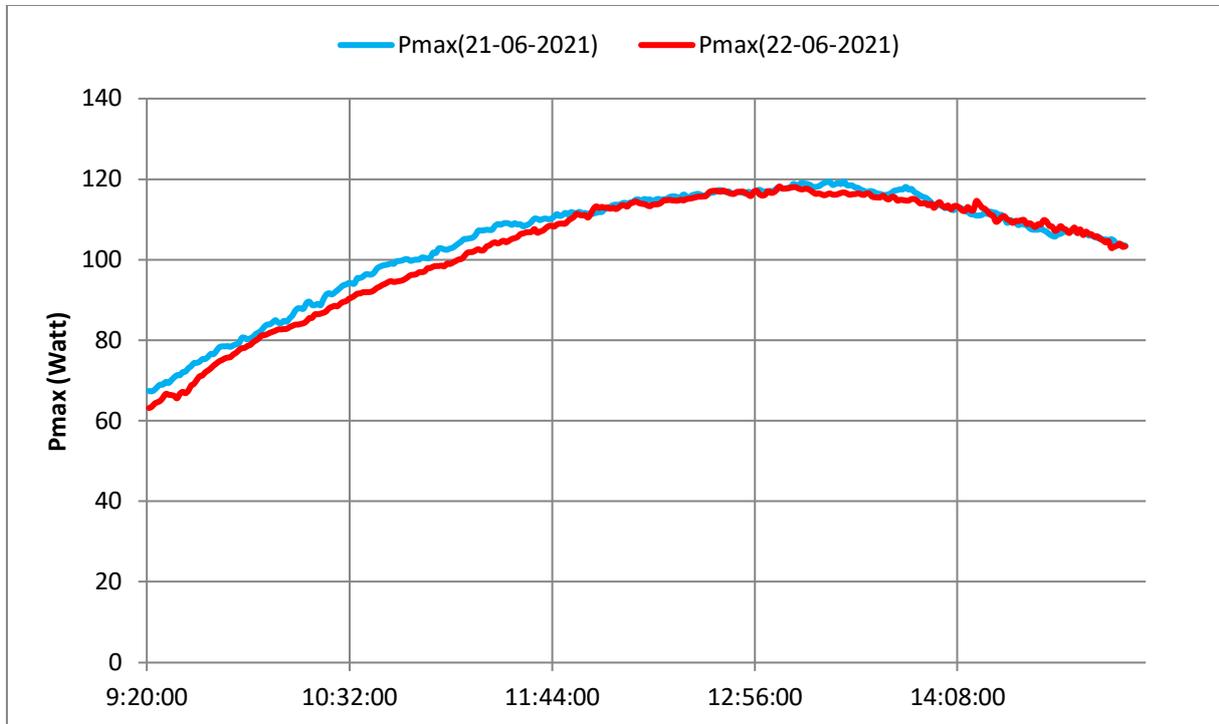


Figure 54: Variation des puissances maximale du panneau solaire nettoyé

Afin de voir la diminution des P_{max} d'une façon plus claire, on va calculer le pourcentage de diminution en utilisant la relation suivante :

$$\text{Diminution } P_{max} \% = \frac{P_{max1} - P_{max2}}{P_{max1}} \quad \text{Avec : } P_{max1} > P_{max2}$$

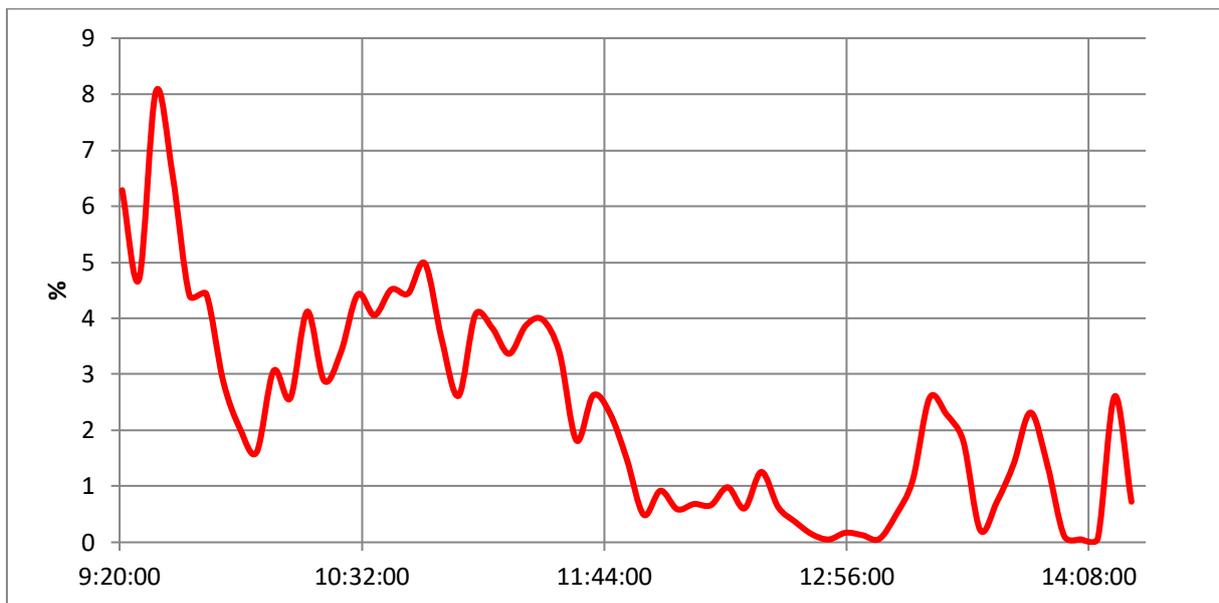


Figure 55: Pourcentage d'atténuation des puissances maximales du panneau solaire nettoyé

La figure 54 représente le pourcentage de diminution des puissances entre les deux journées du 21 et 22 juin 2021 pour chaque 5 min. La valeur maximale du pourcentage de diminution de la puissance maximale est de 8,05% enregistré à 9h30 min et la valeur minimale est de 0,05% atteinte à 14h05. Il est remarqué que le pourcentage de diminution de la puissance maximale du panneau solaire coïncide avec la diminution du rayonnement direct normal 8% contre 7,2%, ce qui reflète la même source d'impact de cette diminution.

Les PM_i réduisent la production d'énergie solaire photovoltaïque de jusqu'à 8 % de la capacité maximale, dans des conditions de qualité de l'air "excellente". En outre, le taux de réduction de la production d'électricité solaire photovoltaïque aurait pu atteindre des valeurs plus élevées dans des conditions de pollution plus importantes.

Comme nos données ont été effectuées lors des journées ensoleillées non nuageuses, on peut conclure que ces fluctuations sont dues aux PM_i présentes dans le site, ce qui a provoqué l'atténuation du rayonnement solaire et par conséquent les puissances maximales du panneau solaire. En effet, l'impact de la poussière et les aérosols est un facteur très important pour évaluer la quantité du rayonnement solaire absorbée et l'impact sur le rendement des panneaux solaires photovoltaïques.

Conclusion

Conclusion

De nombreux travaux de recherche ont tenté d'étudier le phénomène et les lois régissant le transport et les dépôts des poussières dans le contexte des installations solaires, car, en effet, le développement du solaire photovoltaïque se heurte à un certain nombre de difficultés, parmi lesquelles, la nécessité d'être exposés à l'extérieur, afin de fonctionner sous l'ensoleillement le plus direct possible. De tels équipements sont de ce fait, soumis à un environnement occasionnant de multiples sources de pollution et d'encrassement. Parmi les plus courantes, nous pouvons citer : les polluants industriels, les polluants émis par le parc automobiles, les poussières et, sables, les feuilles d'arbres, les polluants de la croute terrestres, les polluants marins ... En plus de baisser leurs rendements, certains polluants peuvent entraîner une usure prématurée des modules en engendrant des phénomènes d'échauffement.

Très peu d'études ont été réalisées en Algérie sur l'impact des particules fines sur le rendement des panneaux solaires. Une étude préliminaire a été élaborée par M. MERABET dans sa thèse de doctorat à l'ENP et dans ses travaux de recherche au CDER.

Ce mémoire développe l'ampleur de la pollution de l'air par les particules fines à Alger sous l'influence urbaine, et l'impact de ces dernières, ainsi que le dépôt de poussières sur le rendement des panneaux solaires photovoltaïques. Dans la première partie, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet en général. Nous avons exposé ensuite la technologie des cellules photovoltaïques et les différentes générations et avons fourni une explication sur leur principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Puis, nous avons expliqué l'interaction entre les particules atmosphériques et la lumière solaire et aussi présenté les deux modèles atmosphérique Hysplit et Modis.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté les résultats de l'étude expérimentale mise en œuvre pour déterminer les facteurs influençant la qualité de l'air en Algérie, tels que, les tempêtes de poussière provenant du Sahara, le transport à longue distance de polluants provenant d'Europe, le faible niveau de précipitation accompagné d'un rayonnement solaire intense ainsi que le trafic routier, qui demeure une principale source d'émission de particules, et nous avons aussi mis en évidence l'impact des particules fines sur le rendement des panneaux solaires.

A l'issu de ce travail, nous avons pu mettre en évidence l'influence des conditions météorologiques, le trafic routier, ainsi que les activités anthropiques sur la qualité de l'air. Nous avons pu exposer l'impact du dépôt de poussière sur l'irradiation solaire, ensuite, sur le rendement des panneaux photovoltaïques et l'influence des particules en suspension sur ce dernier.

En Algérie, le problème de la pollution atmosphérique devient une préoccupation majeure de santé publique, surtout en absence de nouvelles lois sur la qualité de l'air et/ou l'absence d'application des lois existantes, qui permettraient de réduire les émissions, et par conséquent, d'améliorer la qualité de l'air. Par conséquent, les premières mesures à prendre devraient être tournées vers les moyens de transport, de manière à réduire les émissions atmosphériques liées au trafic routier. De plus, les citoyens devraient adopter une attitude plus respectueuse de l'environnement, de manière à contribuer, à leur niveau, à une amélioration de la qualité de l'air.

Les poussières qui encrassent les panneaux peuvent nuire à leurs performances. Pour ce fait, il faut procéder à un grand nettoyage continu, dans les régions peu arrosées ou soumises à de fortes pollutions atmosphériques.

De nouvelles technologies permettant de lutter contre la poussière déposée sur les panneaux solaires sont développées, telle que la détection optique de la poussière et l'auto-nettoyage des panneaux. Et ceci, sans retirer manuellement cette dernière par brosse ou aspersion d'eau, mais par un système qui permettra bientôt d'empêcher la poussière de s'y déposer. Il s'agit d'un film parfaitement transparent qui agit comme un bouclier électrostatique. La technologie ne requiert évidemment pas d'eau.

Cette étude a montré une diminution de la puissance maximale du panneau solaire due au dépôt de poussières jusqu'à 20%. Quant à la diminution du rayonnement solaire direct en une journée à ciel clair, elle a atteint un pic de 7%. Pour le cas de la diminution de la puissance maximale du panneau solaire nettoyé pendant une journée à ciel clair, elle a été estimée à 8%. Les résultats de ce travail seront poursuivis par M. Merabet Hamza pour finaliser l'étude de l'impact des particules fines sur le rendement des panneaux solaires pour une valorisation sous forme de publication internationale indexée avec les chercheurs du CDER.

L'étude aura un impact conséquent sur les futurs projets de centrales solaires photovoltaïques en prévoyant les quantités d'électricité qui seront consommées par les particules atmosphériques et leurs dépôts sur les panneaux.

Bibliographie

Bibliographie

1. Dufresne, J., *Physique de l'atmosphère*. Graines de Sciences, 2002. **4**: p. 59-94.
2. Iqbal, M., *An introduction to solar radiation*2012: Elsevier.
3. BELARBI, N., *Etude de la pollution atmosphérique par les particules et les métaux lourds (Cr, Zn, Cd.....) au niveau de la ville d'Alger*, 2019.
4. Ung, A., *Cartographie de la pollution atmosphérique en milieu urbain à l'aide de données multisources*, 2003, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
5. *Etude de l'atmosphère*2005: GLOBE.
6. Composition chimique de l'atmosphère, I., *L'atmosphère dans tous ses états*.
7. Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change*. 2006.
8. Ghazi, S., *Approche Multi-agents pour la simulation de la pollution de l'air*, 2017.
9. Aïchi, L., *Pollution de l'air: le coût de l'inaction*. Rapport fait au nom de la commission d'enquête (1) sur le coût économique et financier de la pollution de l'air. La CE Coût Économique et Financier de la Pollution de L'air, 2015. 610.
10. BELHADJ, H., *Détection de la pollution atmosphérique à l'aide du lichen Xanthoria parietina (L.) bio-accumulateur d'éléments traces métalliques dans le centre urbain de la ville de Sidi Bel Abbés (Algérie occidentale)*, 2015.
11. Lacour, S., *Cours de pollution atmosphérique*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Centre d'Enseignement et de Recherche sur l'Environnement Atmosphérique France, 2001.
12. McCormac, B., *Introduction to the scientific study of atmospheric pollution*2012: Springer Science & Business Media.
13. Charpin, D., et al., *La pollution atmosphérique et ses effets sur la santé respiratoire. Document d'experts du groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) de la Société de pneumologie de langue française (SPLF)[Outdoor pollution and its effects on lung health. Expert document from the groupe pathologies pulmonaires professionnelles environnementales et iatrogéniques (PAPPEI) of the Société de pneumologie de langue française (SPLF)]*. Revue des Maladies Respiratoires, 2016. **33**(6): p. 484-508.
14. Gaston, G., *LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE*. Observatoire des Nuisances Aériennes, 2006.
15. Le COQ, L., *Elimination des particules*2006: Ed. Techniques Ingénieur.
16. Adams, K., et al., *Particulate matter components, sources, and health: Systematic approaches to testing effects*. Journal of the Air & Waste Management Association, 2015. **65**(5): p. 544-558.
17. Masclat, P. and H. Cachier, *L'aérosol atmosphérique. Caractéristiques physico-chimiques*. Analusis, 1998. **26**: p. 11-16.
18. Bisson, M., *Introduction à la pollution atmosphérique*1986.
19. Kelly, F.J. and J.C. Fussell, *Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter*. Atmospheric environment, 2012. **60**: p. 504-526.
20. Froines, J.R., et al., *Effect of aerosol size on the blood lead distribution of industrial workers*. American journal of industrial medicine, 1986. **9**(3): p. 227-237.
21. Mishra, R., et al., *Imperative role of particulate matter in innate immunity during RNA virus infection*. bioRxiv, 2020.
22. Organization, W.H., *Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide: report on a WHO working group, Bonn, Germany 13-15 January 2003*, 2003, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.

23. FONTAN, J. *Les particules polluantes de l'air : de quoi s'agit-il ?* 2019.
24. Dieme, D. *Caractérisation physicochimique et étude des effets toxiques sur des cellules pulmonaires BEAS-2B des polluants particuliers de la ville de Dakar (Sénégal)*. 2011. Université du Littoral Côte d'Opale.
25. Rémi, L., *Essais accélérés de dégradation de modules photovoltaïques*. Ecole Doctorale STIM Sciences et Technologies de l'Information et de Mathématiques, laboratoire LASQUO, 2010.
26. Delagnes, B.F.-D. and B. Flèche, *Energie solaire photovoltaïque*. doc. juin 2007, 2007.
27. *LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES*. Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement IBGE, 2010.
28. Zhao, J., et al. *24% efficient silicon solar cells*. in *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*. 1994. IEEE.
29. Yang, J., A. Banerjee, and S. Guha, *Triple-junction amorphous silicon alloy solar cell with 14.6% initial and 13.0% stable conversion efficiencies*. Applied Physics Letters, 1997. **70**(22): p. 2975-2977.
30. Hegedus, S.S. and A. Luque, *Status, trends, challenges and the bright future of solar electricity from photovoltaics*. Handbook of photovoltaic science and engineering, 2003: p. 1-43.
31. Tool, C., et al., *Influence of wafer thickness on the performance of multicrystalline Si solar cells: an experimental study*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2002. **10**(4): p. 279-291.
32. Günes, S., H. Neugebauer, and N.S. Sariciftci, *Conjugated polymer-based organic solar cells*. Chemical reviews, 2007. **107**(4): p. 1324-1338.
33. McEvoy, A., et al., *Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications* 2003: Elsevier.
34. *Solar Panel Efficiency*.
35. Grinenko, T., *How Temperature Affects Solar Panel Efficiency*. Renvu solar, 2018.
36. Lannoy, A. and H. Procaccia, *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel* 2005: Éditions Tec & doc.
37. Hacke, P., et al. *Test-to-failure of crystalline silicon modules*. in *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2010. IEEE.
38. Ndiaye, A., et al., *Degradations of silicon photovoltaic modules: A literature review*. Solar Energy, 2013. **96**: p. 140-151.
39. Lyon, F.p.s.t.i., *Interactions rayonnement matière*.
40. *Atmospheric scattering*. Humboldt State University.
41. Stein, A., et al., *NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015. **96**(12): p. 2059-2077.
42. Deletraz, G. and E. Paul, *Etat de l'art pour l'étude des impacts des transports routiers à proximité des routes et autoroutes*. Rapport de la Sociétés-Environnement-Territoires (SET) et du Laboratoire de la montagne alpine (LAMA). Équipe SIG. Espace Serge Martin, 1998. **144**.