UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

**Mémoire**

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

**MASTER**

**Spécialité** : Génie Mécanique

**Option** : Energétique

**Présenté par :**

TOUIL Hamza

BENOUMHANI Alaeddine

***Thème***

# *Contribution à la protection des panneaux solaires contre le vent de sable*

*Soutenue publiquement :13 /06 /2022*

*Devant le Jury:*

| | | | |
|---|---|---|---|
| Dr. SAIFI Nadia | M. C. A | U. K. M. Ouargla | Président |
| Dr. RAHMONI Soumia | M. C. B | U. K. M. Ouargla | Examinateur |
| Pr. DOKKAR Boubekeur | Prof. | U. K. M. Ouargla | Encadreur |

***Année Universitaire : 2021/2022***

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents, à l'origine de mon existence et de mon savoir, qu'ils trouvent ici l'expression de mon grand amour.*

*Mes frères et soeurs*

*Mes chers amis*

***Hamza***

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes très chers parents*

*À mes frères et sœurs*

*À ma famille*

*À mes amis*

**Alaeddine**

# *REMERCIEMENTS*

*Avant tout nous tenons tout particulièrement à témoigner notre profonde à gratitude à notre encadreur Pr. DOKKAR Boubekeur Pour l'honneur qu'il nous a fait en dirigeant et en orientant de réaliser ce travail, pour son compréhension et son patience avec nous tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance et nos remerciements à tous ce qui ont contribué de près comme de loin par leur soutien pour la réalisation de ce modeste travail.*

# Sommaire

Liste de Figure
Liste des Tableaux
Nomenclature
Introduction générale 1

## Chapitre 1 : Climat de la région de Ouargla

1.1 Introduction 3
1.2 Situation géographique de région d'étude 3
1.2.1 Position et limites géographiques de la région de Ouargla 3
1.3 Les Facteurs édaphiques 4
1.3.1 Caractérisations géologiques de région d'étude 4
1.3.2 Caractérisations géologiques da la région de Ouargla 4
1.3.2.1 Caractérisations pédologiques de la région d'étude 4
1.3.2.1.1 Particularité des Sols de la région de Ouargla 4
1.4 Caractéristiques climatiques de région d'étude 5
1.4.1 Température 5
1.4.2 Pluviométrie 6
1.4.3 Synthèse climatique 6
1.4.3.1 Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN 7
1.4.4 Humidité relative 7
1.4.5 Vent 8
1.4.5.1 Le vent et son origine 8
1.4.5.2 Caractéristiques du vent 8
1.4.5.3 Vitesses du vent 9
1.4.5.4 Discussion sur la vitesse de vent 10
1.4.5.5 Direction du vent 10
1.4.5.6 Carte vent en Algérie 10
1.5 Grain de sable 11
1.5.1 Forme du grain de sable 11
1.5.2 Dimension du grain de sable 12
1.5.3 Mouvement des grains de sable (transport et dépôt) 13
1.6 Accumulation de sable 13
1.7 Conclusion 15

## Chapitre 2 : Influence de vent de sable sur les panneaux solaires


2.1 Introduction 16

2.2 Facteurs environnementaux affectant les panneaux solaires 16

2.2.1 Rayonnement solaire 16

2.2.2 Température des modules 17

2.2.3 Le vent 17

2.2.4 Ombre 17

2.2.5 Humidité 18

2.2.6 Pluie et rosée 18

2.2.7 Encrassement 19

2.3. Effet du vent de sable sur les panneaux photovoltaïques 20

2.3.1 Effet du vent de sable sur l'éclairement solaire 20

2.3.2 Effet du vent de sable sur état de la surface 21

2.3.3 L'effet du vent de sable sur la durée de vie des panneaux photovoltaïques 23

2.4 Analyse bibliographique 24

2.5 Conclusion 28


## Chapitre 3 : Simulation numérique de l’écoulement de vent de sable


3.1 Introduction 29

3.2 Formulation géométrique du problème 29

3.3 Conditions aux limites 30

3.4 Hypothèses Simplificatrices 31

3.5 Principe de la méthode des volumes finis 31

3.6 Les équations Rgissantes 31

3.7 Le maillage 32

3.8 Le code ANSYS Fluent 32

3.8.1 Choix du schéma de discrétisation 33

3.8.2 Modèle de phase discrète (DPM) 34

3.8.3 Initialisation 34

3.8.4 Méthode de la solution 34

3.8.4.1 La consistance 34

3.8.4.2 La stabilité 35

3.8.4.3 La convergence 35

3.8.4.4 La conservation 35

3.8.4.5 Bornes à ne pas dépasser 35

3.8.4.6 Réalisabilité 35
3.8.4.7 Exactitude 35
3.9 Validation des résultats 36
3.10 Validation de maillage 37
3.11 Résultat et discussion 38
3.11.1 Particules piégées par l'obstacle 39
3.11.2 Contour de la vitesse résultante et trajectoire des particules 39
3.11.3 Profil de la vitesse résultante 42
3.11.4 Vecteurs de vitesse 44
3.12 Conclusion 45
Conclusion générale 47
Résumé 49
Référence bibliographique 50

# Liste de Figure


| Figure | Titre | Page |
|---|---|---|
| I.1 | Limites géographiques de région de Ouargla (Google Earth ) | 3 |
| I.2 | Températures mensuelles moyennes, maximales et minimales enregistrées dans la région d'étude 2018 | 5 |
| I.3 | Précipitations (mm) mensuelles enregistrées au niveau des régions d'étude durant 2018 | 6 |
| I.4 | Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ouargla période de 10 ans (2009-2018) | 7 |
| I.5 | Moyennes mensuelles de l'humidité de la région de Ouargla durant l'année (2018) | 8 |
| I.6 | Vitesses maximales mensuelles des vents exprimés en km par l'heure pendant l'année 2018 dans la région d'étude | 9 |
| I.7 | Moyenne annuelle de la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol en Algérie | 10 |
| I.8 | un diagramme schématique montrant les types des grains de sable | 12 |
| I.9 | Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Touggourt | 13 |
| I.10 | Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Touggourt | 14 |
| I.11 | Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Touggourt | 14 |
| I.12 | Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Touggourt | 14 |
| II.1 | Une photo montrant les panneaux photovoltaïques recevant le rayonnement solaire | 16 |
| II.2 | Une photo montrant le reflet des ombres des arbres sur les panneaux photovoltaïques | 18 |
| II.3 | Photo d'une cellule solaire PV recouverte de gouttelettes d'eau provenant de la rosée ou de la pluie | 19 |
| II.4 | Exemple de module encrassé | 19 |
| II.5 | Photographie de modules PV propres et poussiéreux | 20 |
| II.6 | Micrographie optique montrant les formes irrégulières des particules de sable | 21 |
| II.7 | Photographie optique d'une surface endommagée typique après une durée de 1 h | 22 |
| II.8 | Variation de l'efficacité relative en fonction de la durée du sablage | 22 |
| II.9 | Photo de panneaux photovoltaïques endommagés par un vent de sable | 23 |
| III.1 | Exemple d'un champ photovoltaïque de 32 PV (de 300 w, avec les dimensions 1.5×0.7m) montés en deux rangés | 29 |
| III.2 | Configuration géométrique du problème étudie | 29 |
| III.3 | Condition aux limites | 30 |
| III.4 | Schémas de maillage quadratique | 32 |
| III.5 | validation des résultats | 37 |
| III.6 | Influence du maillage sur la vitesse résultante au milieu de l'obstacle | 37 |
| III.7 | Sections de calcul | 38 |
| III.8 | Particules piégées par l'obstacle pour chaque mois | 39 |

| | | |
|---|---|---|
| III.9 | Contours de la vitesse résultante et trajectoire des particules pour les mois de Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet et Août | 41 |
| III.10 | Profils de la vitesse résultante pour les mois de Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet et Août en amont et en aval de l'obstacle | 44 |
| III.11 | Vecteur de vitesse pour le mois de mars | 45 |

# Liste des Tableaux


| Tableau | Titre | Page |
|---|---|---|
| I.1 | Echelle Beaufort | 9 |
| I.2 | représente les propriétés terminologiques des grains de sable | 11 |
| III.1 | Différentes caractéristiques de la simulation | 36 |
| III.2 | Vitesses moyenne mensuelles de vent pour l'année 2019 dans la région d'étude (O.N.M.Ouargla) | 38 |

## Nomenclature

| | | |
|---|---|---|
| $R_e$ | Nombre de Reynolds | |
| $\rho$ | Masse volumique | $kg/m^3$ |
| K | Energie cinétique turbulent | $m^2/s^2$ |
| B | Epaisseur de l'obstacle | mm |
| H | Hauteur de l'obstacle | mm |
| W | Largeur de l'obstacle | mm |
| $U_i$ | Vitesse initial | m/s |
| U | Vitesse selon x | m/s |
| P | Pression | $N/m^2$ |
| $P_{atm}$ | Pression atmosphérique | $N/m^2$ |
| $\nu$ | Viscosité cinématique | $m^2/s$ |
| $\mu$ | Viscosité dynamique | kg/ms |
| V | Vitesse de vent | m/s |
| DPM | Modèle de phase discrète | |
| PV | Panneaux photovoltaïque | |

# Introduction générale

En raison du développement de l'industrie, du transport et des moyens de communication, une croissance de la consommation mondiale d'électricité a été observée pendant les dernières décennies. Cependant, la plupart de l'énergie électrique est produite par combustion de ressources non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, nucléaire) dont le délai d'épuisement est estimé à quelques décennies. De plus, ce type de production d'énergie est très polluant. Le développement des sources d'énergies renouvelables et non polluantes est donc d'actualité. [1]

Parmi les sources d'énergies renouvelables, on compte le vent, les flux marins et océaniques, la géothermie, le solaire (cellules photovoltaïques), etc.… Ce dernier est une source d'énergie très puissante. En effet, la puissance du rayonnement solaire au niveau du sol est d'environ 950 Watt/m2 [2]. La quantité totale d'énergie solaire reçue au niveau du sol pendant une semaine dépasse l'énergie produite par les réserves mondiales de pétrole, de charbon, de gaz et d'uranium. Mais dans la plupart des cas, une conversion (transformation) de l'énergie du rayonnement solaire en électricité est nécessaire.

L'électricité peut être produite à partir de l'énergie solaire de deux manières différentes : les systèmes d'énergie solaire concentrée (CSP) utilisant la chaleur du soleil et les systèmes photovoltaïques (PV) utilisant la lumière du soleil. L'énergie PV est l'une des sources d'énergie les plus fiables et renouvelables utilisées pour la production d'électricité, qui est basée sur la conversion directe de l'irradiation solaire en courant électrique à l'aide de semi-conducteurs tels que le silicium cristallin. [3]

Le matériau le plus commercialisé dans l'industrie photovoltaïque est le silicium cristallin (abondant, facile à processeur, non toxique). Cependant, dans le coût du module, le prix du matériau intervient pour environ 50% et de nombreuses études visent donc à réduire les coûts relatifs à la préparation des substrats [4] Mais le problème de la maintenance et la protection reste à poses malgré que plusieurs techniques de protection sont proposées.

Les modules solaires photovoltaïques installés pour la production d'énergie sont fortement influencés par les conditions météorologiques telles que l'irradiation solaire, la température ambiante, la vitesse du vent, l'humidité et l'encrassement. L'accumulation de poussière à la surface des modules PV est l'une des principales préoccupations, en particulier dans les zones arides où les conditions climatiques sont difficiles et les tempêtes de sable fréquentes. [3]

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur la contribution à la protection des panneaux solaires contre les vents de sable sans réduire le rendement.

Ce manuscrit se présente de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons le climat de la région d'étude (Ouargla) et cité les caractéristiques climatiques de région d'étude (Température, Pluviométrie, Humidité relative et le vent).
- Le deuxième chapitre traite l'effet des facteurs environnementaux sur les panneaux solaires, et en particulier l'effet du vent de sable qui est le facteur le plus néfaste sur le captage du rayonnement solaire, puis sur la surface des panneaux et sur la durée de vie des panneaux solaires.
- Dans le troisième chapitre on va étudier la protection des panneaux solaires contre le vent de sable par un obstacle vertical, et analyser le comportement aérodynamique de l'écoulement afin de protéger les modules photovoltaïques en aval de l'obstacle. Cette étude est réalisée par le code de calcul ANSYS Fluent. Les résultats obtenus lors de la simulation numérique et leurs interprétations sont présentés dans cette partie. Une conclusion générale est donnée à la fin de ce mémoire.

# *CHAPITRE I : Climat de la région de Ouargla*

## 1.1 Introduction

Plusieurs aspects concernant la région de Ouargla sont abordés dans ce chapitre. Après les caractéristiques géographiques (position et limite), les facteurs édaphiques (géologique et pédologique), puis les facteurs climatiques (ainsi que température. Humidité relative, pluviométrie le vent) sont traités dans ce partie.

## 1.2 Situation géographique de région d'étude

### 1.2.1 Position et limites géographiques de la région de Ouargla

La région de Ouargla (31°52' à 32°30' N, 4°27' à 5°26' E) est située au sud-est du pays couvrant une superficie de 163230 Km2, a une altitude moyenne de 134m [5] (Fig. 01). Selon le même auteur, elle est limitée au Nord par les wilayas de Djelfa, El Oued et Biskra ; à l'Est par la Tunisie ; à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa ; au Sud par les wilayas de Tamanrasset et Illizi.

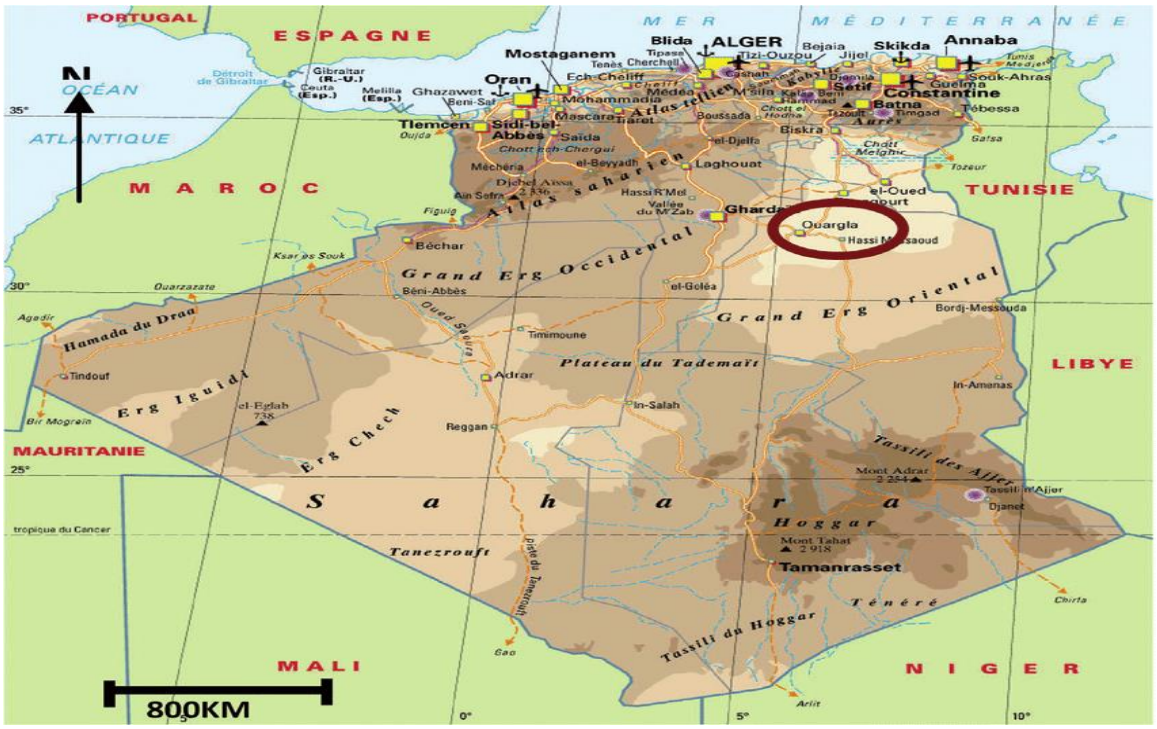



**Figure I.1 :** Limites géographiques de région de Ouargla (Google Earth).

## 1.3 Les Facteurs édaphiques

Indique que les facteurs édaphiques constituent toutes les propriétés physico-chimiques du sol. Les principaux facteurs (géologie et pédologie) sont développés dans la partie ci-dessous. [6]

### 1.3.1 Caractérisations géologiques de région d'étude

Dans ce qui suit, les particularités géologiques de la région d'étude sont présentées.

### 1.3.2 Caractérisations géologiques da la région de Ouargla

La Wilaya de Ouargla est située dans l'immense bassin saharien, caractérisé par la prédominance de dépôts plio-quaternaires, des affleurements éocènes et crétacés se rencontrent néanmoins à l'Est. Le relief de la région se présente sous un aspect tabulaire aux strates parallèles. [7]

Elle se trouve dans une région très peu accidentée, tectoniquement stable. En fonction de l'origine et de la structure des terrains, il se distingue à l'ouest et au sud des terrains calcaires et gréseux formant une zone déshéritée où rien ne pousse à l'exception de quelques touffes, à l'est le synclinal d'Oued mya, zone pauvre en points d'eau et en pâturage apparaît. Ce synclinal est suivi par le Grand Erg occidental [5].

#### 1.3.2.1 Caractérisations pédologiques de la région d'étude

Les caractéristiques pédologiques de la région d'étude sont détaillées dans les paragraphes suivants.

##### 1.3.2.1.1 Particularité des Sols de la région de Ouargla

Indique que les sols dans la région de Ouargla sont des regs et sableux qui dominent accompagnés par des affleurements limités des sols des sebkhas et chotts. Ils sont caractérisés par un faible taux de matière organique car les activités biologiques sont faibles, un pH alcalin et une forte salinité [8] La distribution de la salinité dans le profil pédologique est caractérisée par une augmentation de bas en haut. Les horizons de surface présentent toujours les plus fortes valeurs de la conductivité électrique. [9]

## 1.4 Caractéristiques climatiques de région d'étude

Les facteurs abiotiques sont des facteurs indépendants de la densité qui agissent sur les organismes avec une intensité qui ne dépend pas de leur abondance. Ils sont représentés par les facteurs climatiques (température, précipitation, humidité et vent). [10]

### 1.4.1 Température

Selon [10] la température est l'élément le plus important du climat, étant donné que tous les processus métaboliques en dépendent. Elle caractérise, avec l'humidité de l'air et le sol le microclimat du biotope. Les températures mensuelles enregistrées dans les régions d'étude sont regroupées dans le Figure 02.

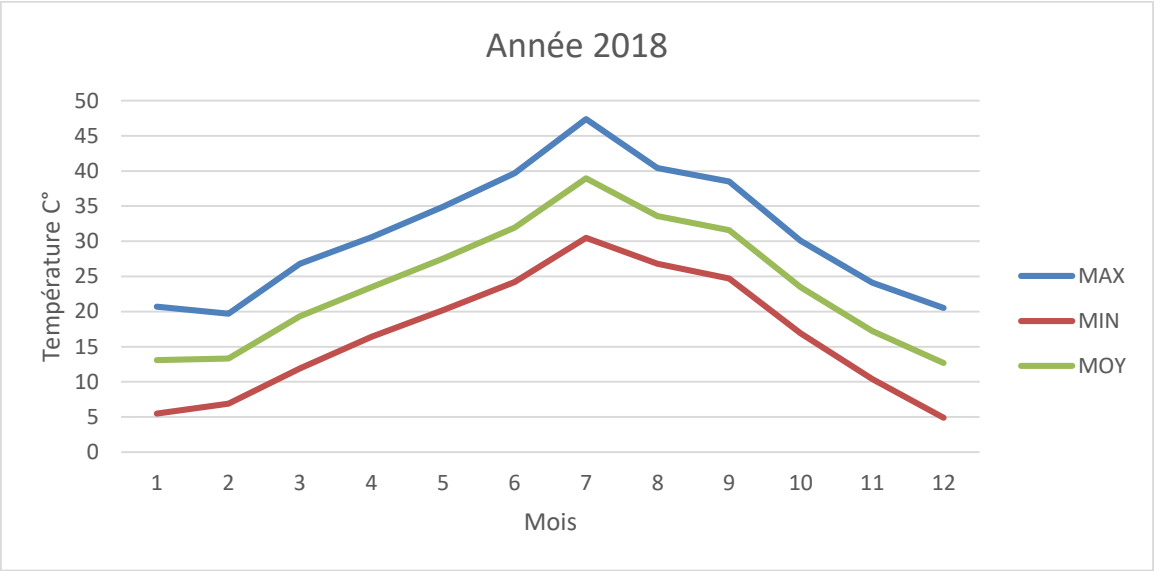



**Figure I.2 :** Températures mensuelles moyennes, maximales et minimales enregistrées dans la région d'étude 2018. [20]

**Max** est la moyenne mensuelle des températures maximales.

**Min** est la moyenne mensuelle des températures minimales.

Les données de température montrent que dans la région de Ouargla, le mois caractérisé par les températures les plus faibles est janvier (T Moy = 13.1 °C) Par contre, les mois les plus chauds sont juillet (T Moy =38,9°C).

### 1.4.2 Pluviométrie

Rapporte qu'en méditerranée, le régime des précipitations est hivernal et que les pluies annuelles tombent surtout durant les trois mois d'hiver. [11]

L'Algérie, en fonction de la géologie, de la lithologie et de la topographie s'organise en trois unités structurales : le système tellien, les hautes plaines steppiques et le Sahara. Le système tellien est un ensemble constitué par une succession de massifs montagneux, côtiers et sublittoraux, et de plaines. Schématiquement, les précipitations décroissent du littoral vers l'intérieur suivant un fort gradient latitudinal, altéré néanmoins par l'effet orographique. Les quantités pluviométriques mensuelles enregistrées dans les différentes régions d'étude sont illustrées dans le Figure 03.

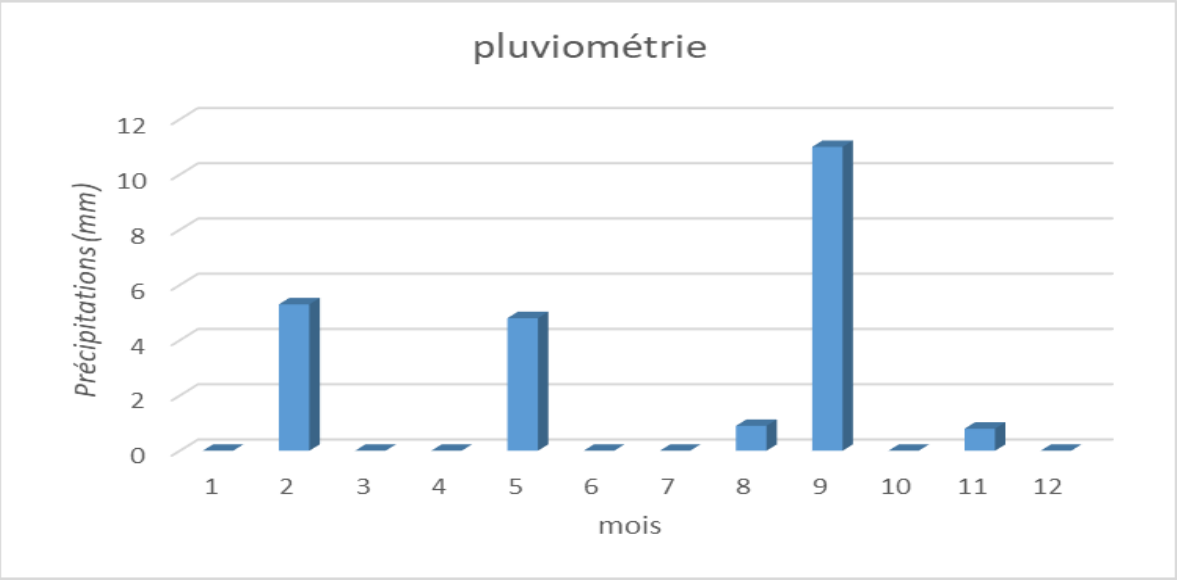



**Figure I.3 :** Précipitations (mm) mensuelles enregistrées au niveau des régions d'étude durant 2018. [20]

Dans la région de Ouargla, les précipitions sont très réduites et irrégulières. Durant l'année 2018, le mois le plus pluvieux est septembre (11mm). **(Figure I.3)**.

### 1.4.3 Synthèse climatique

Rappelle que les différents facteurs climatiques n'agissent pas indépendamment les uns des autres. Il est donc indispensable d'étudier l'importance de la combinaison de ces facteurs sur le milieu pris en considération. La synthèse climatique d'une région donnée peut se faire par l'analyse du diagramme Ombro thermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1953) et par le climat gramme d'EMBERGER (1952). [12]

### 1.4.3.1 Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN

Le type de Climat gramme le plus répondu est sans doute celui conçu par BAGNOLS & GAUSSEN (1953). Il est largement utilisé pour sa simplicité et son efficacité (REBBAS, 2014).

Il consiste en une représentation sur un même graphique des précipitations moyennes mensuelles, exprimées en mm, et des températures moyennes mensuelles, exprimées en °C, avec en abscisse

Les mois ; ceci permet d'obtenir un diagramme Ombrothermique. Ce dernier permet une visualisation immédiate de la durée et de l'intensité de la saison sèche, à condition bien sûr de respecter les échelles prises en ordonnées, soit **1°C = 2mm**. On obtient ainsi deux courbes superposées : l'une des variations thermiques annuelles, l'autre des précipitations.

**T = (M+m)/2 (C°)**

Avec :

• M : Température maximale du mois (C°).

• m : Température minimal du mois (C°).

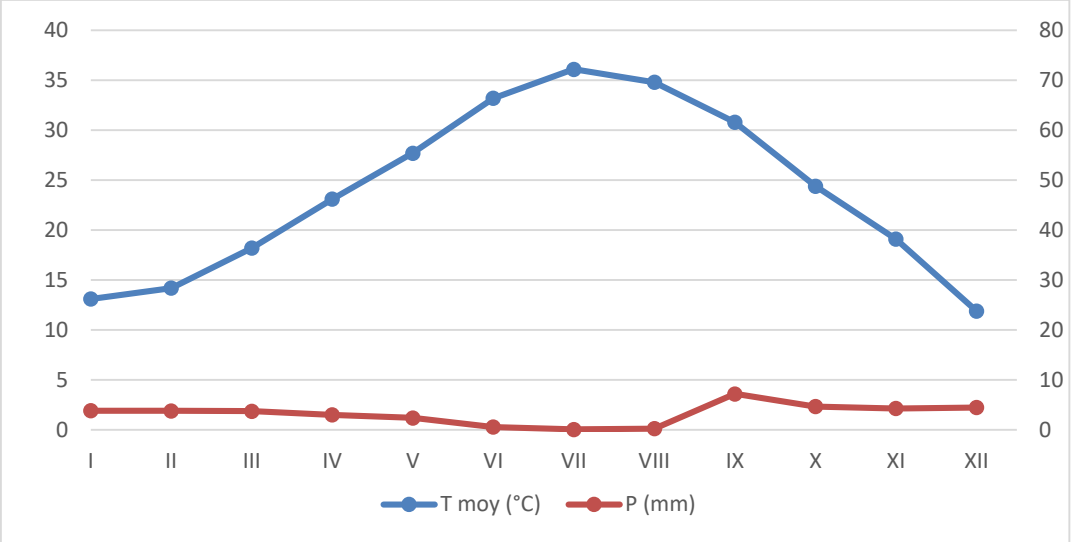



**Figure I.4 :** Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ouargla période de 10 ans (2009-2018)

### 1.4.4 Humidité relative

Selon [11] l'humidité relative est le rapport entre la teneur en vapeur d'eau de l'air et la masse théorique de vapeur d'eau que peut renfermer l'atmosphère à saturation compte tenu de la température et de la pression barométrique existante. Les valeurs mensuelles de l'humidité relative moyenne en % correspondant aux deux régions d'études pour la période (2018) Sont rapportées dans la Figure 03.

Pour la région de Ouargla, le taux d'humidité relative varie d'une saison à l'autre, mais il reste toujours faible, où il atteint son maximum au mois de Décembre avec des taux de et 52,5 % pour l'année 2018, et une valeur minimale au mois de juillet avec un taux de 15,5 % (2018).

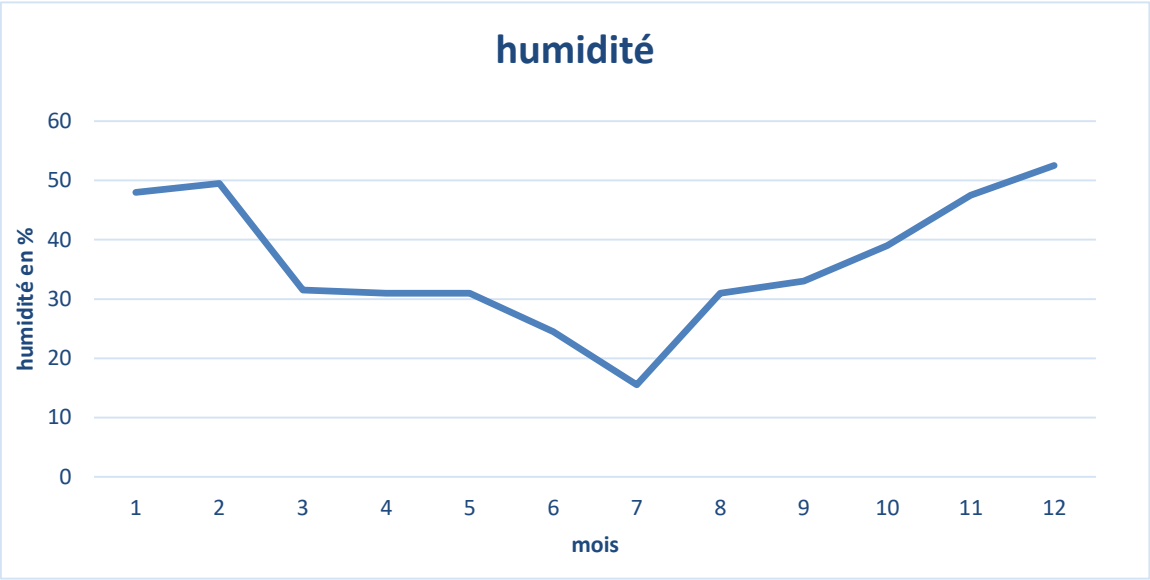



**Figure I.5 :** Moyennes mensuelles de l'humidité de la région de Ouargla durant l'année (2018). [20]

### 1.4.5 Vent

#### 1.4.5.1 Le vent et son origine

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules de forme solides Ou liquides. Sa composition est relativement constante jusqu'à une altitude inferieure à 100km. Il est principalement composé d'azote et d'oxygène. La quasi-totalité de sa masse est située à une altitude de moins de 16 km, dans les basses couches atmosphériques. [13]

#### 1.4.5.2 Caractéristiques du vent

La puissance du vent est sensiblement constante à chaque instant pour l'ensemble du globe, en un lieu donné et sur une période solaire. Par contre, la vitesse du vent est très variable suivant les jours et les lieux [14]. En générale, la vitesse du vent est mesurée à 10 m de hauteur à partir de la surface de la terre.

Le Tab (I.1) donne la classification des vents avec l'échelle de Beaufort qui décrit les différentes natures du vent en fonction de leurs vitesses Le Tab (I.1) donne la classification des vents avec l'échelle de Beaufort qui décrit les différentes natures du vent en fonction de leurs vitesses.

**Tableau I.1 :** Echelle Beaufort. [15]

| Nombre de Beaufort | Terme générique | Vitesse du vent à 10 m de hauteur |
|---|---|---|
| (9escri) | (9escriptive) | en km/h |
| 0 | Calme | Inférieure à 1 |
| 1 | Très légère brise | 1à5 |
| 2 | Légère brise | 6 à 11 |
| 3 | Petite brise | 12 à 19 |
| 4 | Jolie brise | 20 à 28 |
| 5 | Bonne brise | 29 à 38 |
| 6 | Vent frais | 39 à 49 |
| 7 | Grand frais | 50 à 61 |
| 8 | Coup de vent | 62 à 74 |
| 9 | Fort coup de vent | 75 à 88 |
| 10 | Tempête | 89 à 102 |
| 11 | Violente tempête | 103 à 117 |
| 12 | Ouragan | Supérieure à118 |

### 1.4.5.3 Vitesses du vent

Selon [15] le vent constitue en certains biotopes un facteur écologique limitant. Le régime des vents est en fonction des saisons. Dans la région de Ouargla, les études menées par ROUVILLOIS-BRIGOL (1975) indique que les vents les plus forts soufflent du Nord-Est et du Sud. Les vents de sable sont fréquents surtout au mois de mars et mai. Les valeurs mensuelles de la vitesse moyenne des vents exprimées en km/h enregistrées au cours d'année 2018 dans la région d'étude sont mises dans la Figure (I.6**).**

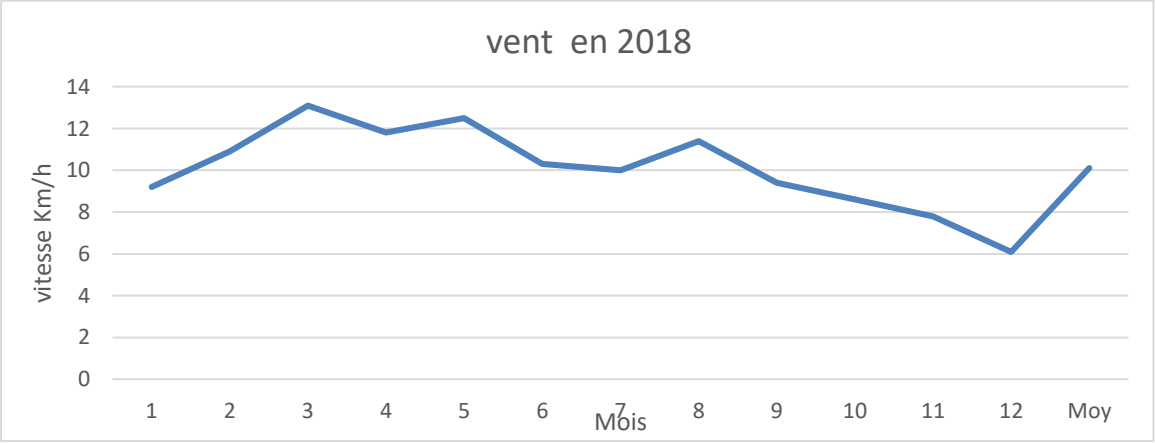



**Figure 1.6 :** Vitesses maximales mensuelles des vents exprimés en km par l'heure pendant l'année 2018 dans la région d'étude. [20]

### 1.4.5.4 Discussion sur la vitesse de vent

On note que les vents dans la région de Ouargla atteignent leur vitesse maximale (13.1Km/h) au cours du mois de mars, et ce sont des vents du sud-ouest, qui sont beaucoup indésirables, chargés de tempêtes de sable appelées Al-Shahili et Al-Siroko.

Certes, on enregistre la vitesse la plus faible durant le mois de décembre(6.1Km/h), des vents froids du nord appelés el-bahri, qui sont souhaitables, mais ils ne durent pas longtemps, contrairement aux vents du sud-ouest.

### 1.4.5.5 Direction du vent

Ouargla est une région ventée où les vents soufflent du Nord-Est et du Sud, les vents les plus fréquents en hiver sont les vents d'Ouest, tandis qu'au printemps les vents du Nord-Est et de l'Ouest dominent, en été ils soufflent du Nord-Est et en automne du Nord-Est et Sud-Ouest. [16]

On note que les vents du nord-est sont peu nombreux tout au long de l'année, car ils sont peu sableux et n'apportent pas de vents de sable Alors que les vents qui sont du sud-ouest sont les vents dominants et sont plus au printemps (mars et avril), ils sont caractérisés par des vents de sable et leur grande vitesse, comme le montre la courbe (**Figure I.6**). Si la région d'étude a des vents sableux du sud-ouest.

### 1.4.5.6 Carte vent en Algérie

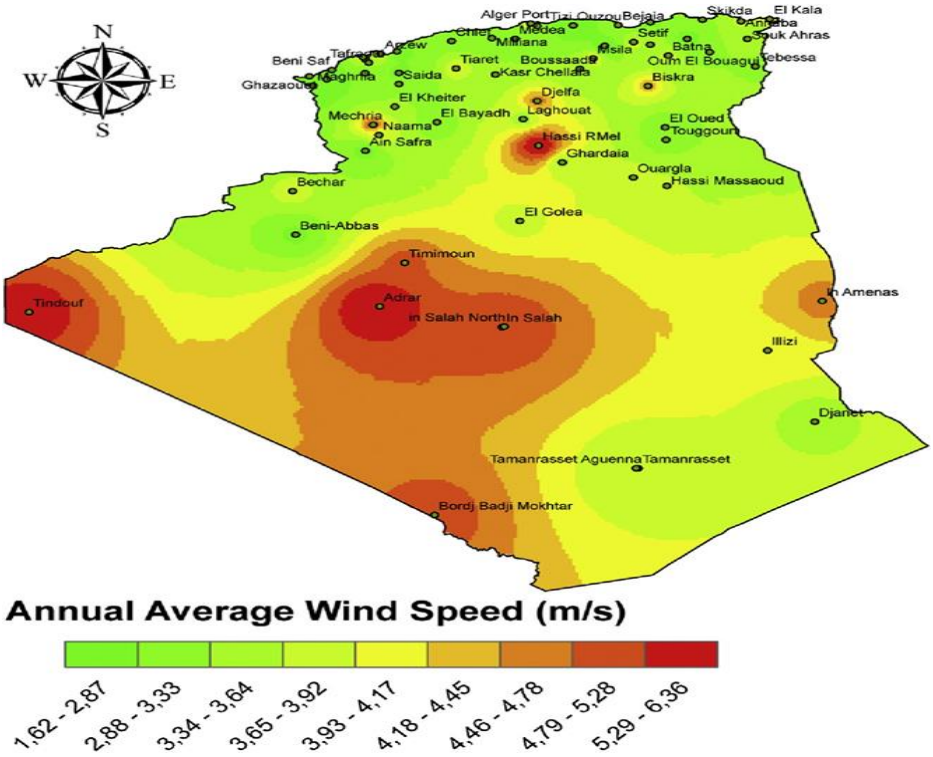



**Figure I.7 :** Moyenne annuelle de la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol en Algérie. [17]

La figure (I.7) montre la vitesse annuelle moyenne du vent pour chaque région.D'après l'analyse de la vitesse du vent, on peut voir La vitesse moyenne du vent en Algérie varie entre 1,6 m/s et 6,3 m/s. La vitesse du vent la plus élevée enregistrée est : 6,3 m/s pour la zone Adrar 6,1 m/s pour Hassi El Rmel et 6 m/s pour la région de Tindouf. Dans la région de Ouargla, la vitesse du vent varie entre 6,1 et 6,3 m/s Des zones venteuses attrayantes sont situées dans le sud-ouest (Ouargla).

## 1.5 Grain de sable

### 1.5.1 Forme du grain de sable

En termes de forme [18], les grains de sable prennent des formes différentes selon leur aspect extérieur, bien que la forme générale soit simplifiée sous la forme d'un rayon sphérique R en général, selon une étude (1977 Walker et Gillette) qui a prouvé la vaste différence entre les différentes formes entre les différentes formes entre les grains de sable Malgré cela, le comportement aérodynamique des grains de sable est étudié sur la base de la forme sphérique.

**Tableau I.2 :** représente les propriétés terminologiques des grains de sable. [18]

| Study type | Height | Concentration ( µg $m^{-3}$ ) | Size ( µm) | $U_+$ ($m.s^{-1}$ ) | Reference |
|---|---|---|---|---|---|
| LDS | 1 m | $8\times10^3$ - $2.5\times10^5$ | ≤10 | 0.4-0.6 | Gillet and Waker(1977) ,M |
| LDS | 1.5 m | $4\times10^3$ - $2.6\times10^5$ | ≤10 | 0.3-0.5 | Gillet and Waker(1977) ,M |
| LDS | 1-10 m | $10^3$ - $10^5$ | ≤10 | 0.3-0.6 | Nickling(1978) ,M |
| LDS | 1-10 m | 26-13735 | ≤10 | 0.2-1.0 | Nickling and Gillies(1993) ,M |
| LRT | Bld roof | 280-5000 | | | Gao et al (1986),M |
| LRT | Bld roof | 3.6-32.3 | ≤2.5 | | Perry and al (1979),M |
| LRT | Bld roof | 14.6-62.1 | | | Prospero and Nees(1976) ,M |
| LRT | Ocean surf | 2-25 | | | Prospero and Nees(1976) ,M |
| LRT | Ocean surf | 0.1-60 | | | Pye (1987),M |
| LRT | 2000 m | $2\times10^3$ | | | Nickovic and Dobrinicic (1996),M |
| LRT | 980 hpa | $10^5$ | ≤10 | | Westphal and al (1988),M |
| LRT | 960 hpa | 129 (µg $Kg^{-1}$ ) | Clay | | Tegen and Fung (1994),M |

Les propriétés des vrais grains de sable sont à peu près les mêmes et sont généralement de forme sphérique.

### 1.5.2 Dimension du grain de sable

La dimension du grain de sable [18] varie de moins de 2 mm à plus de 0.1 mm et est divisée en quatre classes et est classée comme suit :

1- Gravier ($2mm < d \leq 76.2\ mm$)
2- La sable ($0.05mm < d \leq 2\ mm$)
3- limon ($0.002mm < d \leq 0.05mm$)
4- Argile ($d < 0.002mm$)

Comme le montre la figure suivante :

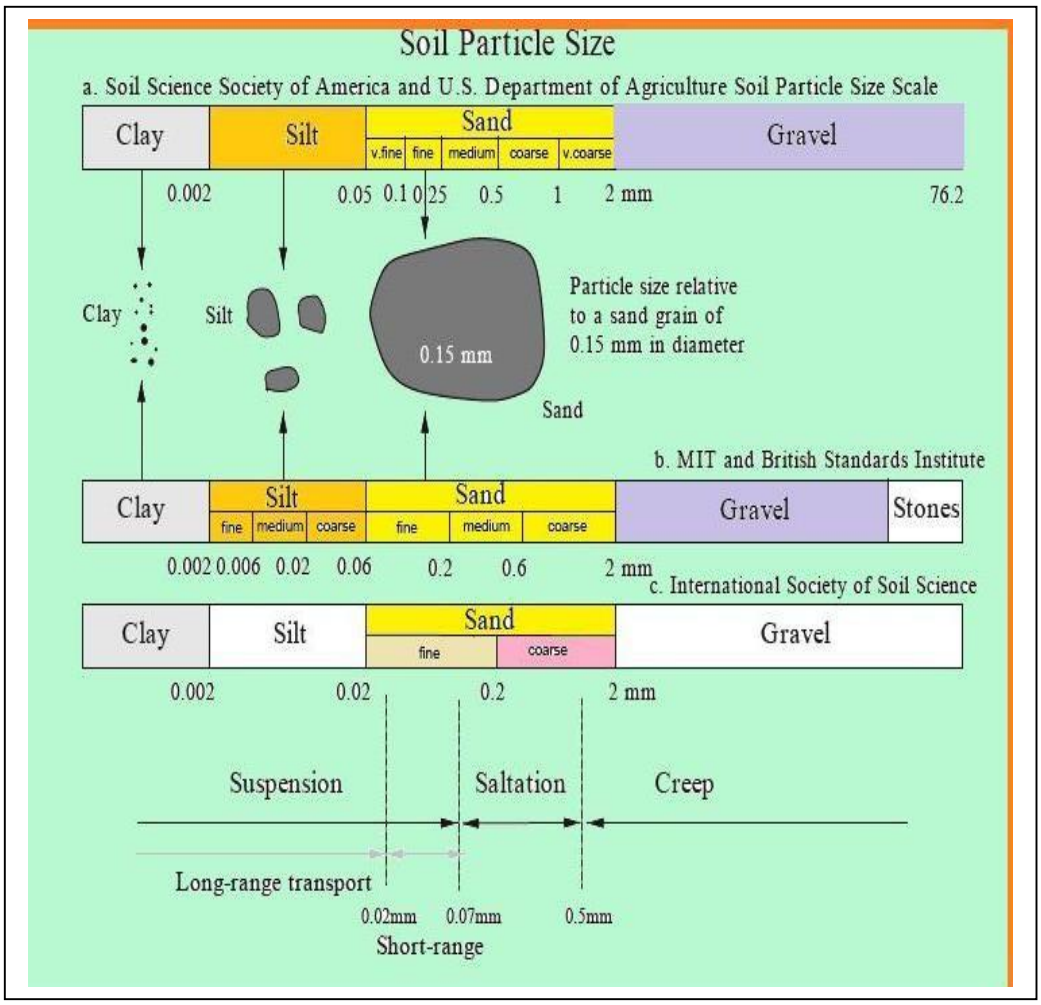



**Figure I.8 :** un diagramme schématique montrant les types des grains de sable. [19]

### 1.5.3 Mouvement des grains de sable (transport et dépôt)

La poussière [18] est définie comme la finesse des grains de sable au moment où ils quittent complètement la surface de la terre, qui se caractérisent par des diamètres différents du plus petit au L'objectif du plus grand diamètre critique (R0) que les vents peuvent transférer, car ils sont transportés puis fuient d'un endroit à un autre, ce cycle s'appelle le cycle de la poussière, Le processus de transport et de sédimentation (c'est-à-dire le cycle de la poussière) par le vent est considéré comme la principale cause du paysage général de la surface de la Terre.

La topographie, où, dans la recherche géologique, elle est classée comme l'un des mécanismes les plus efficaces pour modifier la topologie de la surface de la terre, car elle est considérée comme un facteur important dans Changement Climatique.

## 1.6 Accumulation de sable

Les tempêtes de sable dans la région d'étude provoquent l'accumulation de sable sur les flancs des forêts désertiques, des usines, etc. Donc, cette accumulation doit être enlevée.

**Figure I.9 :** Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Ouargla

**Figure I.10 :** Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Ouargla.

**Figure I.11 :** Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Ouargla

**Figure I.12 :** Image réelle de l'accumulation de sable sur le versant sud-ouest à Ouargla

Cette accumulation de sable a plusieurs dommages, l'un de ses dommages est de ramper vers le mur de l'usine et de s'accumuler à côté (voir Figure I.11 et I.12).

Figure (I.9 et I.10) nous montre également que l'accumulation de sable sur le côté du protecteur forestier est traditionnel, qui est utilisé par les agriculteurs de la région. Avec El-falah.et nous avons posé des questions sur l'importance du protecteur que l'agriculteur utilise pour protéger sa culture de l'accumulation de sable. Il nous a informés que la situation serait - être plus détérioré sans le protecteur Le protecteur était utilisé autrefois et est encore utilisé pour protéger l'agriculture dans les zones désertiques.

## 1.7 conclusion

Après notre discussion de ce chapitre, nous nous sommes familiarisés avec le climat de la zone étudiée, ainsi que les caractéristiques qui prévalent, et nous connaissions les caractéristiques du vent, et enfin nous avons appris ce qui est causé par l'accumulation de sable dans la région d'étude.

# *CHAPITRE II : Influence de vent de sable sur les panneaux solaires*

## 2.1 Introduction

Les modules solaires photovoltaïques installés pour la production d'énergie sont fortement influencés par les conditions météorologiques telles que l'irradiation solaire, la température ambiante, la vitesse du vent, l'humidité et l'encrassement [21,22]. L'accumulation de poussière à la surface des modules PV est l'une des principales préoccupations, en particulier dans les zones arides où les conditions climatiques sont difficiles et les tempêtes de sable fréquentes. [23]

## 2.2 Facteurs environnementaux affectant les panneaux solaires

Divers facteurs environnementaux affectent les performances des systèmes PV tels que : L'irradiance solaire, le vent, l'humidité, la température, la poussière et la pollution.

### 2.2.1 Rayonnement solaire

L'intensité du rayonnement solaire reçue sur un plan quelconque a un moment donné ou bien la puissance reçue par une surface est appelée éclairement, il est exprimé en watts par mètre carré (W/m²) [24]. Le rayonnement solaire se présente sous la forme d'un rayonnement électromagnétique et se compose de plages de longueurs allant de 0,2 $\mu m$ (ultraviolet) à 10 $\mu m$ (infrarouge) [25].

Quand on place un module PV, la valeur de l'irradiance reçue sur leur surface varie selon la position de ce dernier. L'éclairement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module PV est perpendiculaire aux rayons du soleil... [26], L'énergie photovoltaïque est basée sur la conversion directe du rayonnement solaire en un courant électrique à l'aide de semi-conducteurs tels que le silicium cristallin. [3]

**Figure II.1:** Une photo montrant les panneaux photovoltaïques recevant le rayonnement solaire.

### 2.2.2 Température des modules

Une cellule PV convertit une petite partie, environ moins de 20 %, de l'irradiante en énergie électrique tandis que le reste est converti en chaleur. La surchauffe du module se produit principalement en raison d'un rayonnement solaire excessif et de températures ambiantes élevées [27,28]. La température du module est un paramètre qui a une grande influence sur le comportement d'un système PV, car il affecte considérablement l'efficacité du système et la production d'énergie. L'effet principal de l'augmentation de la température de la cellule est sur la tension en circuit ouvert qui diminue linéairement avec l'augmentation de la température de la cellule. La tension de la cellule diminue d'environ 2,2 mV par augmentation de 1 °C de la température de fonctionnement et, par conséquent, l'efficacité diminue d'environ 0,5 % pour les cellules PV cristallines [29,30,31].

### 2.2.3 Le vent

Les modules solaires photovoltaïques installés pour produire de l'électricité sont fortement affectés par les conditions météorologiques et, comme ils ne sont pas posés à plat sur le sol, ils offrent une résistance au vent. Les petites vibrations du système causées par les rafales de vent sont importantes à long terme. À plus courte échelle, il n'est pas rare de voir des modules arrachés à leurs positions lorsque le vent est très fort. Mais le vent peut avoir des aspects positifs car il facilite les échanges thermiques entre l'unité et l'extérieur, ce qui contribue à réduire sa température de fonctionnement [26] ainsi qu'à augmenter la puissance et l'efficacité en fonction de sa vitesse. Nous pouvons donc traduire l'effet du vent comme agent de ventilation pour la cellule du module PV et aussi comme solution de refroidissement qui améliore la production d'électricité à partir de panneaux solaires.

### 2.2.4 Ombre

La puissance de sortie des panneaux PV est réduite en raison de l'effet d'ombrage [32,33]. Non seulement les stores affectent le flux de courant dans les cellules ombrées, mais ils affectent également le flux de courant dans l'ensemble du panneau puisque normalement les cellules sont connectées et câblées en série. Les ombres peuvent être causées par des poteaux, des arbres et des bâtiments et peuvent également être causées par les structures de montage du module sur d'autres structures. Les feuilles, les oiseaux et les excréments d'oiseaux qui peuvent tomber directement sur les modules peuvent également provoquer des ombrages.

**Figure II.2:** Une photo montrant le reflet des ombres des arbres sur les panneaux photovoltaïques.

### 2.2.5 Humidité

Malgré le manque d'informations sur l'effet de l'humidité sur les performances quotidiennes des systèmes PV, il existe une étude effectuée par Al Hani et al [21]. Montrant un changement dans le comportement des systèmes à couches minces fonctionnant dans des conditions humides. La tension en circuit ouvert et le courant de court-circuit augmentent avec l'augmentation de l'humidité, la puissance de sortie maximale augmente également avec l'augmentation de l'humidité.

### 2.2.6 Pluie et rosée

La formation de rosée et chute de pluie se produisent fréquemment dans divers climats, compris dans les régions semi-arides propices au déploiement de cellules photovoltaïques. Les gouttelettes présentes sur le couvercle des cellules solaires peuvent affecter négativement la production d'énergie et l'efficacité des cellules en raison d'effets optiques. Pour les angles d'inclinaison $\theta i \leq 30^{\circ}$, les gouttelettes n'affectent pas les performances des cellules PV.

Cependant, pour les angles d'inclinaison $\theta i > 30^{\circ}$, la présence de gouttelettes a entraîné une diminution significative de la puissance maximale et de l'efficacité de conversion d'énergie des cellules PV, en particulier pour les grands angles de contact des gouttelettes et/ou la couverture de surface. Une telle dégradation des performances a été attribuée au fait que la lumière incidente était rétrodiffusée à travers les gouttelettes au lieu d'être piégée par une réflexion interne totale à l'interface couver air avant d'être finalement absorbée par la cellule solaire [34]. Ilse et al. [35] Il a été constaté que la présence de rosée augmentait l'adhérence de la poussière et des particules à la surface des cellules PV et réduisait ainsi leurs performances et augmentait les coûts de maintenance.

**Figure II.3:** Photo d'une cellule solaire PV recouverte de gouttelettes d'eau provenant de la rosée ou de la pluie. [34]

### 2.2.7 Encrassement

L'accumulation de poussière peut encrasser les panneaux solaires. Dans la plupart des cas, les surfaces des panneaux sont lessivées par les précipitations ; cependant, la saleté peut parfois rester même après de fortes pluies.

La partie la plus critique d'un module est le bord inférieur, en particulier avec de faibles inclinaisons où se produisent les salissures au bord du cadre. Cette saleté accumulée provoque un ombrage des cellules et réduit ainsi la puissance disponible d'un module généralement de l'ordre de 1% ; cependant le courant est rétabli si les modules sont nettoyés. [33,36,37]

**Figure II.4:** Exemple de module encrassé.

## 2.3. Effet du vent de sable sur les panneaux photovoltaïques

L'énergie solaire photovoltaïque peut être une solution, si elle est utilisée efficacement, pour assurer l'électrification, le pompage de l'eau et les communications dans des régions inaccessibles comme dans le sud de l'Algérie. Les panneaux solaires protégés par du verre fabriqué à ces fins sont cependant constamment exposés aux effets néfastes causés par les vents de sable. [38]

Ce vent de sable affecte de nombreux facteurs qui rendent l'efficacité des panneaux photovoltaïques à son maximum. Le plus important de ces facteurs est l'éclairement solaire, l'état de surface des panneaux (verre), la durée de vie de ces panneaux, l'ossature. L'image ci-dessous montre l'effet des vents de sable sur les panneaux photovoltaïques :

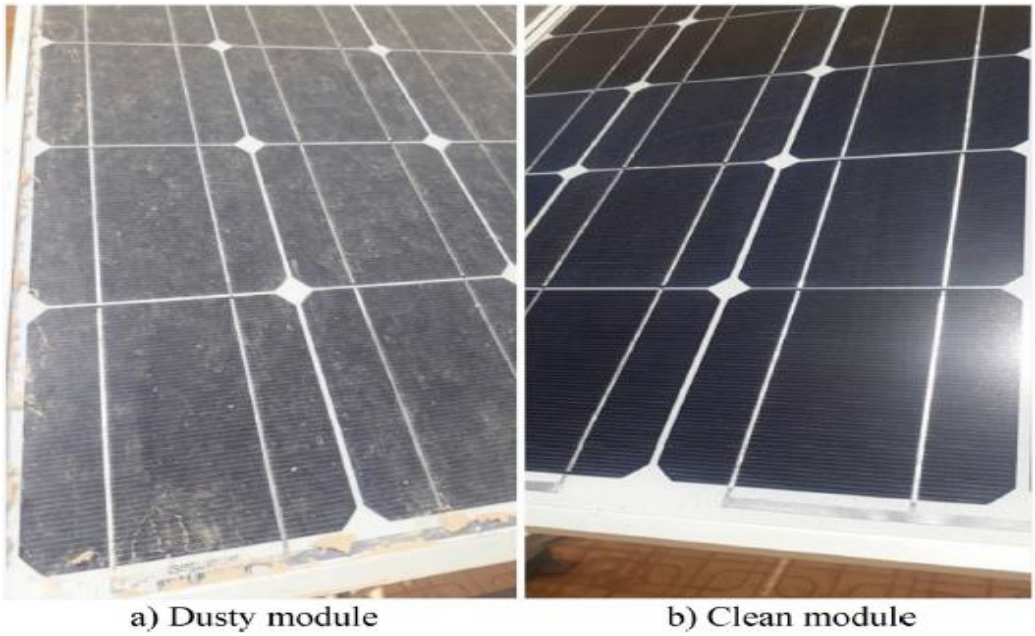



**Figure II.5:** Photographie de modules PV propres et poussiéreux. [3]

### 2.3.1 Effet du vent de sable sur l'éclairement solaire

Les caractéristiques physicochimiques de la poussière accumulée, de la vitesse du vent, de la durée d'exposition et de l'orientation du module PV jouent un rôle important dans le taux pollution [29,40], où le dépôt de poussière sur les surfaces du module PV diminue la transmissivité du couvercle en verre, ce qui conduit à une réduction significative de la quantité d'irradiation solaire reçue par les cellules solaires, entraînant une dégradation des performances de production d'énergie des modules solaires PV. [23-41]

La plupart des études ont montré que les particules plus petites, qui ont une surface spécifique, sont réparties plus uniformément, réduisant ainsi les vides entre les particules qui permettent le passage des rayons lumineux. Cela provoque une détérioration significative des

performances des modules PV par rapport à celle causée par les particules grossières de la masse de poussière. [42,43]

Il y a aussi la poussière atmosphérique qui disperse le rayonnement solaire, réduisant la quantité de rayonnement solaire direct atteignant l'élément de transmission de lumière des modules solaires. [23]

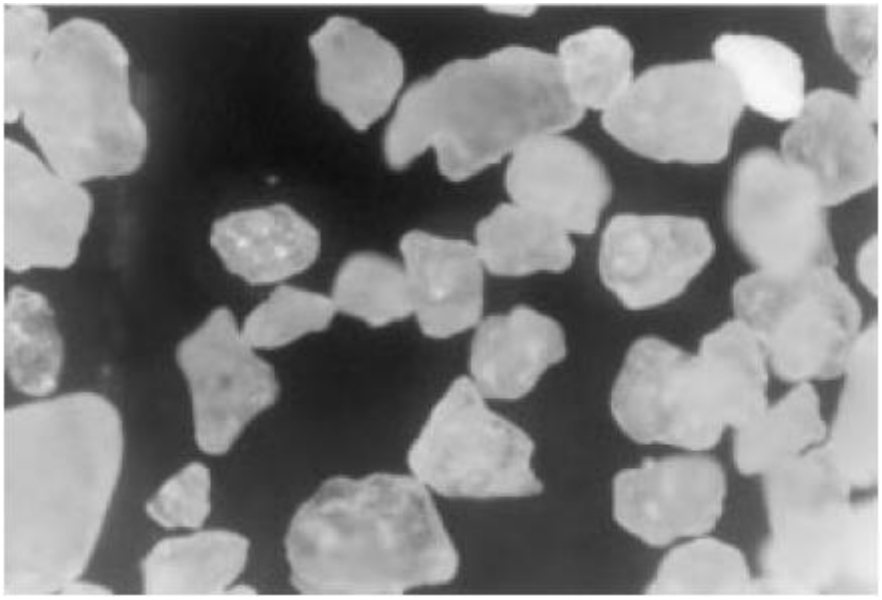


**Figure II.6:** Micrographie optique montrant les formes irrégulières des particules de sable. [38]

Le sable utilisé provient de la région désertique de Biskra (sud de l'Algérie). La forme des grains est irrégulière mais approximativement sphérique (Fig. 1). La taille moyenne des grains varie entre 95 et 780 mm.[38]

Cette distribution irrégulière de ces molécules affecte sur la surface du module PV ; d'où la puissance de sortie. Une densité de poussière (poids de la poussière divisé par la surface du module) de 6,184 $gm^2$ a été calculée pour une période d'exposition de dix mois (février à décembre). Plus la densité de poussière est élevée, moins la quantité de rayonnement solaire est transmise à travers le couvercle en verre du module aux cellules solaires. [23]

### 2.3.2 Effet du vent de sable sur état de la surface

Dans un travail, réalisé par Bouaouadja et autres. [38] Ils ont étudié les effets du sablage sur l'efficacité des panneaux solaires, où ils se sont concentrés dans leurs travaux sur les effets de la durée du sablage (jusqu'à 300 minutes) sur les propriétés mécaniques et optiques du panneau de verre de protection local et l'efficacité des panneaux solaires.

Les observations de la surface exposée ont révélé le développement de petits cratères distribués au hasard, ainsi que la formation de petites fissures latérales. Sous l'action de

particules continues de sable, ces fines fissures se transforment en écailles (Fig.3) Ces microfissures latérales sur des matériaux fragiles sont le plus souvent causées par des particules tranchantes ou des particules contondantes avec des forces d'impact relativement élevées. Il semble également clair que les zones touchées étaient de tailles différentes. L'intensité et l'étendue de ces défauts de surface augmentent avec la durée d'exposition au sablage.

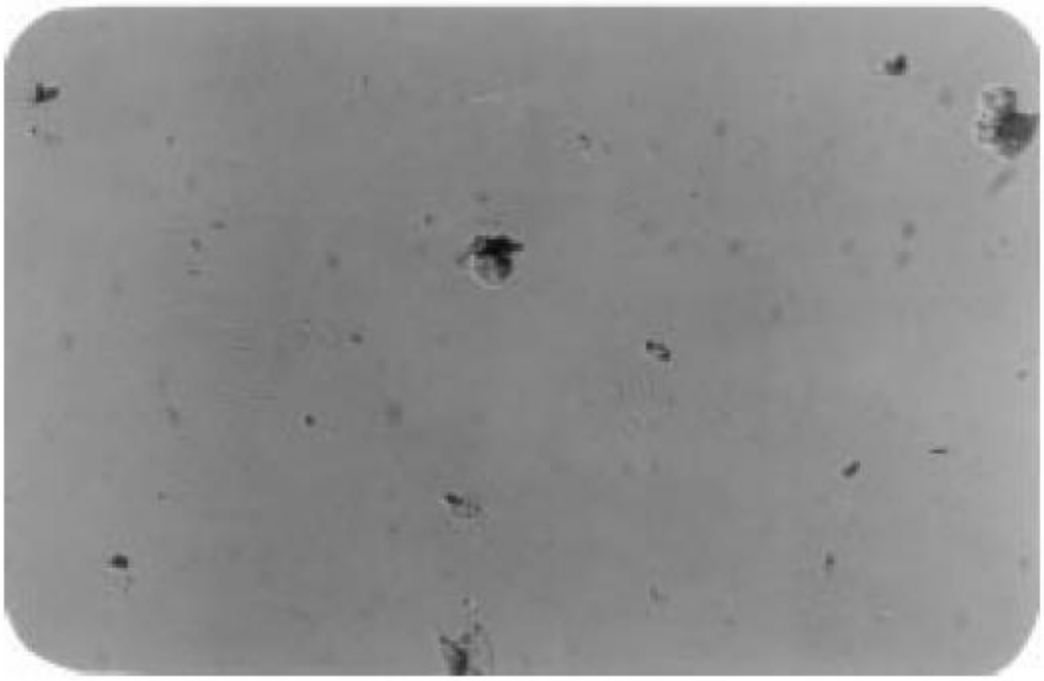


**Figure II.7:** Photographie optique d'une surface endommagée typique après une durée de 1 h. [38]

La variation de l'efficacité relative du panneau en fonction de la durée du sablage est illustrée à la Fig. 4. La légère baisse à 0,91 est principalement liée à la présence de défauts superficiels qui affectent la transmission de la lumière. [38]

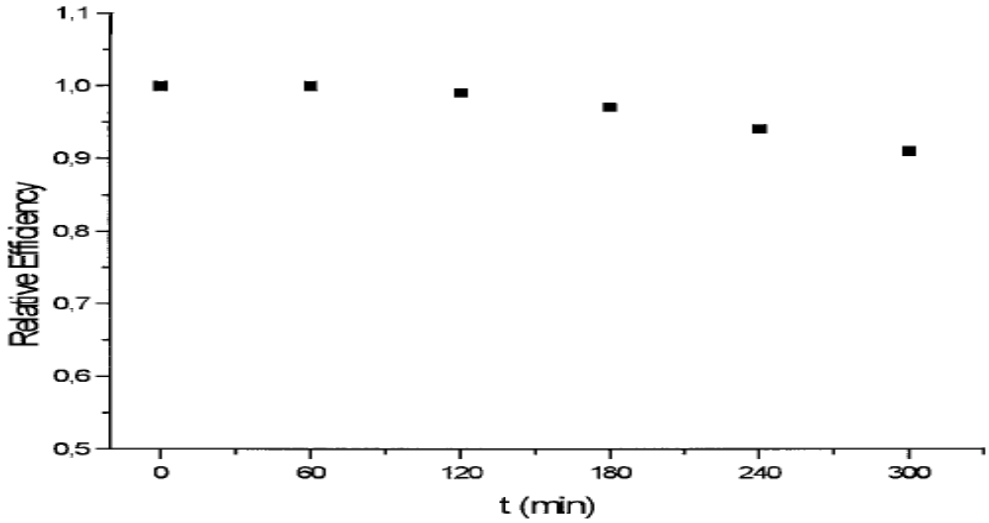



**Figure II.8:** Variation de l'efficacité relative en fonction de la durée du sablage. [38]

### 2.3.3 L'effet du vent de sable sur la durée de vie des panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques ont une durée de vie technique allant de 25 à 30 ans. Avec l'amélioration de la technologie de fabrication, la durée de vie des panneaux solaires peut atteindre 40 ans. [44]

Il existe plusieurs les raisons qui affectent la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Le premier est les dommages physiques causés par le vent, la grêle et le sable [45] ou, par exemple, des branches tombées en raison des conditions météorologiques [46]. La deuxième raison est la diminution continue des performances d'environ 0,5% à 3% par an en raison des cycles thermiques, de l'humidité et de l'exposition aux rayons ultraviolets [47]. Habituellement, ce déclin est le principal facteur limitant la durée de vie de la plaque à 20-30 ans.

Dans cette paragraphe, nous concentrerons sur l'effet des vents de sable sur les panneaux photovoltaïques car c'est l'objet de notre étude, plus précisément l'effet sur leur durée de vie. La surface des panneaux photovoltaïques ayant un verre de protection qui protège les cellules solaires qui convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique, ce verre n'est pas suffisant pour la protection car il est exposé aux dommages. Les dommages permanents causés par l'effet de sable constituent un autre obstacle majeur à l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques. Les dommages mécaniques sont principalement causés par l'interaction du sable et de la surface (effet de sable). Il a été démontré que l'effet du sable affecte non seulement la résistance mécanique de la surface et sa durabilité, mais peut également entraîner une perte de transmission optique par la formation de distorsions et de fissures locales qui réduisent la transmission lumineuse. [45]

Les dommages causés par les vents sableux sur les surfaces des panneaux, notamment des cellules solaires, se traduisent par une diminution du rendement des panneaux, et limitent ainsi la durée de vie de ces panneaux.

**Figure II.9:** Photo de panneaux photovoltaïques endommagés par un vent de sable.

## 2.4 Analyse bibliographique

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses études ont été menées pour déterminer l'effet des vents de sable sur les performances des modules solaires, Nous avons présenté dans cette partie une synthèse bibliographique des nombreux travaux menés dans ce domaine, dans lesquels les recherches se sont révélées aussi nombreuses et riches que prédominantes.

**- N. Bouaouadja et al (2000)**

Ce travail considère les effets de la durée du sablage (jusqu'à 300 min) sur les propriétés mécaniques et optiques de la feuille de verre de protection locale et l'efficacité des panneaux solaires. Le matériau utilisé est un verre sodocalcique feuilleté, fabriqué par ENAVA [6] (entreprise nationale des verres et abrasifs, Algérie). Les feuilles de verre ont été livrées dans leur état de réception avec une épaisseur de 3 mm. Des échantillons de verre de dimensions (50x20x3 mm) ont été préparés et trempés mécaniquement par échange ionique pendant 5h à 460°C.

Afin de simuler les effets de la durée des tempêtes de sable sur l'efficacité des cellules solaires, un appareil de soufflage de sable a été utilisé. Les essais d'érosion ont été réalisés avec une cible fixe impactée par des particules de sable accélérées dans un courant d'air par un ventilateur. La vitesse du souffleur d'air a été mesurée à l'aide d'un anémomètre et s'est avérée être de 20 m/s. l'angle d'impact a été fixé à 90° (c'est-à-dire que les surfaces des échantillons sont perpendiculaires au flux d'air).

Différentes durées de test (jusqu'à 300 min) ont été réalisées en utilisant des périodes de 60 min chacune. Enfin, les surfaces érodées ont été examinées avec un microscope optique « Neophot 21 ». Les résultats montrent que les rendements des panneaux solaires diminuent lors des tempêtes de sable, et certaines de ces diminutions sont permanentes lorsque les feuilles de verre protectrices sont endommagées par l'érosion [38].

**- A.Shaharin et al. (2011)**

L'objectif de cette recherche était d'étudier les effets de l'accumulation de poussière sur les performances des panneaux solaires photovoltaïques. Des expériences ont été menées en utilisant des particules de poussière sur des panneaux solaires avec une source lumineuse à puissance constante, afin de déterminer la puissance électrique générée et l'efficacité résultantes. L'étude a révélé que la poussière accumulée à la surface du panneau solaire photovoltaïque peut réduire l'efficacité du système jusqu'à 50 %. [54]

**- R. E. Cabanillas et H. Munguia (2011)**

Nous avons étudié expérimentalement les effets sur l'efficacité électrique de la formation naturelle de dépôts de poussière atmosphérique sur des panneaux photovoltaïques commerciaux. La variable considérée pour les mesures était le potentiel électrique de trois modules de silicium commerciaux : monocristallin, poly-cristallin et amorphe. Un modèle mathématique a été développé pour déterminer le potentiel maximal en fonction de la température et du rayonnement incident total. L'étude présente deux parties essentielles : les particules de poussière déposées naturellement et la variation du potentiel électrique maximal entre les modules propres et sales. Les résultats indiquent que la réduction maximale de potentiel est de l'ordre de 6% pour les modules monocristallins et poly-cristallins et de 12% pour le silicium amorphe. [52]

**- Shaharin Anwar Sulaiman et al. (2014)**

Le présent travail a été réalisé pour analyser les effets de l'accumulation de telles saletés ou particules (poussière, eau, sable et mousse) sur les performances de sortie des panneaux solaires. Des expériences utilisant différents matériaux d'obstruction ont été menées dans des conditions contrôlées en utilisant des projecteurs pour simuler la source de rayonnement solaire. Il a été constaté que la résistance externe pouvait réduire les performances photovoltaïques jusqu'à 85 %. [53]

**- J.Tanesab et al. (2015)**

Cette recherche étudie la contribution de la poussière à la dégradation des performances à long terme de divers modules photovoltaïques (PV) qui fonctionnent depuis près de dix-huit ans sans aucune procédure de nettoyage dans la zone d'essai extérieure des énergies renouvelables (ROTA), Université Murdoch, Perth, (Australie). Un analyseur de module solaire a été utilisé pour évaluer les performances électriques des PV, tandis qu'une combinaison de spectrophotomètre, microscope électronique à balayage, spectroscope à dispersion d'électrons

Et diffraction des rayons X a été utilisée pour examiner les propriétés de la poussière sur les panneaux. L'étude a révélé que la dégradation de la puissance de sortie des modules PV variait de 19 % à 33 %. [56]

**- M. Saidan et al (2016)**

Une expérience a été menée pour déterminer les pertes dues à l'accumulation de poussière à la surface de trois modules solaires photovoltaïques identiques à Bagdad, en (Irak).

Les unités sont installées avec une exposition directe aux conditions météorologiques. Ensuite, des mesures d'empoussièrement ont été prises sur les unités sur une base quotidienne, hebdomadaire et sur une base mensuelle, la densité de la poussière et la distribution granulométrique ont également été examinées. L'unité remplie de poussière et une unité propre similaire ont ensuite été exposées à un rayonnement constant et à une température constante en utilisant un simulateur solaire comme source de lumière. Le dépôt de poussière sur la surface des modules solaires PV a montré une réduction à la fois du courant de court-circuit (Isc) et de la puissance de sortie par rapport aux mêmes paramètres de module propre. Taux moyen de dégradation de l'efficacité des modules solaires exposés à la poussière ; 6,24 %, 11,8 % et 18,74 % calculés pour des périodes d'exposition d'un jour, d'une semaine et d'un mois. [50]

**- Y. Guan et al. (2017)**

Le dépôt de poussière affecte fortement les performances des modules PV ; par conséquent, dans cette étude, l'effet du dépôt de poussière sur la température du module, la transmission et la puissance de sortie des modules PV a été étudié de manière approfondie, en particulier en se concentrant sur la densité de dépôt de poussière. Les résultats ont montré que le dépôt de poussière réduisait non seulement la transmittance du panneau de verre PV, mais réduisait également la température du module, affectant ainsi la puissance de sortie du module PV. Grâce à une analyse des données de test, les relations entre la densité de dépôt de poussière et à la fois la transmission relative et le taux de puissance de sortie relatif ont été établies avec succès. De plus, l'expérience a élucidé que la transmission relative d'un module PV pouvait diminuer de 20 % en seulement 8 jours en raison du dépôt naturel de poussière. [55]

**- A. Gholami et al. (2017)**

Des études approfondies ont été menées, afin d'augmenter l'efficacité des capteurs solaires et des panneaux photovoltaïques. L'un des principaux problèmes des systèmes solaires dans les régions arides est l'accumulation de poussière sur les surfaces transparentes, suivie d'un coefficient de transmission très faible. Dans cette étude, au cours d'une période d'essai de 70 jours, jusqu'à 22 % de la perte de coefficient de transmission, causée par l'accumulation de poussière sur la surface, a été observée. [57]

**- A. Gholami et al (2018)**

Afin d'en savoir plus sur l'effet de l'accumulation de poussière sur les performances des cellules photovoltaïques à Téhéran, en (Iran), une expérience de 70 jours a été développée, qui a débuté le 9 mai 2017. L'équipement a été utilisé dans le Laboratoire des énergies renouvelables de l'Université Shahid Beheshti. Pour obtenir les données expérimentales. La chute de puissance a été mesurée ainsi que la puissance délivrée et réduite pendant la période de test. Pour des conclusions plus précises et générales, les courbes ont également été tracées en fonction de la densité de surface de la poussière. Les résultats indiquent qu'après 70 jours sans précipitations, 6,0986 (g/m2) de poussière se sont accumulées à la surface, provoquant une diminution de la production d'énergie de 21,47 (%). La réduction totale de l'énergie fournie était

De 289 kWh pour chaque 4 845 kW de capacité électrique. La réduction de cette quantité d'énergie propre équivaut à 3 hectares de forêt absorbant le carbone (32,7 tonnes) par mégawatt de capacité. [49]

**- M. Dida et al (2020)**

Dans cette recherche, l'effet de l'accumulation de poussière sur les performances des modules PV cristallins a été étudié expérimentalement dans des conditions extérieures dans un environnement saharien dans la ville de (Ouargla), au sud-est de l'Algérie. De plus, la production d'électricité d'une centrale photovoltaïque de 30 MW connectée au réseau installée dans la même zone avant, pendant et après une tempête de sable a été évaluée. Les résultats ont montré qu'environ 4,36 g/m2 de poussière s'accumulaient sur la surface du module PV après 8 semaines d'exposition à l'extérieur sans nettoyage. Cela a entraîné une baisse de la production d'énergie PV de 8,41 %, 6,10 % et 0,51 % de la puissance de sortie maximale, du courant de court-circuit et de la tension de circuit ouvert respectivement par rapport à un module PV nettoyé. De plus, la poussière déposée sur la surface des modules PV de cette ferme à cause de cette tempête de sable a entraîné une réduction de 32 % de l'énergie générée (soit 5,18 MWh). [3]

**- H.A.Kazem et al (2020)**

Le système photovoltaïque connecté au réseau a été testé et inspecté pendant une année entière sous le climat désertique affiché dans l'État d'Oman. Le système contient 1,4 kW de PV et un onduleur de 1,7 kW. La poussière est l'un des principaux facteurs affectant les performances, la productivité et la rentabilité du photovoltaïque connecté au réseau. Dans cet article, un modèle proposé prend en compte l'effet de la poussière sur les performances photovoltaïques connectées au réseau d'une nouvelle manière. Les résultats montrent que le

modèle proposé a prédit avec précision les performances du système et a été validé par les résultats expérimentaux. Cependant, il a été constaté que l'efficacité du photovoltaïque, de l'onduleur et des performances sont respectivement de 10,80%, 94,00% et 73,00%. En outre, le facteur de production moyen est de 141,39 kWh/kW et le facteur de capacité est de 19,64 %. [48]

**- S. Ali Sadat et al (2021)**

Étant donné que l'encrassement est un problème spécifique au site, cet article effectue pour la première fois des expériences contrôlées pour déterminer les caractéristiques d'un échantillon de poussière de la région désertique d'Iran et son impact sur l'efficacité énergétique des modules solaires photovoltaïques. Des expériences de caractérisation des poussières sont réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Les résultats élémentaires ont montré que l'échantillon de poussière est principalement composé d'éléments Si, O, Al et Ca. De plus, des expériences en intérieur ont révélé que les particules de poussière ont des formes et des tailles différentes (de 0,4 $\mu m$ à 31 $\mu m$). Lorsque la densité de poussière passe d'une cellule propre à des conditions d'ombrage presque sombres, il a été observé que l'efficacité de conversion, la puissance maximale normalisée photovoltaïque, le courant de circuit ouvert et le courant de court-circuit sont diminués de 98,2 % (non linéaire), 98,13 % (non linéaire), 20,63 % (linéaire) et 98,02 % (non linéaire), respectivement. De plus, les résultats ont montré que le processus de salissure n'a pas d'impact significatif sur le facteur de remplissage en raison de la dispersion uniforme de la poussière sur le module PV. [51]

## 2.5 Conclusion

L'effet des facteurs climatiques, y compris les vents sablonneux, sur l'efficacité des panneaux solaires, car il a été constaté que les vents sablonneux ont un effet important sur plusieurs facteurs qui rendent les panneaux à leur productivité maximale, notamment : L'effet sur l'éclairage solaire en empêchant son accès aux panneaux en plus de l'effet des vents de sable sur le verre des panneaux, car cela provoque des fissures au niveau de la surface et le vent de sable affecte également la durée de vie des panneaux solaires

# *CHAPITRE III : Simulation numérique de l'écoulement de vent de sable*

## 3.1 Introduction

L'objectif de ce travail est d'étudier la protection des panneaux solaires contre le vent de sable et d'analyser le comportement aérodynamique de l'écoulement du vent autour d'un obstacle vertical afin de protéger cette installation. Les équations régissant l'écoulement d'air dans les régimes laminaires et turbulents doivent être résolues à l'aide de modèles numériques CFD. La simulation numérique est réalisée à l'aide du code commercial ANSYS Fluent.

Dans ce qui suit, seront décrits la construction de la géométrie du cas étudié, la génération de son maillage ainsi que l'incorporation des conditions aux limites

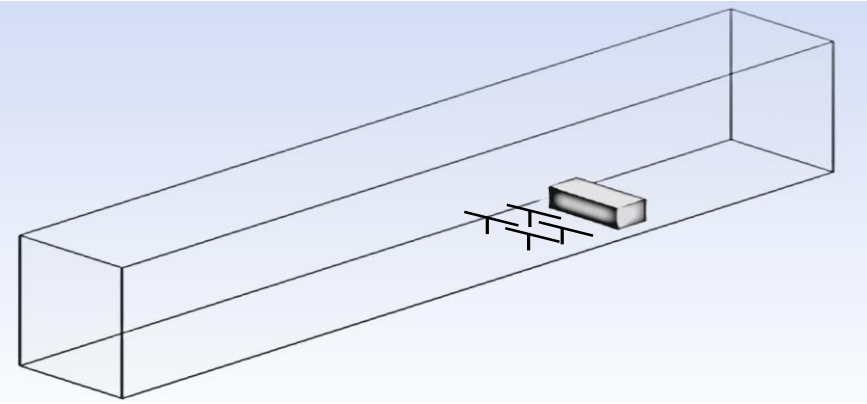


**Figure III.1** Exemple d'un champ photovoltaïque de 32 PV (de 300 w, avec les dimensions 1.5×0.7m) montés en deux rangés

## 3.2 Formulation géométrique du problème

La figure 3.2 illustre le modèle d'obstacle utilisé, tel que H : est la hauteur de l'obstacle, W : la largeur de l'obstacle, et B est l'épaisseur de l'obstacle [59].

Le phénomène physique considéré représente un obstacle vertical de 25mm de hauteur, de 50mm de largeur et de 20 mm d'épaisseur situé dans un domaine libre délimité par des frontières virtuelles.

Dans un cas réel l'obstacle est un mur dont les dimensions sont les suivantes :12m de hauteur et 24m de largeur (avec ratio de 480 fois).

La configuration géométrique traitée est présentée ci-dessous :

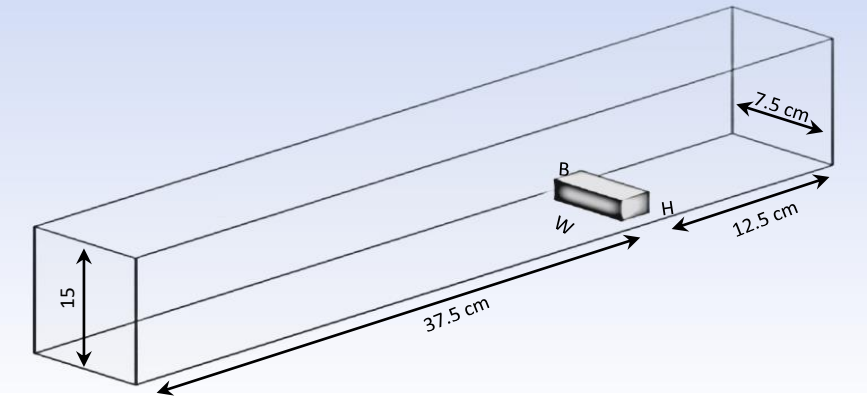



**Figure III.2 :** Configuration géométrique du problème étudie

La vitesse du vent est généralement exprimée en m/s, mais en météorologie, elle peut être également exprimée en Km/h ou en nœuds. Comme le vent est un paramètre météorologique affecté de fluctuation aléatoire, la valeur qui est donnée dans les bulletins météorologiques est la vitesse moyenne établie sur une période de 10 minutes.

## 3.3 Conditions aux limites

La figure 3.2 représente les conditions aux limites pour le domaine de calcul

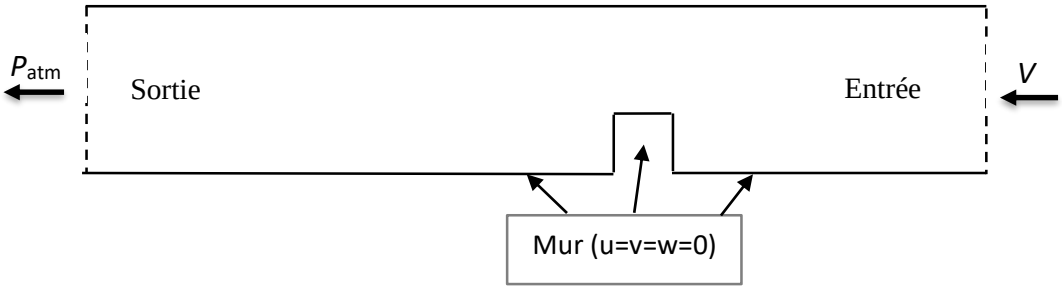



**Figure III.3 :** Condition aux limites

L'analyse des résultats de la vitesse du vent mensuelle de la station météorologique de Ouargla durant la période 2016-2019, montre que la vitesse de vent atteint leur maximum durant la saison printanière (Mars, Avril et Mai) et estivale (Juin, Juillet et Août) provoque dans cette période le sirocco et/ou des vents de sable.

Le dépôt de poussière sur les surfaces des PV diminue la transmissivité de la couverture en verre, ce qui entraîne une réduction significative de la quantité d'irradiation solaire reçue par les cellules solaires. La plupart des études ont montré que les particules plus petites sont réparties plus uniformément, réduisant ainsi les vides entre les particules qui permettent le passage des rayons lumineux [23]. Donc les particules utilisées pour la simulation sont des particules de sable fin a très fine (sable de dune de Ouargla).

Finalement, nous aboutissons au modèle mathématique. Ce dernier est alors constitué d'un système d'équations, cerné par des conditions aux limites. Il s'agit d'un système complexe possédant des équations qui sont issues de la thermodynamique et de la mécanique des fluides. Les équations de bilan sont donc connues. La résolution analytique de ces équations n'est pratiquement jamais obtenue.

En effet, l'utilisation des méthodes numériques sera pratiquement nécessaire pour la résolution des équations de bilan. Pour notre problème, on a employé le logiciel ANSYS Fluent basé sur la méthode des volumes finis, et pour la création de la géométrie et le maillage, on a utilisé ANSYS Design Modeler and ANSYS Meshing.

## 3 .4 Hypothèses Simplificatrices

Afin de rendre le modèle de calcul plus détaillé et plus précis, il faut introduire certaines hypothèses simplificatrices, qui se sont réparties comme suit :

1. Ecoulement stationnaire, turbulent, et fluide incompressible
2. L'écoulement est en 3D.
3. Le fluide est visqueux et newtonien.
4. Le profil de vitesse à l'entrée est constant.
5. Le transfert thermique par tous les modes est négligeable.

## 3. 5 Principe de la méthode des volumes finis

Pour un but de discrétiser les équations de la modélisation utilisées dans notre problème, fluent utilise pour cela la méthode des volumes finis.

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie dans tous les volumes finis ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation telle que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes où chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations, on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisantes sur chaque volume de contrôle où les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle.

Ces équations algébriques produites expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul.

## 3.6 Les équations Régissantes

Un écoulement établi, stationnaire, tridimensionnel, d'un fluide incompressible, newtonien autour d'un obstacle est caractérisé par les équations suivantes :

- **Équation de continuité:** $\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}+\frac{\partial W}{\partial z}=0$
- **Équation de quantité de mouvement :**

-Suivant l'axe x : $\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}u+\frac{\partial u}{\partial y}v+\frac{\partial u}{\partial z}w\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2})$

- Suivant l'axe y : $\rho\left(\frac{\partial v}{\partial x}u+\frac{\partial v}{\partial y}v+\frac{\partial v}{\partial z}w\right)=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2})$

-Suivant l'axe z : $\rho\left(\frac{\partial w}{\partial x}u+\frac{\partial w}{\partial y}v+\frac{\partial w}{\partial z}w\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\rho g_z$

## 3.7 Le maillage

Fluent traite plusieurs types de maillages très compliqués qui sont en général importés directement d'autres logiciels de génération de maillages Pour l'utilisation correcte de Fluent et pour connaître le lien entre les nœuds (cellules) ciblées et les nœuds (cellules) ou faces voisines, il est à noter que Fluent mentionne (dans ses mécanismes internes) les points avec les indices i, j, k, l....etc. En plus, il donne des topologies de certaines grilles qu'il accepte de résoudre selon le problème posé.

Sachant que le maillage utilisé influence considérablement la précision des résultats, plusieurs maillages ont été testés. En conséquence, des maillages structurés et non structurés, avec des nombres de nœuds allant de 246302 à 1146052 nœuds ont été sélectionnés.

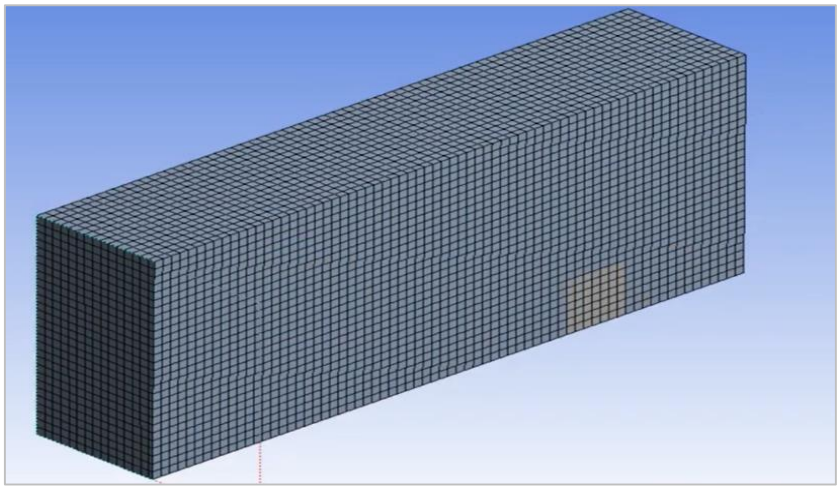


**Figure III.4** : Schémas de maillage Hexaédriques

## 3.8 Le code ANSYS Fluent

ANSYS Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles structurées et non structurées produites grâce à des géométries complexes avec une facilité relative. Les mailles supportées en 2D sont de types triangulaires ou quadrilatéraux. Elles sont tétraédriques/hexaédriques/pyramidales en 3D ou des mailles (hybrides) mélangées.

Le code "Fluent" est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En plus, il utilise une architecture

qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés, pour une exécution plus efficace.

"Fluent" s'utilise à travers une interface graphique très simple. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu afin d'automatiser certaines procédures. Ainsi, il a la capacité de modéliser :

- Les écoulements 2D ou 3D.
- Etats permanents ou transitoires
- Ecoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes
- Ecoulements non visqueux, visqueux, laminaires ou turbulents
- Les écoulements dans les milieux poreux

Ce code de calcul utilise la méthode des volumes finis. La discrétisation des équations intégrales qui gouvernent l'écoulement, tels que l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie associées à d'autres scalaires dépendants de la nature de l'écoulement, est faite en se basant sur la technique du volume de contrôle. Elle consiste à:

- La division du domaine en des volumes de contrôle discrets en utilisant un maillage de cellules.
- L'intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels afin d'établir les équations algébriques pour les variables dépendantes discrètes (les inconnues), telles que les vitesses, les pressions, les températures et les scalaires conservés.
- La linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant pour pouvoir adapter les valeurs des variables dépendantes

### 3.8.1 Choix du schéma de discrétisation

Le code Fluent nous permet de choisir le schéma de discrétisation pour les termes convectifs de chaque équation gouvernante. Pour nos simulations, le schéma second ordre upwind a été choisi pour la quantité de mouvement et le schéma du premier ordre a été choisi pour l'énergie cinétique turbulente à cause de la difficulté pour atteindre la convergence avec le schéma du second ordre (ANSYS tutoriel).

Les schémas de discrétisation utilisés dans le présent travail sont résumés comme suit :

| | |
|---|---|
| Pression | Standard |
| Quantité de mouvement | Second ordre upwind |
| Couplage vitesse-pression | Coupled |
| Energie cinétique turbulente | First ordre upwind |

### 3.8.2 Modèle de phase discrète (DPM)

Le modèle DPM suit le mouvement des particules, les mêmes principes s'appliquent que l'objet soit une particule solide ou une gouttelette liquide.

La trajectoire de chaque particule est calculée sur un grand nombre d'étapes lors de son passage dans le domaine d'écoulement. Puisque nous connaissons la masse volumique et la taille des particules (sable de dune et poussière), à chaque étape, le solveur peut calculer l'équilibre des forces agissant sur elles. Intégrée sur le domaine d'écoulement, la trajectoire globale peut être déterminée.

Contrairement à la phase continue (air) où la matière s'écoule à travers les cellules de la grille, le DPM déplace les particules où chaque particule a sa propre coordonnée x, y, z.

Dans ce cas les particules sont inertes, mais le DPM supporte aussi les cas complexes où les particules peuvent s'évaporer.

### 3.8.3 Initialisation

Avant de commencer les simulations, nous devons implémenter une estimation initiale de la solution du champ d'écoulement. Le choix adéquat des conditions initiales permet d'atteindre une solution stable et une convergence accélérée.

### 3.8.4 Méthode de la solution

Les problèmes des écoulements permanents sont souvent résolus par un processus pseudo temporel ou un schéma itératif équivalent puisque les équations sont non linéaires. Un schéma itératif est utilisé pour les résoudre.

Ces méthodes utilisent une linéarisation successive des équations et les systèmes linéaires résultants sont généralement résolus par des techniques itératives. La méthode suivie pour atteindre la solution doit avoir certaines propriétés qui sont brièvement résumées dans ce qui suit.

#### 3.8.4.1 La consistance

La discrétisation doit être exacte quand $\Delta xi$ (incrémentation dans l'espace) tend vers zéro, l'erreur de troncature est la différence entre l'équation discrétisée et la solution exacte. Pour qu'une méthode soit consistante, l'erreur de troncature doit tendre vers zéro quand le $\Delta xi$ tend vers zero.

#### 3.8.4.2 La stabilité

La méthode ou le schéma de discrétisation est stable quand il n'amplifie pas les erreurs au cours du processus de la solution numérique.

#### 3.8.4.3 La convergence

Pour les problèmes non linéaires qui sont fortement influencés par les conditions aux limites, la convergence et la stabilité sont généralement atteints et contrôlées en utilisant de l'expérimentation numérique.

#### 3.7.4.4 La conservation

Puisque les équations à résoudre obéissent aux lois de conservation, le schéma numérique doit être aussi. Ceci veut dire que les quantités conservées qui quittent un volume fermé doivent être égales aux quantités entrantes dans le cas stationnaire. Cette propriété est très importante puisqu'elle impose une contrainte sur l'erreur de la solution.

#### 3.8.4.5 Bornes à ne pas dépasser

La solution numérique doit être liée à ses propres limites (bornes), les quantités physiquement non négatives telles que la densité et l'énergie cinétique turbulente doivent toujours être positives. Cette propriété est difficile à garantir surtout quand les mailles sont grossières. Les schémas du premier ordre garantissent parfois cette propriété.

#### 3.8.4.6 Réalisabilité

Les modèles des phénomènes qui sont très difficiles à traiter directement (par exemple, la turbulence, la combustion, ou l'écoulement bi phasique) doivent être désignés pour garantir la réalité physique des solutions. Ce n'est pas une issue numériquement intrinsèque mais les modèles qui ne sont réalisables peuvent avoir comme conséquence des solutions non physiques ou bien causer la divergence pour des méthodes numériques.

#### 3.8.4.7 Exactitude

Les solutions numériques des problèmes d'écoulement de fluide et du transfert de chaleur sont des solutions approximatives. En plus aux erreurs qui peuvent être introduites au cours du développement de la solution de l'algorithme, en programmant ou en introduisant les conditions aux limites, il y a inclusion de trois types d'erreurs systématiques :

-Erreurs dues à la modélisation qui sont définies comme étant la différence entre l'écoulement actuel et la solution exacte du modèle mathématique.

- Erreurs dues à la discrétisation et définis comme étant la différence exacte entre la solution exacte des équations de conservation et la solution exacte du système d'équations algébriques obtenues par discrétisation de ces dernières.

- Erreurs dues à l'itération définie comme étant la différence entre les solutions itératives et exactes du système d'équations algébriques.

Le tableau III.1 représente les différentes caractéristiques de la simulation dans notre cas

**Tableau III.1** Différentes caractéristiques de la simulation

| | |
|---|---|
| Fluide | Air |
| Densité | 1.225 kg/m$^3$ |
| Diamètre des particules | 0.05 à 0.25mm |
| Densité des particules | 1644 kg/m$^3$ (sable de dune de Ouargla) |
| Viscosité de l'air | 1.46 10$^{-5}$ m²/s |
| Pression de référence | 101320 Pa |
| Vitesse à l'entrée | Variable (m/s) |
| Reynolds | 2.98 10$^4$ à 5.03 10$^4$ |
| Modèle turbulent | k-ε Réalisable |
| Nombre des nœuds | 246302 à 1146052 Nœuds |
| Critères de convergences | 10$^{-5}$ |
| Nombre d'itérations (convergence) | 380 à 4339 Itérations |

## 3.9 Validation des résultats

La figure 3.4 illustre les profils de la vitesse longitudinale en fonction de la hauteur en l'absence des obstacles, issues des résultats du travail de Luo et al [59]. Ainsi, les résultats du présent travail. Nos résultats semblent être assez proches. On outre, la couche limite se développe progressivement à peu près sur le même intervalle compris entre z/H=0.5 et z/H =4,2

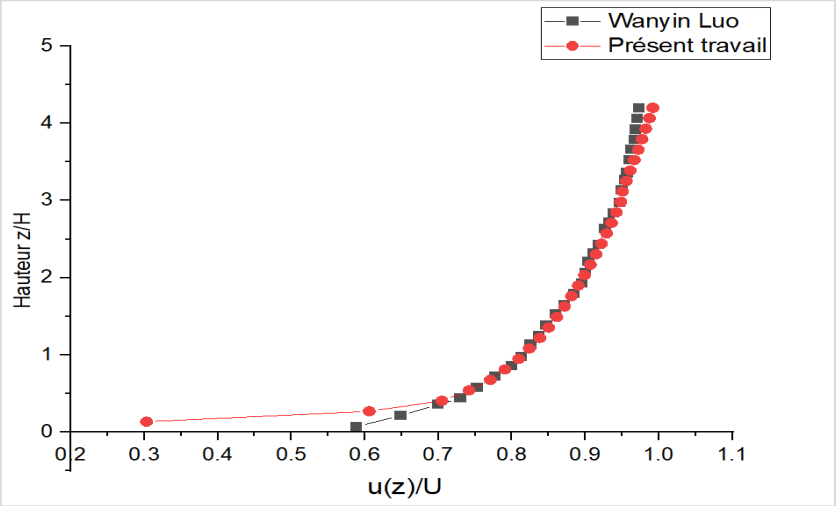



**Figure III.5 :** validation des résultats

## 3.10 Validation de maillage

Des essais numériques avec des grilles de maillage ont été effectués pour des nombres d'éléments égal à 246302 nœuds, 415434 nœuds, 555452 nœud, 785022 nœud et 1146052 nœuds (figure III.5).

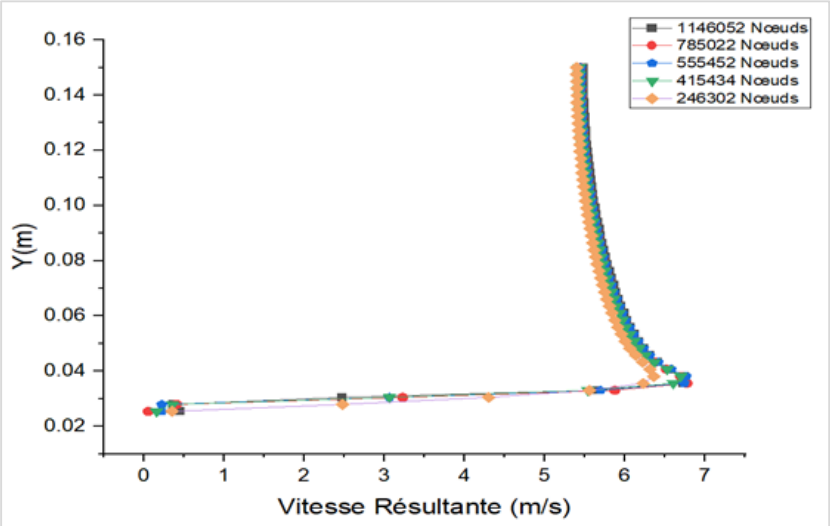



**Figure III.6 :** Influence du maillage sur la vitesse résultante au milieu de l'obstacle

Cette figure montre clairement que la variation sur la vitesse résultante est négligeable. Donc, les résultats obtenus sont également indépendants du maillage. En effet, On a choisi la grille 415434 pour la suite de notre simulation, et cela est justifié par la différence négligeable sur les résultats et pour accélérer la simulation numérique.

## 3.11 Résultat et discussion

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de la simulation numérique obtenus par le code de calcul utilisé. Notre problème port sur l'étude du comportement aérodynamique d'un écoulement turbulent de vent de sable dérangé par un obstacle vertical situé dans un domaine libre afin de protégé une installation photovoltaïque en aval.

Les vitesses de vent utilisées pour la simulation sont les vitesses de vent moyennes par mois de l'année 2019 données par la station météorologique de Ouargla.

**Tableau III.2 :** Vitesses moyennes mensuelles de vent pour l'année 2019 dans la région d'étude(O.N.M.Ouargla)

| Mois | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Août | Septembre | Octobre | Novembre | Décembre |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vitesse de vent (m/s) | 2.9 | 3.8 | 4 | 4.1 | 4.5 | 4.9 | 3.6 | 3.7 | 3.6 | 2.9 | 3.1 | 2.9 |

Comme cité précédemment la vitesse de vent atteint leur maximum durant la saison printanière (Mars, Avril et Mai) et estivale (Juin, Juillet et Août), ces valeurs sont montrées dans le tableau ci-dessus. La vitesse de vent du mois de février est important mais ce mois est caractérisé par une précipitation et humidité importante (Chapitre 1).

La vitesse de vent importante dans les mois de Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet, et Août provoque dans cette période le sirocco et/ou des vents de sable, pour cette raison la simulation numérique est concentrée sur ces mois.

Les sections qui ont été choisis pour calculer les profils de vitesse de vent pour chaque mois sont comme suit :

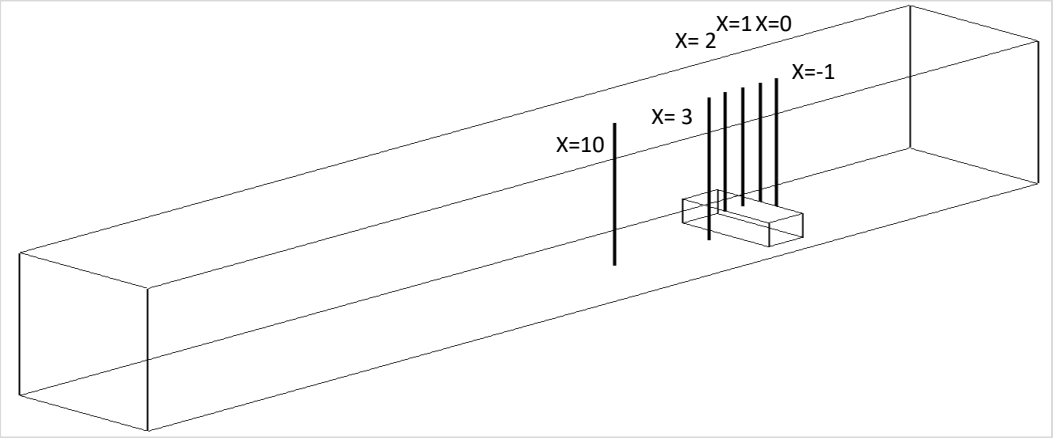



**Figure III.7 :** Sections de calcul.

### 3.11.1 Particules piégées par l'obstacle

La figures 3.7 illustre la courbe de variation de la quantité des particules piégées par l'obstacle pour chaque mois de l'année 2019. La quantité totale des particules injectées à l'entrée du domaine est égale à 11346 particules qui est le nombre des diamètres des particules choisis (6 différents diamètres) fois le nombre des surfaces à l'entrée (1891).

La courbe ci dissous montre que la variation de quantité des particules piégées par l'obstacle est inversement proportionnelle à l'augmentation de la vitesse de vent pour chaque mois. Cette quantité des particules est maximale au mois de Janvier (1501 particules) avec une faible vitesse de vent de 2.9 m/s et minimale au mois de Juin (1304 particules) avec une vitesse de vent importante de 4.9 m/s. Cela parce que cela la force de flottabilité surmonte la force de gravité.

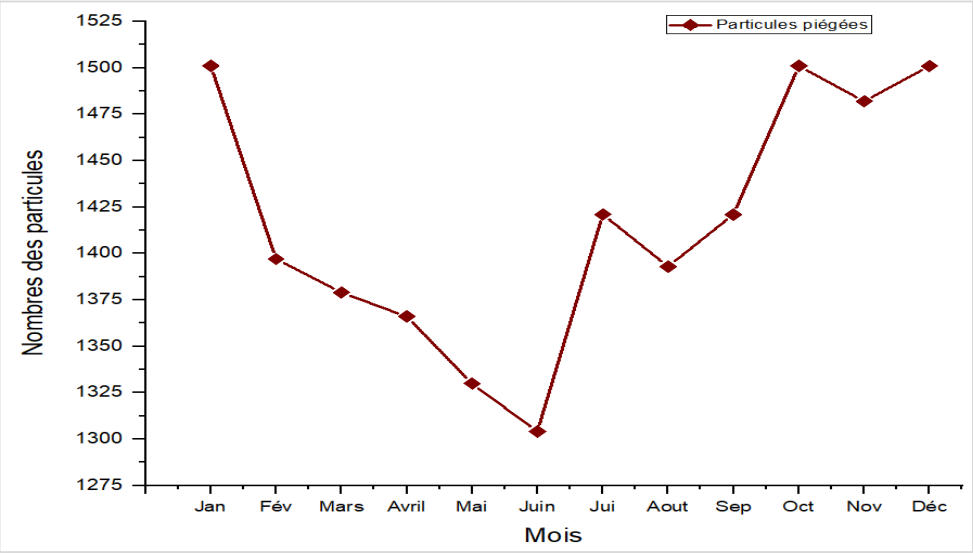



**Figure III.8 :** Particules piégées par l'obstacle pour chaque mois

### 3.11.2 Contour de la vitesse résultante et trajectoire des particules

La figure (III.8) représente les contours de vitesse de l'air et les trajectoires des particules injectées dans le domaine de calcul pour les six mois de Mars à Août de l'année 2019 dans le plan longitudinal au milieu de l'obstacle. Le nombre de trajectoires choisis est 30 trajectoires pour des différentes tailles des particules et ça pour mieux voir les parcours des particules de l'entrée à la sortie du domaine.

On remarque que l'apparence générale des contours est semblable, mais les valeurs de vitesses dans des points similaires sont différents. Cette différence s'explique par le faite que chaque mois a sa propre valeur de vitesse. On remarque une augmentation sur la vitesse au-dessus de la première arrête qui indique le point de décollement. La zone de recirculation est

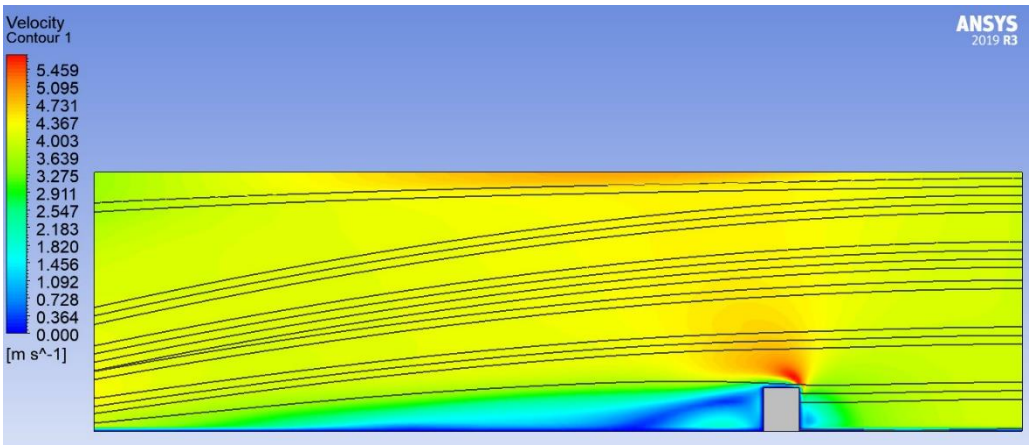
caractérisée par l'apparition des vitesses négatives sur l'échelle de la vitesse longitudinale contrairement au vitesse résultante qui comporte uniquement des vitesses positives.

La forme des trajectoires montre que le point de chute des particules dépend de la vitesse du vent. Ce phénomène dépend de la vitesse de vent c.-à-d. que plus la vitesse du vent est importante, la particule est plus éloignée de l'obstacle et le nombre des particules est plus élevées.

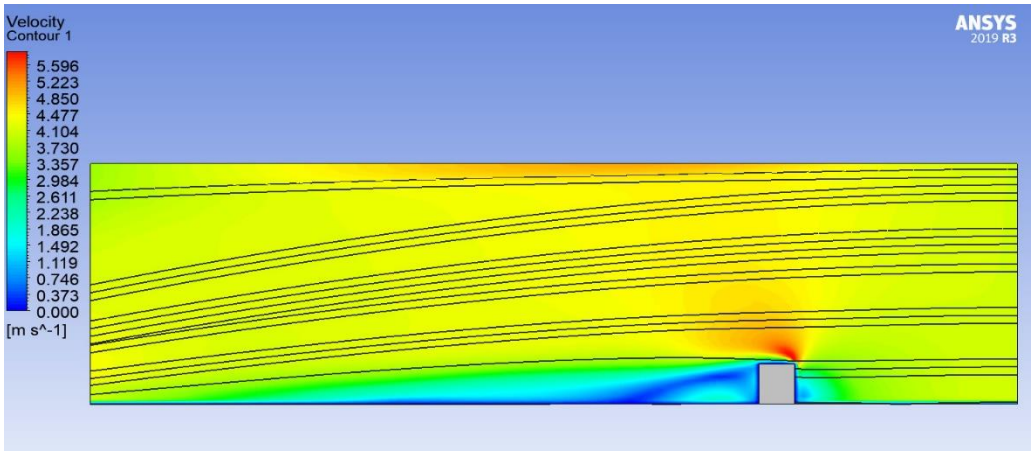
Les particules piégées par l'obstacle représentent entre 11.5 % à 13 % de nombre total des particules, malgré que le domaine de calcul est ouvert dans les deux côtés de bots de l'obstacle.

Donc l'obstacle aide à minimiser l'affectation des modules photovoltaïques installés en aval, qui vienne de la poussière et le sable du désert. Ainsi, la présence de l'obstacle va protéger les panneaux solaires contre les hautes vitesses de vent, et va dévier les particules solides relativement loin des panneaux photovoltaïques.

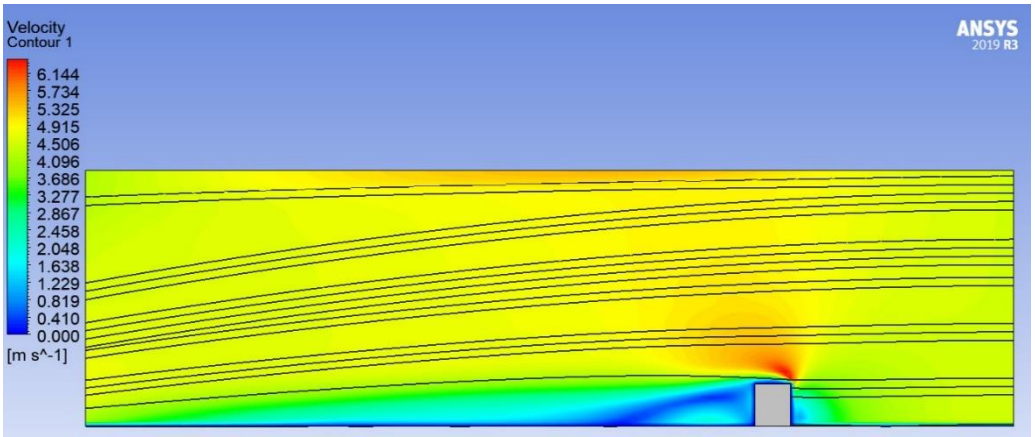
Mars



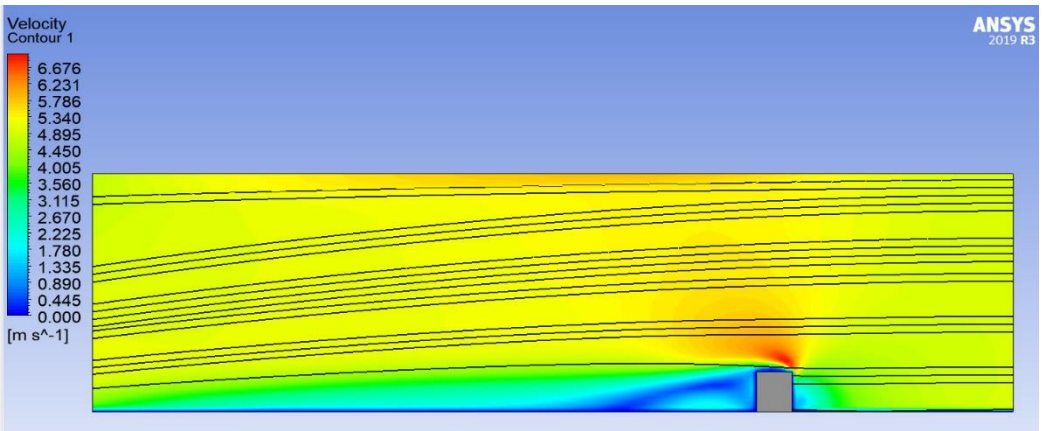

Avril



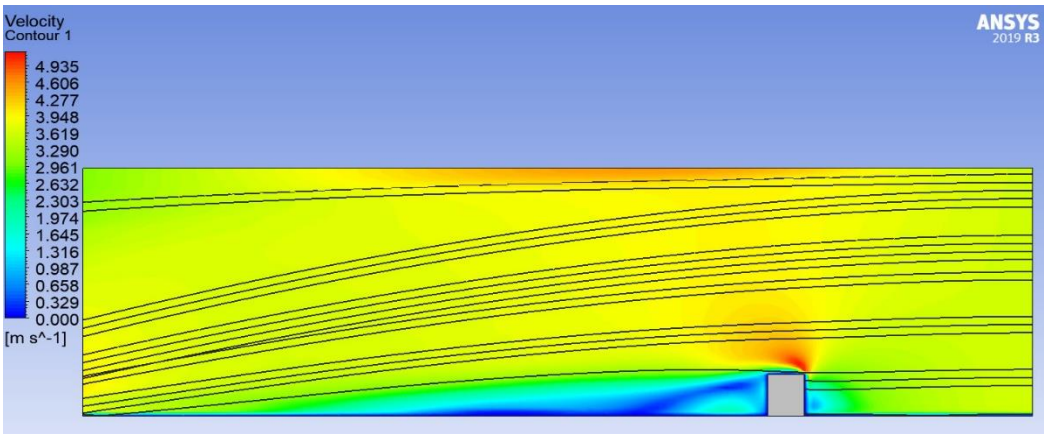
Mai




Juin




Juillet




Août

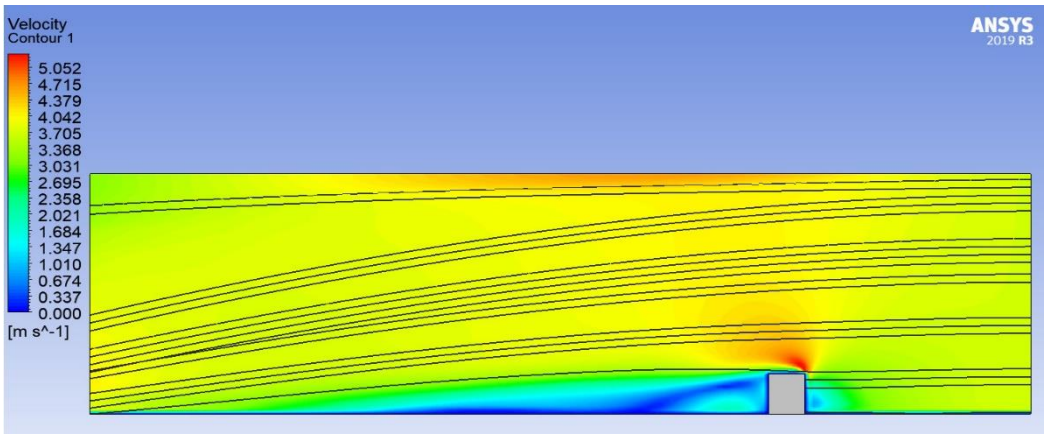



**Figure III.9** Contours de la vitesse résultante et trajectoire des particules pour les mois de Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet et Août

### 3.11.3 Profil de la vitesse résultante

La figure 3.9 illustre les profils de la vitesse résultante pour des différents points en amont, en aval et au milieu de l'obstacle. Les allures de ces courbes sont semblables et les valeurs maximales de la vitesse sont toujours obtenues au mois de Juin.

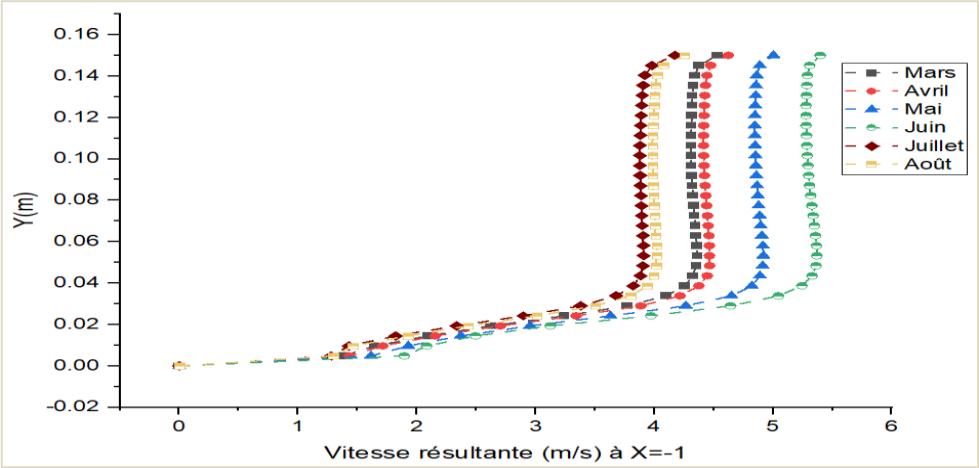
Au voisinage latérale des parois de l'obstacle les vitesses sont presque nulles cela peut être expliqué par la naissance des écoulements secondaires qui peuvent engendre des zones de recirculation qu'ils sont apparus sur la figure d'une façon superposée ; la formation correcte de la couche limite traduit la coïncidence de cette zone (x=-1 cm) et l'accumulation des particules avec la première arrête de l'obstacle. En montant vers le haut, une stabilisation sur les vitesses est observée.

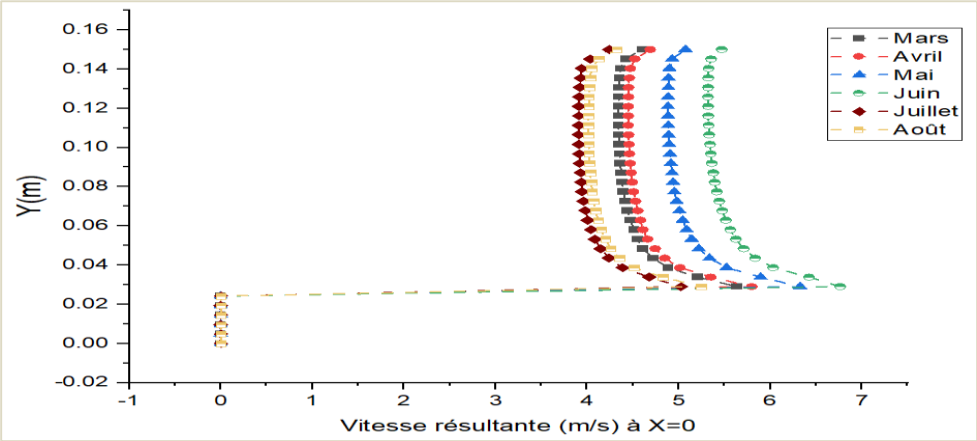
Sur la section x=0 ; les valeurs de la vitesse sont élevées juste au-dessus de l'obstacle puis on assiste une diminution de la vitesse, chose qui traduit par l'existence du point de décollement sur cette zone.

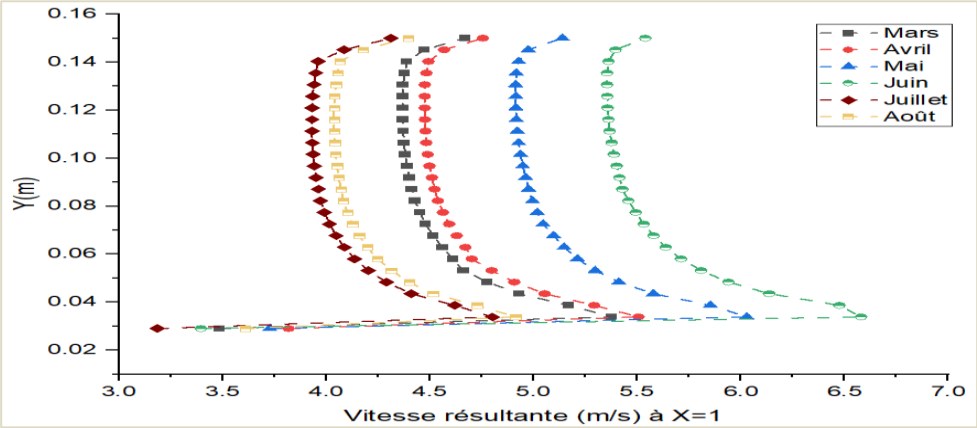
Au milieu de l'obstacle (x=1 cm) la couche limite se développe progressivement sur la paroi supérieure elle est compris entre y=0.03 m et y=0.04 m, les vitesses attient leurs valeurs maximales puis diminue, en suite elles se stabilisent.

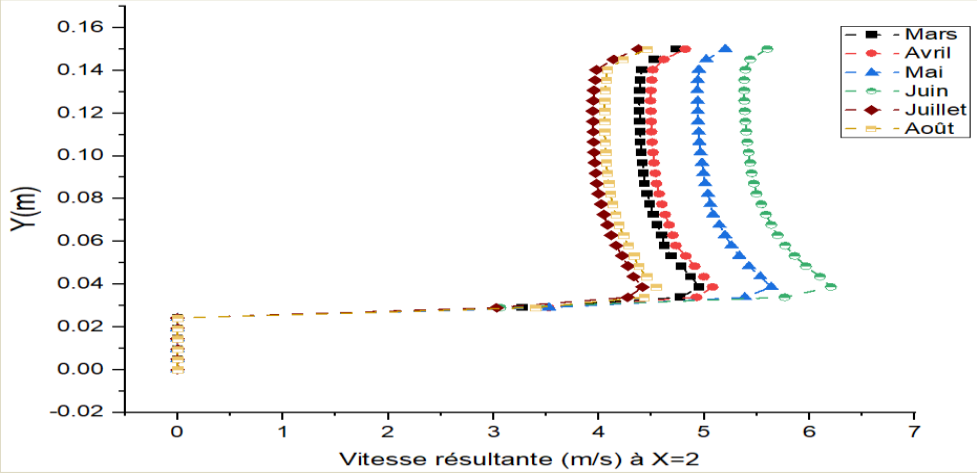
Sur la section x= 3 cm, on constate que les six courbes sont de même forme. En outre, sur la partie inferieur, les graphes sont superposés. Ainsi, la couche près du sol pour tous les courbe se développe progressivement sur un intervalle de y=0 m à y=0.04 m. Les valeurs minimales de la vitesse sur la partie inférieure montre la zone de recirculation

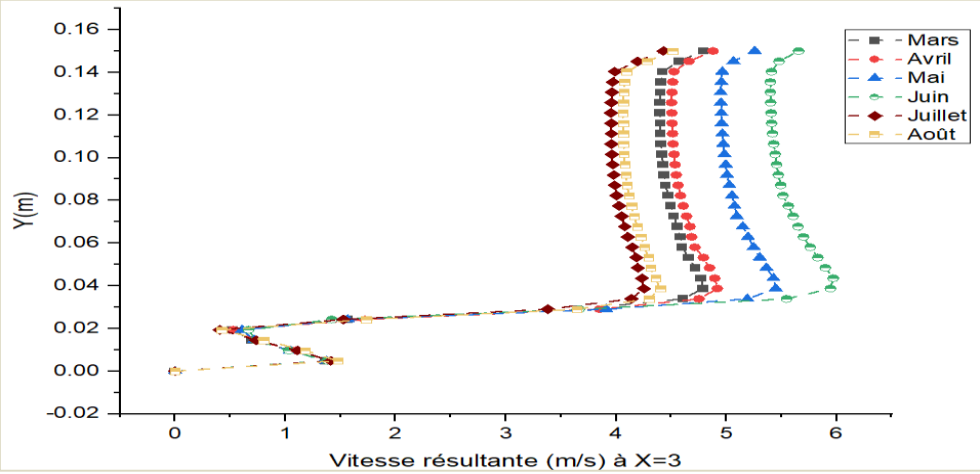
. Sur la section x= 10 cm, loin de la zone de recirculation, les allures des courbes sont semblables. Ainsi, la couche près du sol pour tous les courbe se développe progressivement sur un intervalle de y=0 m à y=0.04 m.




Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Y(m)
Vitesse résultante (m/s) à X=0


Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Y(m)
Vitesse résultante (m/s) à X=1


Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Y(m)
Vitesse résultante (m/s) à X=2


Mars
Avril
Mai
Juin
Juillet
Août
Y(m)
Vitesse résultante (m/s) à X=3

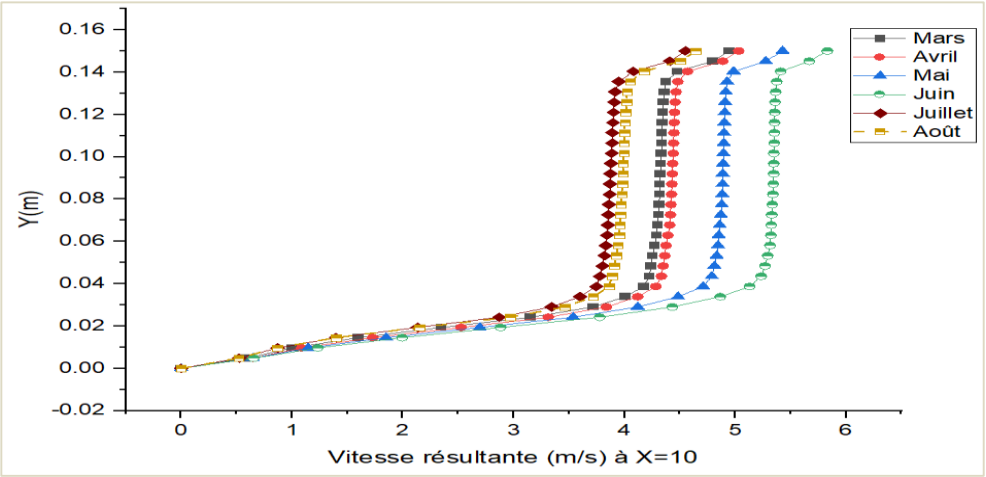



**Figure III.10 :** Profils de la vitesse résultante pour les mois de Mars, Avril, Mai, Juin, Juillet et Août en amont et en aval de l'obstacle

### 3.11.4 Vecteurs de vitesse

Une vue globale et détaillée de la structure de l'écoulement autour de l'obstacle est donnée grâce à une représentation des champs de vitesse. La figure 3.10 représente la distribution des vecteurs de vitesse avant et après l'obstacle pour le mois de Mars, cette répartition est semblable pour tous les mois, mais la taille des vecteurs varie proportionnellement selon la valeur d'intensité de vitesse. Ainsi, on constate, que l'écoulement se détache et s'accélère au-dessus de l'arête amont de l'obstacle (vecteur rouge correspond à une valeur de 6.25 m/s). Une zone de recirculation en aval de l'obstacle est observée. Cette zone montre que le tourbillon est toujours généré dans cette secteur.

Donc, il apparaît deux points importants dans l'écoulement : un point se trouvant juste après l'obstacle où la zone de turbulence est importante, et la vitesse est faible et un deuxième point derrière cette zone où la vitesse du vent commence à augmenter.

Lorsque l'obstacle est exposé au vent de sable spécialement sa partie supérieure qui se caractérise par des valeurs maximales des vitesses, la corrosion peut provoquer le creusage dans les éléments de constituant de ce mur. Donc, il faut le revêtir par des matériaux plus résistant à l'usure.

Le choix de la position d'installation des panneaux photovoltaïques en aval de l'obstacle, pour les protégés contre le vent de sable dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- La chute de la productivité des panneaux solaires engendrée par l'ombre de l'obstacle.
- La zone de recirculation en aval qui peut générer des poussières
- Les points de chute des particules solides
- Vitesse de vent en aval de l'obstacle

On note que la vitesse de vent en aval de l'obstacle dans la région couvrant la plage 10 <x/H< 50 (x est la distance horizontale derrière l'obstacle et H est la hauteur de l'obstacle) se caractérise par des profils de vent faible. Ces profils sont semblables aux celles situés après la zone de recirculation selon l'étude de Lue et al [58].

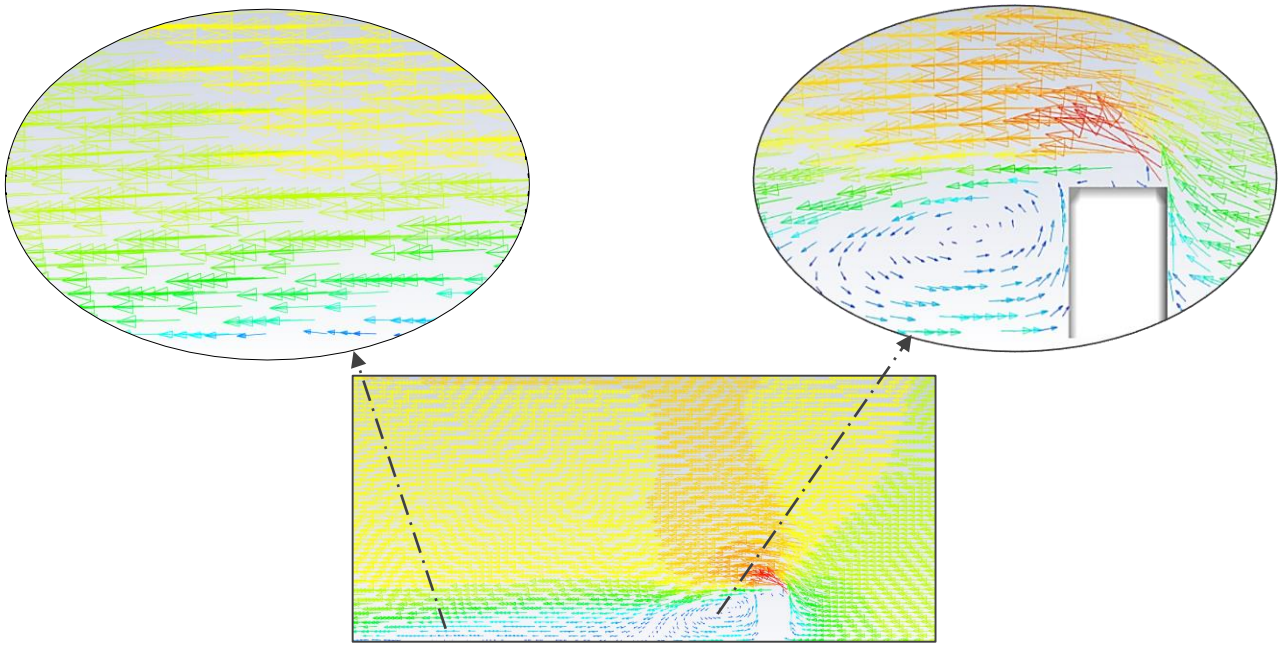


**Figure III.11** Vecteur de vitesse pour le mois de mars

### 3.12 Conclusion

Les résultats obtenus montrent que des particules de sable peuvent être pièges par l'obstacle, et le nombre de ces particules est inversement proportionnelle à la vitesse de vent en amont de l'obstacle. Le pourcentage de ces particules est entre 11% à 13% de nombre total injecté dans le domaine de calcul. Cette quantité des particules est maximale au mois de janvier avec une faible vitesse de vent (2.9 m/s), et minimale au mois de Juin avec une vitesse de vent importante (4.9 m/s).

Les contours de vitesse pour les six mois de mars à août sont apparus semblable, mais les valeurs de vitesses dans des points similaires sont différentes. Une augmentation sur la vitesse au-dessus de la première arrête de l'obstacle indique le point de décollement. La zone de recirculation en aval est caractérisée par l'apparition des vitesses négatives sur la direction longitudinale. Le point de chute des particules dépend de la vitesse de vent, et cela est confirmé par la forme des trajectoires des particules solides. Par ailleurs, les allures des profils des vitesses dans des différentes sections du domaine sont semblables et les valeurs maximales de la vitesse sont toujours obtenues au mois de Juin.

La répartition des vecteurs de vitesse avant et après l'obstacle pour le mois de Mars montre que l'écoulement se détache et s'accélère au-dessus de l'arête amont de l'obstacle (valeur maximale égale à 6.25 m/s). Ainsi, une zone de recirculation en aval de l'obstacle est observée. Cette zone montre que le tourbillon est toujours généré dans cette secteur.

Pour le choix de la position d'installation des panneaux photovoltaïques derrière l'obstacle, les points suivants doit être prises en considération:

- Le point de chute des particules solides.
- La chute de la productivité des panneaux solaires engendrée par l'ombre de l'obstacle.
- Vitesse de vent en aval de l'obstacle et la zone de recirculation.

Concernant la protection contre le creusage de la partie supérieure de l'obstacle par les vitesses de vent élevées, ce dernier doit être renforcé par des matériaux résistants à l'usure.

## Conclusion générale

Le solaire est devenu la plus importante source d'énergie pour la production d'électricité dans une grande partie du monde, la technologie solaire photovoltaïque a été rapidement développée et appliquée dans le monde entier au cours des dernières décennies.

L'éclairement, température, le vent et le sable (poussière) ont un impact sur la production de l'énergie électrique. Ils sont liés au rendement de la cellule photovoltaïque et donc sur la production de module photovoltaïque. L'effet du vent de sable sur les panneaux photovoltaïques est multiple. Le dépôt du sable sur les modules solaires conduisant à une réduction de la surface réceptrice du rayonnement solaire. La vitesse élevée du vent peut réduire les propriétés du verre. Ainsi, la pénétration de la poussière dans les coffrets des modules engendrant des mauvais contacts.

Ce travail est concentré sur la protection des panneaux solaires contre le vent de sable, et l'analyse de comportement aérodynamique de l'écoulement du vent autour d'un obstacle vertical afin de protéger cette installation. Les vitesses de vent utilisées pour la simulation numérique sont les vitesses de vent de l'année 2019 dans la région d'étude de Ouargla. Dans cette région les vitesses de vent atteignent leur maximum durant la saison printanière et estivale (de Mars à Août), provoquant des vents de sable dans cette période.

Les résultats de la simulation numériques montrent que des particules solides ont été piégées par l'obstacle, avec des nombres différents dépend de la vitesse de vent de sable en amont de l'obstacle. Le pourcentage de ces solides est entre 11% à 13% du nombre totale entrant le domaine de calcul. La quantité des particules arrêtées par l'obstacle est maximale pour une faible vitesse de vent dans le mois de Janvier et minimale si la vitesse est importante dans le mois de Juin.

Les contours de vitesse illustrés pour les différents mois de Mars à Août sont semblables. Une valeur de vitesse maximale est observée au-dessus de la première arrête supérieur de l'obstacle indique le point de décollement. L'apparition des vitesses négatives sur la direction longitudinale caractérise la zone aval proche de l'obstacle. Les trajectoires des particules solides montrent bien leurs points de chute qui dépond proportionnellement de la vitesse de vent. D'autre part, les allures des profils des vitesses apparus aussi semblables, avec des valeurs maximales où la vitesse de vent du mois est importante. La distribution des vecteurs de vitesse pour le mois de Mars en aval de l'obstacle montre des tourbillons générés dans cette zone.

L’installation des panneaux solaires en aval du mur de protection doit prendre en considération les critères suivants ; Le point de chute des grains de sable et poussière, l’influence de l‘ombre du mur de protection sur la productivité des panneaux solaires, la zone de recirculation el la vitesse de vent en aval. La protection de l’obstacle contre le creusage doit être aussi prise en considération, spécialement sa partie supérieure où la vitesse de vent est maximale.

Ce travail est important, vise à protéger les systèmes de panneaux solaires contre les vents de sable, qui atteignent leur maximum durant la saison printanière et estivale de l’année, dans les zone arides et désertiques. La demande en électricité dans cette période est élevée. Ainsi, un travail d’optimisation peut être ajouter entre l’ombre engendré par l’obstacle et l'angle d'incidence des rayons solaires sur les modules photovoltaïques.

## Résumé

Notre présent mémoire consiste à étudier la contribution à la protection des panneaux solaires contre le vent de sable par l'installation d'un obstacle en amont. Ce travail port principalement sur l'influence d'un obstacle sur un écoulement d'air turbulent en 3D, avec injection des particules solides représentant les grains de sable et la poussière.

Le schéma physique du problème et le modèle mathématique utilisés ont été présentés. Les équations gouvernantes, basées sur le modèle K-ε Realisable sont résolus par la méthode des volumes finis. La simulation a été fournie par le code de calcul ANSYS Fluent. Ce projet, nous a conduit à s'intéresser en premier lieu à la capacité de l'obstacle de piéger les particules solides et de tracer ses trajectoires. Ainsi, au champs des vitesses résultantes, au profils et au vecteurs des vitesses en amant et en aval de l'obstacle.

Les résultats obtenus avec la simulation sont satisfaits et encourageants en particulier ce qui concerne le nombre des particules solides pièges par l'obstacle, leurs trajectoires et le champ des vitesses en aval de l'obstacle.


**Mots clés** : Vent de sable, écoulement turbulent, obstacle, particules, sable, poussière, trajectoire, volume finis, ANSYS Fluent.



## Abstract

In the present work we are interested about studying the contribution to the protection of solar panels against sand wind by installing an obstacle in the upstream. This work focuses mainly on the influence of an obstacle on a turbulent air flow in 3D domain, with solid particles injection representing sand grains and dust.

The physical schema of the problem and the mathematical model have been presented. The governing equations based on the Realisable K-ε model, have been solved by the finite volume method. The simulation was provided by ANSYS Fluent calculation code. This project has led us to focus primarily on the ability of the obstacle to trap solid particles and to trace their trajectories as well as to determine magnitude velocities contours, profiles and vectors in up and down stream of the obstacle.

The obtained results with numerical simulation were satisfactory and encouraging, especially which are related to the number of solid particles trapped by the obstacle, their trajectories and the velocity field downstream of the obstacle.


**Key words**: Sand wind, turbulent flow, obstacle, particles, sand, dust, trajectory, finite volume, ANSYS Fluent.



## ملخص

في هذه المذكرة نركز حول المساهمة في حماية الألواح الشمسية من الرياح الرملية من خلال تركيب حاجز ضد الرياح أمامها. يركز هذا العمل بشكل أساسي على تأثير الحاجز على تدفق الهواء المضطرب ثلاثي الأبعاد والمحمل بجسيمات صلبة تمثل حبيبات الرمل والغبار.

المخطط الفيزيائي للعمل و النموذج الرياضي المستعمل قد أظهرا أن المعادلات التي ترتكز على النموذج K-ε قد حلت بطريقة الحجوم المنتهية .حيث أنجزت المحاكاة الرقمية بواسطة برنامج ANSYS Fluent.

قادنا هذا المشروع إلى التركيز بشكل أساسي على قدرة العائق على إيقاف الجسيمات الصلبة وكذا قادنا إلى تتبع مساراتها . بالإضافة إلى تحديد السرعات الكلية وتمثيلها واتجاهها قبل وبعد الحاجز. كانت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال المحاكاة العددية مرضية ومشجعة، خاصة فيما يتعلق بعدد الجسيمات الصلبة الموقفة بواسطة الحاجز ومساراتها ومجال وقيم السرعة المسجلة بعد الحاجز.


**كلمات مفتاحية:** رياح رملية، تدفق مضطرب، حاجز، جسيمات، رمل، غبار، مسار، حجوم منتهية .ANSYS Fluent

## Référence bibliographique


[1] OUNIS Tarek Diab. PROTECTION DES PANNEAUX SOLAIRES. Mémoire de master physique, Option : Sciences des Matériaux. UNIVERSITE L'ARBI BEN MHIDI (OUM EL BOUAGHI), 2014.

[2] Observ'er. Baromètre du Solaire Photovoltaïque, Systèmes Solaires, Avril 2004, N° 160, pp.69-83.

[3] Mustapha Dida, Slimane Boughali, Djamel Bechki, Hamza Bouguettaia. Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 124 (2020) 109787. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109787.

[4] Oleksiy nichiporuk. Thèse en physique : Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités, INSA de Lyon, 2005, page 14.

[5] ROUVILLOIS-BRIGOL M., 1975- Le pays de Ouargla (Sahara algérien) : variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique. Publications du Département de géographie de l'Université de Paris-Sorbonne, (2) 389 p.

[6] DREUX p., 1980 – Précis d'écologie. Ed presses universitaires de France, Paris, 231 p.

[7] PASSAGER.,1957- Ouargla (Sahara Constantinois). Etude historique, géographique et médicale. Arch. Inst. Pasteur d'Alger, 35 (2) : 99-200.

[8] HALITIM A., 1985- Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes Plaines Steppiques d'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genès et le comportement des sols. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Rennes, 383 p.

[9] HALILAT M.T., 1993 – Etude de la fertilisation azotée et potassique sur le blé dur (variété al dura) en zone saharienne (région d'Ouargla). Thèse magistère INFS d'agronomie, Batna, 132p.

[10] DAJOZ R., (2006) : Précis d'écologie. Ed. Dunod. Paris, 434 p.

[11] RAMADE F., (2003) : Éléments d'écologie -Ecologie fondamentale. Ed. Dunod, Paries, 689 p.

[12] DAJOZ R. 1971- Précis d'écologie. Ed. Dunod.Paris ,434p.

[13] [Jean- Christain,2004, Les energies renouvelables, Deuxième edition réactualisée par Système Solaire, pp.41.].

[14] [Denis.B et V. Parades,2007, L'énergie éolienne, Projet de machine thermiques, INSA, Lyon, pp.15.].

[15] [Paul Gipe, 2004, Le Grand Livre de l'Eolien, Edition Le Moniteur, pp.26.].

[16] [DUBIEF J., 1963. Le climat du Sahara. Tome II.Ed. Inst. Rech.Sah., Univ. Alger, 275p.].

[17] [Rahmouni S, et al., Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria, International Journal of Hydrogen Energy (2016), http://dx.doi.org/10.1016/jijhydene. 2016.07.21].

[18] [yaping Shoa 2008 'Physics and Modelling of Wind Erosion' université of Cologne Germany Springer science].

[19] [L. SKIDMORE (1986) 'WIND EROSION CONTROL', ARS –USDA-Kansas state University – Manhattan –kansas 66506 U.S.A].

[20] O.N.M., 2018- Données climatiques de la région de Ouargla, rapport 6 p.

[21] Hanai T Al, Hashim RB, Chaar L El, Lamont LA.Environmental effects on a grid connected 900 W photovoltaic thin- fi lm amorphous silicon system.Renew Energy 2011;36:2615–22. https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.010.

[22] Fouad MM, Shihata LA, Morgan EI. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels. Renew Sustain Energy Rev 2017;80: 1499–511. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.141.

[23] Adinoyi MJ, Said SAM. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. Renew Energy 2013;60:633–6. https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014. Technical note.

[24] Mekhenane Niama, Makhlouf Sabir. Impact des conditions météorologiques (Vent et poussière) sur le rendement des cellules photovoltaïques. Mémoire de master physique appliquée, Université larbi benm'hidi O.E.B, 2021.

[25] A. Labouret, M. Villoz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.

[26] Z. Rezki, H. A. Amar, B. M. Said, H. Salah, H. Abderrahmane, et H. Mourad, « CONTRIBUTION À L'ANALYSE DES PERFORMANCES ÉLECTRIQUES ET THERMIQUES DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES DE DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES », p. 135.

[27] Moharram KA, Abd-Elhady MS, Kandil HA, El-Sherif H. Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling. Ain Shams Eng J 2013;4(4):869–77.

[28] Abd-Elhady MS, Fouad MM, Khalil T. Improving the efficiency of photovoltaic (PV) panels by oil coating. Energy Convers Manag 2016;115:1–7.

[29] Meral ME, Dinçer F. A Review of the factors affecting operation and efficiency of Photovoltaic based electricity generation systems. Renew Sustain Energy Rev 2011;15(5):2176–84.

[30] Tripanagnostopoulos Y, Bazilian M, Zoulia I, Battisti R. Hybrid PV/T system with improved air heat extraction modification, PV in Europe, Rome,; 2002.

[31] Gardas BB, Tendolkar MV. Design of Cooling System for Photovoltaic Panel forincreasing its Electrical Efficiency, ICMIE, Goa, p.144–49, 2012.

[32] Kawamura H, Naka K, Yonekura N, Yamanaka S, Kawamura H, Ohno H, Naito K. Simulation of I–V characteristics of a PV module with shaded PV cells. Sol Energy Mater Solar Cells 2003;75(3):613–21.

[33] Maghami MR, Hizam H, Gomes C, Radzi MA, Rezadad MI, Hajighorbani S. Power loss due to soiling on solar panel: a review. Renew Sustain Energy Rev 2016;59:1307–16.

[34] Eylul Simsek, Megan J. Williams, Laurent Pilon. Effect of dew and rain on photovoltaic solar cell performances. Solar Energy Materials and Solar Cells 222 (2021) 110908. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110908.

[35] K.K. Ilse, B.W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, J. Bagdahn, Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules, Renew. Sustain. Energy Rev. 98 (2018) 239–254.
[36] Costa SC, Diniz ASA, Kazmerski LL. Dust and soiling issues and impacts relating to solar energy systems: literature review update for 2012–2015. Renew Sustain Energy Rev 2016;63:33–61.

[37] Verma A, Singhal S. Solar PV performance parameter and recommendation for optimization of performance in large scale grid connected solar PV plant. J Energy Power Sources 2015;2(1):40–53.

[38] Bouaouadja N, Bouzid S, Hamidouche M, Bousbaa C, Madjoubi M. Effects of sandblasting on the efficiencies of solar panels. J Appl Energy 2000;65:99e105.

[39] Sayyah A, Horenstein MN, Mazumder MK «Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels» Sol Energy 2014;107:576–604. https://doi.org/10.1016/j.solener. 2014.05.030.

[40] Abderrezek M, Fathi M. Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. Sol Energy 2017;142:308–20. https://doi.org/10.1016/j. solener.2016.12.040.

[41] Mehmood U, Al-ahmed A, Al-sulaiman FA, Malik MI, Shehzad F, Ul A, et al. Effect of temperature on the photovoltaic performance and stability of solid- state dyesensitized solar cells : a review. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:946–59. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.114.

[42] Tanesab J, Parlevliet D, Whale J, Urmee T, Pryor T. The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone. Sol Energy 2015;120:147–57. https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.052.

[43] Javed W, Wubulikasimu Y, Figgis B, Guo B. Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha. Qatar. Sol Energy 2017;142:123–35. https://doi. org/10.1016/j.solener.2016.11.053.

[44] "Ertragsüberwachung von Photovoltaik-Anlagen.," energieverbraucher.de, 28 April 2021. [Online]. Available: https://www.energieverbraucher.de/de/ertrags- -ueberwachung__1457/. [Accessed 28 April 2021].

[45] M. Humood, A. Beheshti, J. L. Meyer and A. A. Polycarpou, "Normal impact of sand particles with solar panel glass surfaces," Tribology International, vol. 102, p. 237–248, 2016.
[46] P. K, "What forces cause solar panel degradation and failure," Solar Power World, 2017 05 June. [Online]. Available: https://www.solarpowerworldonline.com/2017/06/causes -solar-panel-degradation. [Accessed 20 Sept 2021].

[47] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, "Photovoltaic degradation rates— an analytical review," Progress in photovoltaics: Research and Applications, vol. 21, p. 12–29, 2013.

[48] Hussein A. Kazema,b,∗ , Miqdam T. Chaichanc , Ali H.A. Al-Waelib , K. Sopianb. A novel model and experimental validation of dust impact on grid-connected photovoltaic system performance in Northern Oman. Solar Energy 206 (2020) 564–578. https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.043.

[49] Aslan Gholami, Iman Khazaee, Shahab Eslami, Majid Zandi, Ehsan Akrami. Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance. Solar Energy 159 (2018) 346–352. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.010.

[50] Motasem Saidan, Abdul Ghani Albaali, Emil Alasis, John K. Kaldellis. Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. Renewable Energy 92 (2016) 499e505. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.031.

[51] Seyyed Ali Sadat, Jamal Faraji, Mohammad Nazififard, Abbas Ketabi. The experimental analysis of dust deposition effect on solar photovoltaic panels in Iran's desert environment. Sustainable Energy Technologies and Assessments 47 (2021) 101542. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101542.

[52] R. E. Cabanillas and H. Munguı. Dust accumulation effect on efficiency of Si photovoltaic modules. Journal of Renewable and Sustainable Energy 3, 043114 (2011). http://dx.doi.org/10.1063/1.3622609.

[53] Shaharin Anwar Sulaiman, Atul Kumar Singh, Mior Maarof Mior Mokhtar, Mohammed A. Bou-Rabeec. Influence of Dirt Accumulation on Performance of PV Panels. Energy Procedia 50 (2014) 50 – 56. https://doi: 10.1016/j.egypro.2014.06.006.

[54] Shaharin A. Sulaiman, Haizatul H. Hussain, Nik Siti H. Nik Leh, and Mohd S. I. Razali. Effects of Dust on the Performance of PV Panels. International Scholarly and Scientific Research & Innovation 5(10) 2011. scholar.waset.org/1999.8/10305.

[55] Yanling Guan, Hao Zhang, Bin Xiao, Zhi Zhou, Xuzhou Yan. In-situ investigation of the effect of dust deposition on the performance of polycrystalline silicon photovoltaic modules. Renewable Energy 101 (2017) 1273e1284. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.009.

[56] Julius Tanesab, David Parlevliet, Jonathan Whale, Tania Urmee, Trevor Pryor. The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone. Solar Energy 120 (2015) 147–157. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.052.

[57] Aslan Gholami, Ali Akbar Alemrajabi, Ahmad Saboonchi. Experimental study of self-cleaning property of titanium dioxide and nanospray coatings in solar applications. Solar Energy 157 (2017) 559–565. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.075.

[58] Junwei Lyu, Matthew S. Mason, Chien Ming Wang. Predicting far-lee wind flow characteristics behind a 2D wedge-shaped obstacle: Experiments, numerical simulations and empirical equations. Building and Environment 194 (2021) 107673. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107673.

[59] Wanyin Luo, Zhibao Dong, Guangqiang Qian, Junfeng Lu. Wind tunnel simulation of the three-dimensional airflow patterns behind cuboid obstacles at different angles of wind incidence, and their significance for the formation of sand shadows. Geomorphology 139–140 (2012) 258–270. http://doi:10.1016/j.geomorph.2011.10.027.