



N° d'Ordre : 92 /2020

Formation Doctorale : Sciences des Matériaux et Procédés Industriels

Discipline : Physique

Spécialité : Sciences des Matériaux pour l'énergie et l'environnement

Laboratoire : Physique du solide

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

AYOUB EL BARAKA

**Etude des mécanismes d'adhésion des poussières sur les surfaces des miroirs
réflecteurs dans les régions arides**

Soutenue le 30 / 12 / 2020 devant le jury composé de :

Pr. Izeddine ZORKANI	Faculté des sciences Dhar El Mahraz - Fès	Président
Pr. Hassan DARHMAOUI	Université Al Akhawayn – Ifrane	Rapporteur
Pr. Imad MANSOURI	ENSAM - Meknès	Rapporteur
Pr. Abdellah REZZOUK	Faculté des sciences Dhar El Mahraz - Fès	Rapporteur
Pr. Omar MOUDAM	Université Mohammed VI Polytechnique -Benguérir	Examineur
Pr. Ahmed SALI	Faculté des sciences Dhar El Mahraz - Fès	Examineur
Pr. Mimouna BAITOUL	Faculté des sciences Dhar El Mahraz - Fès	Invité
Pr. Asmae KHALDOUN	Université Al Akhawayn – Ifrane	Co-directeur de thèse
Pr. Anouar JORIO	Faculté des sciences Dhar El Mahraz - Fès	Directeur de thèse

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont, premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études.

Tout d'abord, je voudrais exprimer ma plus profonde gratitude à mon encadrante, la professeure Asmae Khaldoun, Professeure de physique à l'université Al Akhawayn, de m'avoir supervisé pendant la période de cette thèse et de m'avoir donné l'opportunité de faire des recherches et de m'avoir profité de ses expériences inestimables. Son dynamisme, sa vision, sa sincérité et sa motivation m'ont profondément inspiré. Elle m'a appris la méthodologie pour mener à bien la recherche et présenter les travaux de recherche le plus clairement possible. Ce fut un grand privilège et un honneur de travailler et d'étudier sous sa direction.

Je tiens à remercier très sincèrement le Professeur Anouar Jorio de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz de l'université Sidi Mohammed Ben Abdellah), pour tous les conseils, encouragements et discussions approfondies tout au long de cette recherche. Je tiens également à remercier la Professeure Mimouna Baitoul ainsi le Professeur Izeddine Zorkani, et je tiens à remercier aussi l'ensemble des professeurs de la faculté des sciences Dhar El Mahraz.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur le Professeur Abdellah Rezzouk le responsable de la structure de recherche, ainsi qu'à Monsieur Imad Mansouri, Professeur à l'ENSAM de Meknès, et aussi Monsieur Hassane Darhmaoui Professeur à l'université Al Akhawayn, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je tiens également à remercier le Professeur Ahmed Sali de la Faculté des Sciences Dhar El Mahraz Fès et le Professeur Omar Moudam de l'université polytechnique de Benguerir, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être examinateurs de cette thèse.

Je tiens à remercier le Professeur Khalid Loudiyi et Dr Houda Ennaceri du School of Science and Engineering (SSE) de l'Université Al Akhawayn, ainsi que tous les membres de l'Université Al Akhawayn pour leur collaboration et leurs précieux encouragements.

La partie expérimentale de ce travail a été menée au Green Energy Park (GEP) à BenGuerir. Je tiens à remercier Monsieur Abdellatif Ghennioui, le coordinateur de GEP pour sa collaboration et je tiens également à remercier toute l'équipe du GEP pour leur collaboration.

Un grand merci à IRESEN (Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles), pour son soutien financier à cette recherche dans le cadre du projet InnoTherm II «Nano Coating and Testing: un pas vers l'amélioration des réflecteurs CSC pour une maintenance moins intensive en termes de travail et d'eau ». Par ailleurs, je tiens à remercier Monsieur Badr Ikken, le directeur d'IRESEN pour sa collaboration efficace ainsi que toute l'équipe d'IRESEN.

Je tiens à remercier le Dr-Ing. Fabian Wolfertstetter de l'Institut de recherche solaire de Plataforma Solar de Almeria en Espagne pour son excellente collaboration dans la partie expérimentale de la thèse.

Je veux exprimer mon amour et ma gratitude sincères à mes parents, pour leur amour sans fin et pour leur soutien inconditionnel.

Enfin, mes remerciements vont à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin pour mener à bien le travail de recherche directement ou indirectement.

Dédicace

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères et leurs enfants, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis

A vous cher lecteur

Abstract

For concentrated solar power (CSP) plants, arid and semi-arid regions are considered suitable sites for power plant installation courtesy of their high direct normal irradiance presented in these areas. However, the accumulation and the adhesion of dust on the surfaces of CSP mirrors present an obstacle to improving the efficiency of solar mirrors by absorbing and scattering the sunlight. This research focuses on understanding the evaluation of dust adhesion on the surfaces of CSP reflector mirrors and also finding new solutions that can be implemented in CSP projects to decrease water consumption in the washing operation of reflector mirrors.

Firstly, a novel method was presented to evaluate dust adhesion on the surface of CSP mirrors. Based on extended DLVO theory, three types of CSP mirrors are investigated. First, the commercial mirror used at NOOR 1 project, the second one is a CSP mirror with hydrophobic amorphous Al_2O_3 nano-coating and finally, the third one is CSP mirror with hydrophilic TiO_2 nano-coating. The dust particles were collected from three potential regions for CSP plant installation in Morocco (Ouarzazate, Tinghir, and Midelt). The results showed that the work of adhesion between CSP mirrors with hydrophobic alumina nano-coating and Tinghir dust particles has a minimum value of 42.78 mJ/m^2 compared to other samples. This result can be explained by the hydrophobic nature of the surface of this mirror and the nature of the clay minerals in the soil extracted from the Tinghir site. X-ray diffraction results showed that the Illite and Kaolinite type of clay minerals are present in major quantities in Tinghir and this explains the low adhesiveness of Tinghir dust on the surface of the mirrors, since Illite and Kaolinite are partially swelling clays in water and hence very low adhesion to a solid surface. Secondly, in order to evaluate the dust adhesion by another method and following the surface free energy of dust particles and CSP mirrors; the adhesion forces were evaluated on the surfaces of three CSP reflector mirrors. In this part, two types of dust particles are investigated. The first type is dust particles from Ouarzazate and the second type are the dust particles from Midelt. It was founded a good relationship between dust particles compositions and metrological parameters conditions of the regions with adhesion forces types, either Van Der Waals (VDW) forces or capillary forces. Also, a good relationship was found between adhesion forces results and the type of clay minerals presented in each type of dust particles.

Thirdly, following the extended DLVO theory for three phases, a new solutions were presented to decrease the water consumption in the washing operation of CSP reflector mirrors. Some additives are suggested to decrease the surface free energy of water and as a result increase the

spreading and the wettability of water when in contact with CSP reflector mirrors. In this part, the natural Ghassoul it's highly recommended to be mixed with water. In fact, the natural Ghassoul contain both a hydrophilic (water-loving) side, such as an acid anion ($-\text{CO}^{2-}$ or SO^{3-}) and a hydrophobic (water-hating) side; one side contains positive charges and the other side contain negative charges.

Fourthly, following the calculation of dust adhesion and evaluation of adhesion forces and in order to expanding our research in real-time conditions. An Outdoor Soiling microscopy (OSM) was implanted to collect the images data of the soiled samples and correlate the result of weather parameters. However, based on an Artificial Neural Network (ANN) and data collected. The dust deposition and re-suspension was predicted by providing only the weather conditions of selected regions. The performance of this model was tested using the NARX Levenberg Marquardt algorithm to identify the link between the input and output data and thus predict accurately the dust percentages on the surfaces, and we conclude in this part that Artificial Neural Network (ANN) machine showed a good results for the prediction of dust percentage.

Key-words:

Concentrated Solar Power (CSP), surface Free Energy (SFE), Derjaguin Landau Verwey Overbeek (DLVO), Van Der Waals (VDW), Outdoor Soiling Microscopy (OSM), Artificial Neural Network (ANN).

Résumé de Thèse

Pour les centrales solaires à concentration (CSC), les régions arides et semi-arides sont considérées comme des sites appropriés pour l'installation des centrales solaires à concentration principalement en raison de l'irradiance normale directe élevée présentée dans ces zones. Cependant, l'accumulation et l'adhésion de poussières sur les surfaces des miroirs réflecteurs présentent un obstacle à l'amélioration de l'efficacité des miroirs solaires en absorbant et en diffusant la lumière du soleil. De ce fait, cette recherche se concentre sur la compréhension des mécanismes d'adhésion de poussière et l'évaluation de l'adhérence sur les surfaces des miroirs réflecteurs et aussi sur la recherche de nouvelles solutions qui peuvent être mises en œuvre dans les centrales solaires à concentration pour réduire la consommation d'eau dans le processus de nettoyage des miroirs réflecteurs.

Tout d'abord, une nouvelle méthode a été présentée pour évaluer l'adhérence de la poussière à la surface des miroirs réflecteurs. Sur la base de la théorie DLVO étendue, trois types de miroirs réflecteurs sont étudiés, le premier type est un miroir commercial utilisé dans le projet NOOR 1 à Ouarzazate, le second type est un miroir avec nano-revêtement d'alumine (Al_2O_3) amorphe hydrophobe et le troisième type est un miroir avec nano-revêtement de TiO_2 hydrophile. Les particules de poussière ont été collectées dans trois régions potentielles pour l'installation des centrales solaires à concentration au Maroc (Ouarzazate, Tinghir et Midelt). Les résultats ont montré que l'énergie d'adhérence entre les miroirs avec nano-revêtement d'alumine hydrophobe et les particules de poussière de Tinghir a une valeur minimale de $42,78 \text{ mJ/m}^2$ par rapport à d'autres échantillons. Ce résultat peut s'expliquer par le caractère hydrophobe de la surface de ce miroir et par la nature des minéraux argileux du sol extraits du site de Tinghir. Les résultats de la diffraction des rayons X ont montré que les minéraux argileux de type Illite et Kaolinite sont présents en quantités importantes dans Tinghir et cela explique la faible adhésivité de la poussière de Tinghir à la surface des miroirs, car l'Illite et la kaolinite sont des argiles gonflent partiellement dans l'eau et donc très faible adhérence à une surface solide.

Deuxièmement, afin d'évaluer l'adhérence de la poussière par une autre méthode et en suivant les calculs de l'énergie libre de surface des particules de poussière et des miroirs réflecteurs; les forces d'adhérence ont été évaluées pour trois types des miroirs réflecteurs. Dans cette partie, deux types de particules de poussière sont étudiés. Le premier type est les particules de

poussière d'Ouarzazate et le second type est les particules de poussière de Midelt. Il a été fondé une bonne relation entre les compositions de particules de poussière et les paramètres métrologiques des régions avec les types de forces d'adhésion, soit les forces de Van Der Waals (VDW) ou les forces capillaires. Aussi, une bonne relation a été trouvée entre les résultats des forces d'adhérence et le type de minéraux argileux présentés dans chaque type de particules de poussière.

Troisièmement, suivant la théorie DLVO étendue pour trois phases, de nouvelles solutions ont été présentées pour réduire la consommation d'eau dans l'opération de lavage des miroirs réflecteurs. Certains additifs sont suggérés pour diminuer l'énergie libre de surface de l'eau et par conséquent augmenter l'étalement et la mouillabilité de l'eau au contact des miroirs à réflecteur. Dans cette partie, le Ghassoul naturel, il est fortement recommandé de le mélanger avec de l'eau. En fait, le Ghassoul naturel contient à la fois un côté hydrophile (aimant l'eau), tel qu'un anion acide ($-\text{CO}^{2-}$ ou SO^{3-}) et un côté hydrophobe (qui déteste l'eau); un côté contient des charges positives et l'autre des charges négatives.

Quatrièmement, suite au calcul de l'adhérence des poussières et à l'évaluation des forces d'adhérence et afin d'étendre nos recherches en temps réel, une microscopie des salissures en extérieur (MSE) a été implantée pour collecter les données d'images des échantillons souillés et corrélérer le résultat des paramètres météorologiques. Cependant, sur la base d'un réseau neuronal artificiel (RNA) et les données collectées, le dépôt des poussières et la remise en suspension ont été prévus en fournissant uniquement les conditions météorologiques de certaines régions. Les performances de ce modèle ont été testées à l'aide de l'algorithme NARX Levenberg Marquardt pour identifier le lien entre les données d'entrée et de sortie et ainsi prédire avec précision les pourcentages de poussière sur les surfaces, et nous concluons dans cette partie que la machine de réseau neuronal artificiel (RNA) a montré un bon résultat pour la prédiction du pourcentage de poussière.

Mots-clés:

Centrale Solaire à Concentration (CSC), Énergie Libre de Surface (ELS), Derjaguin Landau Verwey Overbeek (DLVO), Van Der Waals (VDW), Microscopie des Sols Extérieurs (MSE), Réseau Neuronal Artificiel (RNA).

Table des matières

Remerciements	1
Dédicace	3
Abstract	4
Résumé de Thèse.....	6
Abréviations	11
List des figures	13
List des tables	15
Chapitre I: Introduction générale	16
I. Contexte et objectifs	17
II. Structure de la thèse	19
Références	21
Chapitre II: État de l'art	22
I. Phénomènes des salissures et ses mesures.....	23
1. Phénomènes des salissures	23
1.1 Concentration de poussières en suspension dans l'air.....	25
1.2 Causes d'accumulation de poussière	27
2. Mesures de salissure.....	27
2.1 Masse du sol et puissance des modules solaires	28
2.2 Transmission lumineuse.....	29
2.3 Images par la microscopie des salissures en extérieur.....	30
II. Adhérence de la poussière sur les surfaces des miroirs réflecteurs	30
1. Les centrales thermique à concentration	30
2. Miroirs réflecteurs	33
2.1 Miroirs en verre argenté de première surface	35
2.2 Miroirs en verre argenté de deuxième surface	36
2.3 Miroirs en polymère argenté.....	36
2.4 Miroirs en aluminium	37
3. Revêtement antisalissure et la thermodynamique du revêtement autonettoyant.....	37
3.1 Revêtement antisalissure pour miroirs réflecteurs	37

2.2 Effet autonettoyant sur les surfaces des réflecteurs	39
4. Mesure de l'adhérence de Poussière	45
4.1 La mesure de l'adhérence de poussière basée sur la théorie DLVO étendue.....	45
4.2 Mésure de l'Adhérence du poussière par AFM.....	51
5. Surveillance et dépôt de poussières par microscope en extérieur	52
Références	53
Chapitre III : Évaluation de l'adhérence des salissures à la surface des miroirs réflecteurs via la théorie DLVO étendue	58
Résumé.....	59
I. Introduction.....	60
II. Contexte théorique	62
1. L'énergie libre de surface	62
2. Travail d'adhésion	62
III. Procédure Expérimentale	63
1. Caractérisation des miroirs et de particules de poussière.....	63
1.1 Caractérisation des miroirs.....	63
1.2 Caractérisation par diffraction des rayons X des fractions d'argile des particules de poussière	64
2. Détermination de l'énergie libre de surface	66
2.1 Mesures des angles de contact des échantillons de miroirs	66
2.2 Préparation d'échantillons de particules de poussière	67
2.3 Mesure des angles de contact des particules de poussière	67
2.4 Mesures d'énergie libre de surface d'échantillons de miroirs.....	68
2.5 Mesures d'énergie libre de surface des particules de poussière	68
IV. Résultats et discussion	69
Conclusion.....	72
Références	73
Chapitre IV: Étude de l'effet de salissure sur les surfaces des miroirs réflecteurs via le calcul des forces d'adhérence	76
Résumé.....	77
I. Introduction.....	78
II. Contexte théorique	79
1. Mécanisme d'adhésion de la poussière	79
2. Forces d'adhésion.....	80

III. Procédures expérimentales	83
1. Énergie de surface des particules de poussière	83
2. Distribution de la taille des poussières	83
3. Fluorescence X des particules de poussière	84
4. Diffraction des rayons X des particules de poussière.....	85
5. Énergie libre de surface des miroirs solaires.....	86
6. Calcul des forces d'adhérence	86
6.1 Calcul des forces de Van der Waals forces	86
6.2. Calcul des forces capillaires.....	88
6.3. Calcul des forces électrostatiques	90
6.4. Forces gravitationnelles	91
III. Résultats et discussion	91
Conclusion.....	94
Références	95
Chapitre V : Amélioration des techniques de nettoyage des miroirs solaires	98
Résumé.....	99
I. Introduction.....	100
II. Méthodologie et procédures expérimentales.....	101
1. Méthodologie	101
2. Procédures expérimentales	102
2.1 Composant de tension superficielle des liquides	102
2.2 Energie libre de surface de miroirs	103
2.3 Travail d'adhésion	103
2.4 Tensioactif pour le nettoyage des panneaux solaires dans la littérature	104
III. Résultats et discussion	105
Conclusion.....	106
Références	108
Chapitre VI: Implémentation d'un microscope de salissures extérieur pour les investigations sur les dépôts de salissures sur les surfaces des miroirs solaires	109
I. Introduction.....	110
II. Expérimental et Procédures	112
1. Microscope de salissure extérieur	112
2. Collecte de données.....	113
3. Développement et analyse de réseaux neuronaux artificiels (RNA).....	113

3.1 Présentation des réseaux de neurones artificiels (RNA).....	114
3.2 Prétraitement des données.....	115
3.3 Ensembles de test et de validation	115
3.4 Formation du RNA et prédiction	116
III. Résultats et discussion	117
1. Analyse des performances du RNA	117
2. Analyse des performances de prédiction.....	119
3. Prédications de modèle	121
Conclusion.....	122
Références	124
Conclusions & Recommandations	126

Abréviations

AIE	Agence internationale de l'énergie
AC	Angle de contact
Al ₂ O ₃	Alumine
CSC	Centrales solaires à concentration
CRS	Systèmes de récepteur central
DLVO	Derjaguin Landau Verwey Overbeek
DRX	Diffraction des rayons X
ELS	Énergie libre de surface
ES	Énergie de surface
ESC	Énergie solaire à concentration
EQM	Erreur quadratique moyenne
F _{vdw}	Forces de Van Der Waals
F _{cap}	Forces capillaires
F _{el}	Forces électrostatiques
F _{gravity}	Forces gravitationnelles
MENA	Moyen-Orient et Afrique du Nord
MFA	Microscopie à force atomique
MSE	Microscopie des salissures extérieures
MVS	Machines à vecteurs de support
NARX	Nonlinear autoregressive exogenous
RM	Rugosité moyenne
RNA	Réseau neuronal artificiel
RLM	Régression linéaire multiple
R _s	Réflectance spéculaire
XRF	Fluorescence X
PM _{2,5}	Particules de 2,5 microns ou moins
PMC	Perceptron multicouche
PMMA	Poly-Methyl-Methacrylate
PEO	Oxyde de polyéthylène
PVOH	Alcool polyvinylique

PM _{2,5}	Particules de 2,5 microns ou moins
TA	Travail d'adhésion
TiO ₂	Dioxyde de titane
ZnO	Oxyde de zinc
SDS	Sulfate de dodécyle de sodium

List des figures

Fig. 2.1. Modes De Transport Des Particules De Poussière.....	24
Fig. 2.2. Seuil de fluide en fonction du diamètre des particules (Modèle Bagnold / Shao Et Lu).....	25
Fig. 2.3. Taux de salissure maximum par Jour VS Concentrations moyennes annuelles de poussières en suspension dans l'air.....	26
Fig. 2.4. Carte mondiale de la concentration moyenne annuelle de particules fines de 2,5 microns ou moins....	26
Fig. 2.5. Causes d'accumulation de poussière.....	27
Fig. 2.6. Disposition optique de la caméra de contamination basée sur un reflex numérique.....	29
Fig. 2.7. Microscope de salissure extérieur (MSE).....	30
Fig. 2.8. Schéma du collecteur Cylindro-parabolique.....	31
Fig. 2.9. Schéma du collecteur Fresnel linéaire.....	32
Fig. 2.10. Schéma de la centrale à tour.....	32
Fig. 2.11. Schéma du collecteur parabolique.....	33
Fig. 2.12. Structures des premiers miroirs de surface.....	34
Fig. 2.13. Structures de miroirs de deuxième surface.....	34
Fig. 2.14. Réflectance spéculaire versus réflectance diffuse.....	35
Fig. 2.15. Miroir en verre argenté de première surface.....	36
Fig. 2.16. Verre argenté de deuxième surface.....	36
Fig. 2.17. Miroirs en polymère argenté.....	37
Fig. 2.18. Miroirs en aluminium.....	37
Fig. 2.19. Surfaces hydrophobes (a) et superhydrophobes (b).....	38
Fig. 2.20. Surfaces hydrophiles (a) et superhydrophiles (b).....	39
Fig. 2.21. Hystérésis d'angle de contact.....	40
Fig. 2.22. Rugosité de surface sur la surface réelle.....	41
Fig. 2.23. Configuration de Wenzel (a) et configuration de Cassie & Baxter (b).....	42
Fig. 2.24. Gouttelette d'eau sur une surface superhydrophobe composée d'un réseau régulier de piliers circulaires.....	43
Fig. 2.25. La goutte maximale d'une gouttelette (δ) entre deux piliers.....	43
Fig. 2.26. Profilomètre.....	44
Fig. 2.27. Illustration du clivage associé au travail d'adhésion.....	49
Fig. 2.28. Illustration de la relation entre l'angle de contact et l'énergie de surface.....	50
Fig. 2.29. Mesure de l'angle de contact «Sessile drop analyzer».....	51
Fig. 2.30. Illustration de la mesure d'adhérence par AFM.....	51
Fig. 3.1. Analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière d'Ouarzazate.....	65
Fig. 3.2. Analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière du Midelt.....	65
Fig. 3.3. Analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière de Tinghir.....	66
Fig. 3.4. Travail d'adhésion entre différents types de particules de poussière et les miroirs.....	69
Fig. 4.1. Cycle de vie des particules de poussière.....	79
Fig. 4.2. Illustration de la force de Van Der Waal sur une surface plane.....	80
Fig. 4.3. Illustration de la force capillaire sur une surface plane.....	81
Fig. 4.4. La distribution de taille des particules de poussière.....	84
Fig. 4.5. Fluorescence X des particules de poussière.....	84
Fig. 4.6. Analyse par diffraction des rayons x des particules de poussière d'Ouarzazate.....	85
Fig. 4.7. Analyse par diffraction des rayons x des particules de poussière Midelt.....	85
Fig. 4.8. Forces de VDW sur le miroir avec revêtement superhydrophile du TiO_2	87
Fig. 4.9. Forces de VDW sur le miroir commercial.....	88
Fig. 4.10. Forces de VDW sur le miroir avec revêtement hydrophobe d'alumine.....	88
Fig. 4.11. Forces capillaires sur le miroir réflecteur avec revêtement superhydrophile de TiO_2	89
Fig. 4.12. Forces capillaires sur le miroir commercial.....	89
Fig. 4.13. Forces capillaires sur le miroir avec revêtement d'alumine.....	90
Fig. 4.14. Les forces électrostatiques pour différentes valeurs r	90

Fig. 4.15. <i>Calcul des forces gravitationnelles pour une surface plane pour différentes valeurs de r</i>	91
Fig. 5.1. <i>Techniques de nettoyage</i>	100
Fig. 6.1. <i>Microscope de Salissure Extérieur (MSE)</i>	112
Fig. 6.2. <i>Configuration schématique de l'analyse ImageJ avec le microscope de salissures extérieure</i>	113
Fig. 6.3. <i>Structure de RNA avec quatre entrées, un calque caché et une sortie</i>	115
Fig. 6.4. <i>Schéma de l'RNA avec quatre entrées et une sortie</i>	116
Fig. 6.5. <i>Résultat de l'RNA dans MATLAB</i>	117
Fig. 6.6. <i>Tracé de régression.</i>	118
Fig. 6.7. <i>Analyse de régression avec la formation, test et validation du RNA optimal</i>	119
Fig. 6.8. <i>Réponse de l'élément de sortie 1 pour la série temporelle 1</i>	120
Fig. 6.9. <i>Autocorrélation et analyse des performances de prédiction du modèle NARX.</i>	120
Fig. 6.10. <i>Analyse des performances de prédiction du modèle NARX</i>	121
Fig. 6.11. <i>Prédictions de l'accumulation de poussière</i>	122

List des tables

Table. 3.1. Composants de tension superficielle des liquides.....	66
Table. 3.2. Valeurs d'angle de contact de l'eau, de l'éthylène glycol et du diiodomethane sur différents échantillons.....	67
Table. 3.3. Valeurs d'angle de contact sur différents échantillons de particules de poussière.....	67
Table. 3.4. Composants de l'énergie libre de surface des échantillons de miroirs.....	68
Table. 3.5. Composants de l'énergie libre de surface des échantillons de particules de poussière.....	68
Table. 3.6. Valeurs de la capacité d'échange de cations (CEC) pour les minéraux argileux.....	72
Table. 4.1. Composantes d'énergie de surface des échantillons de particules de poussière.....	83
Table. 4.2. Valeurs de l'angle de contact avec l'eau.....	86
Table. 5.1. Tension superficielle des liquides.....	102
Table. 5.2. Valeurs d'angle de contact sur le miroir commercial.....	103
Table. 5.3. Energie libre de surface du miroir commercial.....	103
Table. 5.4. Travail d'adhésion (trois phases).....	104
Table. 5.5. Composants de tension superficielle des tensioactifs.....	105
Table. 5.6. Travail adhesion des tensioactifs (trois phases).....	105

Chapitre I: Introduction générale

I. Contexte et objectifs

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie les plus abondantes et les plus propres connues de l'humanité. Elle fournit un potentiel élevé et une source d'énergie permanente. Ainsi, des pays développés comme l'Allemagne, le Danemark et les États-Unis ont permis de couvrir leurs besoins énergétiques en électricité en développant différentes stations énergétiques qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique [1, 2]. Le Maroc a rejoint le mouvement en prenant une grande décision, qui est d'investir dans l'énergie solaire dans le désert du Sahara. Le projet consiste en la construction de la plus grande central solaire thermique au monde appelée le complexe NOOR à Ouarzazate (lancée le 24 février 2016), l'objectif de ce projet est de faire passer la production d'énergies renouvelables de la puissance électrique installée de 42% en 2020 à 52% en 2030 et donc, la contribution à la minimisation des émissions de CO₂ [3]. En outre, Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les centrales solaires thermiques à concentration (CST) pourraient générer environ 7% des besoins mondiaux en électricité d'ici 2030, ainsi que le potentiel d'augmenter cette production d'environ 25% en 2050. Comparé aux panneaux PV, l'avantage de la technologie de l'énergie solaire concentrée est la production d'électricité pendant la nuit grâce à la capacité de stockage thermique des centrales thermodynamiques.

Selon la littérature, les centrales solaires thermiques à concentration sont une technologie qui produit de l'électricité en utilisant des miroirs réflecteurs pour réfléchir et concentrer l'irradiation solaire directe du soleil vers le récepteur et la convertir en chaleur pour créer de la vapeur pour entraîner une turbine produisant de l'énergie électrique. En outre, les centrales solaires sont généralement construites dans des régions arides où le paramètre d'irradiation normale directe (DNI) est important [4]. Dans les conditions environnementales difficiles présentées dans ces régions -à savoir- l'adhésion et l'accumulation de poussière, l'abrasion, l'oxydation, etc... ; la durabilité des réflecteurs, la réflectance spéculaire et ensuite l'efficacité globale du système sont diminuées.

Ces facteurs de dégradation peuvent sérieusement affecter la durabilité des réflecteurs solaires, entraînant une diminution drastique de leur réflectance spéculaire, et entraînant une diminution de l'efficacité des centrales solaires. En fait, une diminution de 5% de la réflectance spéculaire des miroirs réflecteurs entraînerait une augmentation significative du coût de l'énergie et de la consommation d'eau pendant le processus de nettoyage [5]. Par conséquent, des revêtements protecteurs sont nécessaires pour l'amélioration de la performance et de la durabilité des

réflecteurs. Aussi, afin d'améliorer la performance et la durabilité des réflecteurs, les recherches ont montré que l'application de revêtements antisalissure hydrophobes ou hydrophiles sur les miroirs réflecteurs représente une très bonne solution au problème de salissure [6].

Selon la littérature, plusieurs approches ont été proposées pour étudier l'effet de salissure sur le rendement des miroirs réflecteurs. Les salissures ont été quantifiées par la mesure de la masse de poussières sur les surfaces des miroirs. Aussi, les salissures ont été évaluées par la mesure de la réflectance de la lumière sur les miroirs et donc comparé la perte de réflectance de l'échantillon lorsqu'il est propre par rapport à souillé [7, 8]. En effet, toutes les recherches précédentes sur les salissures sont superficielles et n'impliquent pas les propriétés physico-chimiques des particules de poussières et aussi la caractérisation des miroirs réflecteurs. Également, les études montrent que la salissure est un phénomène très complexe difficile à prévoir [9].

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette recherche doctorale est d'améliorer la compréhension des mécanismes d'adhésion et d'accumulation de poussière sur les surfaces des miroirs réfléchissants dans les conditions climatiques marocaines. Par conséquent, dans le premier axe de cette étude, nos activités de recherche se concentrent sur l'étude de l'adhésion de la poussière sur les miroirs réflecteurs (avec et sans revêtement antisalissure) à travers l'analyse de l'énergie libre de surface, afin de déterminer le travail d'adhésion entre les particules de poussière et les surfaces des miroirs et par conséquent conclure sur la capacité de ces surfaces à attirer ou repousser les particules de poussière. L'objectif principal de ce première axe est l'étude d'adhésion de poussière sur les miroirs réflecteurs en développant une nouvelle approche basée sur la théorie DLVO qui est développée par les scientifiques russes Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek (1940) et décrit l'adhérence entre deux surfaces en interaction par l'équilibre de deux forces opposées, l'attraction de Van Der Waals et la répulsion électrostatique. Grâce à cette théorie, le travail d'adhérence a été évalué expérimentalement par le calcul de l'énergie de surface des particules de poussière et des miroirs réflecteurs. En outre, les types de minéraux argileux formant les particules de poussière ont été étudiées pour connaître les types d'argiles gonflantes affectées à la surface des miroirs réflecteurs. De nombreuses applications de cette approche peuvent être réalisées, notamment dans l'étude de l'adhérence de la poussière sur les panneaux photovoltaïques, les fenêtres autonettoyantes des bâtiments, les voitures autonettoyantes, qui minimisent la consommation d'eau pendant le processus de nettoyage.

Deuxièmement, dans le but d'évaluer l'effet de la salissure par une autre méthode, nous évaluons les forces d'adhérence entre les particules de poussière sur les miroirs réflecteurs. Dans cette partie, les forces d'adhésion des poussières ont été évaluées entre les miroirs hydrophiles/superhydrophiles et le miroir hydrophobe avec des particules de poussières de Ouarzazate et Midelt. Cette étude nous aide à faire le meilleur choix pour une sélection des types de revêtement antisalissure pour protéger les miroirs réflecteurs en fonction des types de régions; conditions sèches ou d'humidité élevée.

Troisièmement, en suivant la théorie DLVO étendue pour trois phases, de nouvelles solutions ont été présentées pour réduire la consommation d'eau dans le processus du nettoyage des miroirs réflecteurs. Certains additifs sont suggérés pour diminuer l'énergie libre de surface de l'eau et par conséquent augmenter l'étalement et la mouillabilité de l'eau au contact des miroirs à réflecteur. Cependant, le Ghassoul naturel, il est fortement recommandé de le mélanger avec de l'eau. En fait, le Ghassoul naturel contient à la fois un côté hydrophile (aimant l'eau), tel qu'un anion acide ($-\text{CO}^{2-}$ ou SO^{3-}) et un côté hydrophobe (qui déteste l'eau); un côté contient des charges positives et l'autre des charges négatives.

Quatrièmement, en suivant le calcul de l'adhérence des poussières et en élargissant nos recherches en conditions réelles, une microscopie des sols en plein air a été utilisée pour collecter les données d'images des échantillons souillés et corrélérer le résultat des paramètres météorologiques. Aussi, sur la base d'un réseau neuronal artificiel (RNA) et des données collectées, le dépôt de poussière et la remise en suspension ont été prévus en ne connaissant que les conditions météorologiques de certaines régions. La valeur ajoutée de cette partie est d'aider tous les acteurs des énergies renouvelables à choisir les régions optimales pour la construction des centrales solaires (chapitre VI).

Dans la section suivante, nous présentons une brève description de la structure de la thèse et de la méthodologie suivie dans cette présente thèse.

II. STRUCTURE DE LA THÈSE

Dans cette section, une brève description de la structure générale de la thèse, ainsi que le contenu des chapitres ; dans le **chapitre II**, nous présentons l'état de l'art des phénomènes d'encrassement derrière la thermodynamique de l'adhérence des poussières sur les surfaces des réflecteurs solaires. Tous les paramètres influençant l'adhérence des poussières tels que

l'énergie de surface et la rugosité de surface sont discutés. Un aperçu des méthodes de mesure de l'adhérence des poussières est également présenté.

Le **chapitre III** présente une nouvelle approche pour étudier l'adhérence des salissures des miroirs réflecteurs basée sur la théorie DLVO étendue. Dans ce chapitre, trois types de miroirs réflecteurs sont étudiés, le premier est le miroir commercial utilisé au projet NOOR, le second est un miroir réflecteur avec nano-revêtement hydrophobe d'alumine amorphe et le troisième est un miroir réflecteur avec nano-revêtement de TiO₂ hydrophile. De plus, les particules de poussière ont été collectées dans trois régions potentielles pour l'installation des centrales solaires thermique à concentration au Maroc (Ouarzazate, Tinghir et Midelt).

Le **chapitre IV** traite les mécanismes d'adhérence de la poussière et de l'évaluation des forces d'adhésion sur les surfaces des miroirs réflecteurs. La performance du revêtement antisalissure des miroirs réflecteurs dans l'environnement marocain a également été discutée.

Le **chapitre V** présente de nouvelles solutions qui peuvent être mises en œuvre dans le projet NOOR pour réduire la consommation d'eau dans le processus du nettoyage des miroirs réflecteurs. Cependant, basé sur la théorie DLVO étendue et le modèle Good-van OSS pour décrire l'adhérence entre les miroirs réflecteurs et les liquides de nettoyage pendant le processus de nettoyage. Certains additifs sont suggérés pour diminuer l'énergie libre de surface de l'eau et, par conséquent augmenter l'étalement et la mouillabilité de l'eau au contact des miroirs réflecteurs.

Le **chapitre VI** présente une implémentation d'un microscope des sols en extérieur (Outdoor Soiling Microscopy OSM). Sur la base de la microscopie des salissures en plein air, les échantillons souillés ont été collectés et corrélés avec les paramètres météorologiques, puis sur la base d'un réseau de neurones artificiels (RNA) et de données collectées, le dépôt de poussières et la remise en suspension ont été prédits en connaissant uniquement les conditions météorologiques de d'autres régions sélectionnées.

Références

- [1] J. Z. Thellufsen *et al.*, “Smart energy cities in a 100% renewable energy context,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 129, no. 109922, 2020.
- [2] O. Achkari and A. El Fadar, “Latest developments on TES and CSP technologies – Energy and environmental issues , applications and research trends,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 167, p. 114806, 2020.
- [3] M. Kharbach and T. Chfadi, “CO₂ emissions in Moroccan road transport sector: Divisia, Cointegration, and EKC analyses,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, pp. 396–401, 2017.
- [4] H. Ennaceri, A. Ghennioui, A. Benyoussef, A. Ennaoui, and A. Khaldoun, “Direct normal irradiation-based approach for determining potential regions for concentrated solar power installations in Morocco,” *Int. J. Ambient Energy*, pp. 1–9, 2016.
- [5] C. E. Kennedy, “Advances in concentrating solar power collectors:mirror and solar selective coatings,” *Assoc. Ind. Met. Coaters Laminators (AIMCAL), Fall Technical Conf.*, vol. 6103, 2007.
- [6] H. Ennaceri *et al.*, “Water-resistant surfaces using zinc oxide structured nanorod arrays with switchable wetting property,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 299, pp. 169–176, 2016.
- [7] B. Figgis, A. Ennaoui, B. Guo, W. Javed, and E. Chen, “Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 158–164, 2016.
- [8] B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi, and Y. Rémond, “Review of PV soiling particle mechanics in desert environments,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 872–881, 2017.
- [9] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, “Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel’s efficiency: Why and how,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1267–1278, 2016.

Chapitre II: État de l'art

I. Phénomènes des salissures et ses mesures**1. Phénomènes des salissures**

Dans un environnement désertique, la salissure est un problème majeur qui peut affecter les propriétés optiques des centrales solaires [1]. Tout d'abord, les phénomènes de salissure se réfèrent non seulement à l'adhésion et à l'accumulation de poussière, mais à toutes les particules qui peuvent affecter le rendement énergétique en raison des pertes d'absorption et de diffusion de la lumière incidente, comme la suie, et les excréments d'oiseaux [2].

En fait, la salissure est un phénomène très complexe difficile à prévoir. Cependant, pour comprendre les phénomènes des salissures, il est important de commencer par la définition des particules de poussière et des propriétés du vent et on termine avec l'étude du comportement des grains de poussière dans l'air, ainsi que l'interaction entre le mouvement du sable et les propriétés du vent.

La première étape consiste à étudier la composition sédimentaire des sols, car ils fournissent la matière source des tempêtes de sable. D'une part, la texture du sol est constituée de diverses particules minérales granulaires qui peuvent être classées en différentes catégories, en fonction de leur taille et de leur composition. Dans ce contexte, selon l'échelle de notation de Wentworth [3], le diamètre du sable varie entre 100 μm pour les particules fines et 2000 μm pour les particules très grossières, tandis que la taille des poussières est définie comme des particules d'argile très fines d'un diamètre inférieur à 100 μm . En outre, il faut considérer que les forces affectant sur un seul grain tombant dans l'air sont soumises à deux forces: Force de la gravité (\vec{g}), agissant vers le bas, et la résistance de l'air (\vec{R}), agissant dans une direction opposée au mouvement des particules. Ces forces sont équilibrées à l'équilibre de sorte que, selon les lois de Newton, et la vitesse de l'objet atteint une valeur constante. Cette valeur constante est connue comme la vitesse terminale de chute (Bagnold, 1954) [4].

Cependant, selon la taille, la forme et la vitesse du vent, les particules peuvent avoir un mode de transport très différent; soit des modes de saltation ou de suspension (Fig. 2.1). En général, ce sont les seuls modes atteignant une hauteur suffisante pour affecter les réflecteurs solaires.

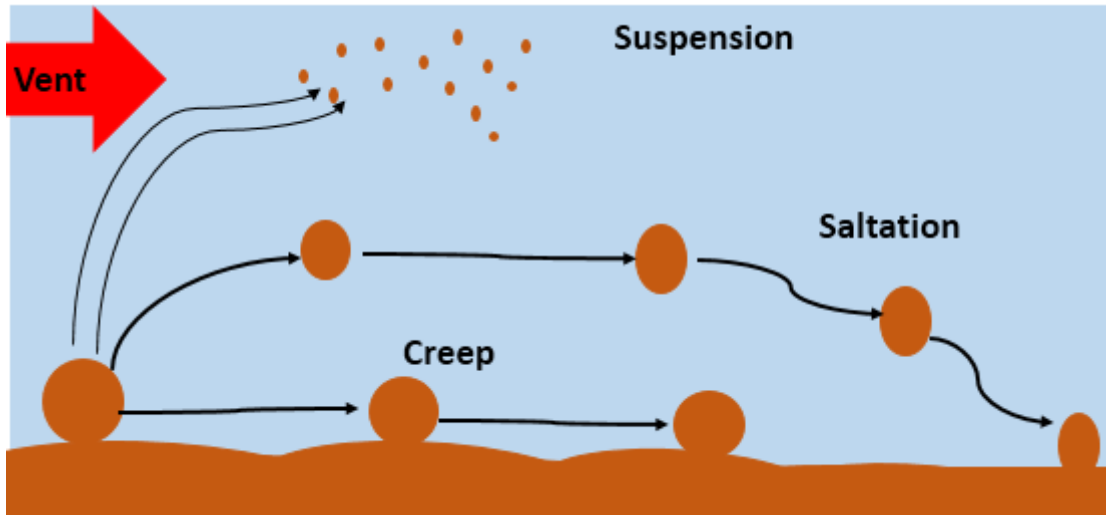


Fig. 2.1. Modes De Transport Des Particules De Poussière.

La vitesse du vent augmente, les particules d'une taille d'environ 100 μm sont les premières à se déplacer (Bagnold 1941). Cependant, d'après les recherches de Bagnold en 1941 [5], la vitesse du vent est la cause du transport et du dépôt de dépoussiérage, la vitesse du vent à laquelle la salaison pourrait se produire, appelée seuil de fluide et pourrait être exprimée comme l'équation suivante:

$$\mathbf{u}_{ft} = A_{ft} \sqrt{\frac{\rho_P - \rho_a}{\rho_a} g D_P} \quad (\text{II-1})$$

avec A_{ft} est une constante dépend des forces interparticulaires et du nombre de Reynolds, ρ_P la densité de la particule, ρ_a la densité de l'air, g l'accélération gravitationnelle, D_P le diamètre de la particule. Dans la littérature, selon Shao et Lu [6], l'expression de Bagnold décrit bien le comportement du seuil de fluide pour les particules supérieures à 100 μm , mais ne parvient pas à prédire l'existence du minimum du seuil de fluide à environ 75 μm et l'augmentation du seuil de fluide ultérieure avec la diminution de la taille des particules. Par conséquent, la nouvelle expression du seuil de fluide publiée par Shao et Lu qui considère l'équilibre entre les forces motrices et les forces retardatrices (liées à la cohésion et à la gravité) et suppose que la force cohésive est proportionnelle à la taille des particules. Le seuil de fluide peut être exprimé comme l'équation suivante:

$$\mathbf{u}_{ft} = A_{ft} \sqrt{\frac{\rho_P - \rho_a}{\rho_a} g D_P + \frac{\gamma}{\rho_a D_P}} \quad (\text{II-2})$$

où γ est le facteur d'échelle pour les forces interactives entre les particules.

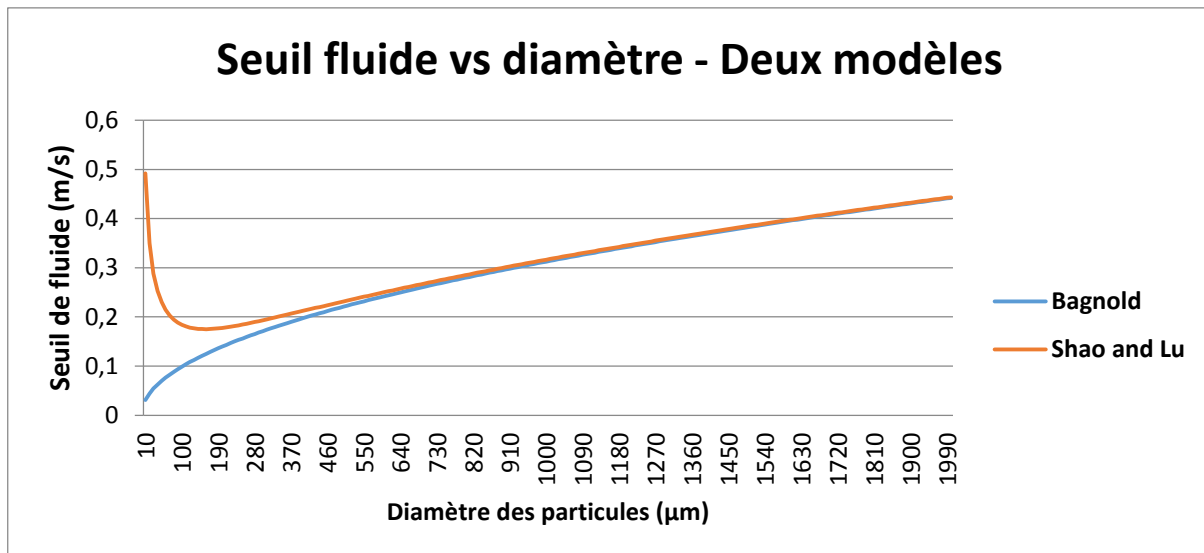


Fig. 2.2. Seuil de fluide en fonction du diamètre des particules (Modèle Bagnold / Shao Et Lu)

La figure 2.2 représente un graphique du seuil de fluide basé sur le diamètre des particules via les modèles Bagnold et Shao & Lu. D'après la figure, la description de Bagnold ne parvient pas à prédire correctement le seuil des particules pour des diamètres inférieurs à 75 µm car il ne considère pas les forces motrices et les forces retardatrices liées à la cohésion et à la gravité. Pour cette étude, on conclut que le modèle de Shao et Lu décrit bien le seuil des particules pour les différents diamètres des particules, et par conséquent les prochains calculés seront basés sur le modèle de Shao et Lu car la taille des poussières est définie comme des particules d'argile très fines d'un diamètre inférieur à 100 µm.

En plus de la définition de l'encrassement, l'effet des phénomènes d'encrassement dépend du taux de dépôt de poussières et du taux d'élimination par le vent. De plus, le taux de dépôt de poussière est corrélé à la concentration de poussière en suspension dans l'air décrite dans la section suivante.

1.1 Concentration de poussières en suspension dans l'air

Le phénomène de salissure est lié à la concentration de particules en suspension dans l'air. Cependant, la concentration de poussières en suspension dans l'air est le meilleur prédicteur de salissure. Dans les recherches précédentes [7], il a été trouvé une bonne relation entre les taux de salissure pour différents régions avec des concentrations de poussière pour les particules de poussière de 10 µm ou moins de diamètre comme illustré dans la figure 2.3.

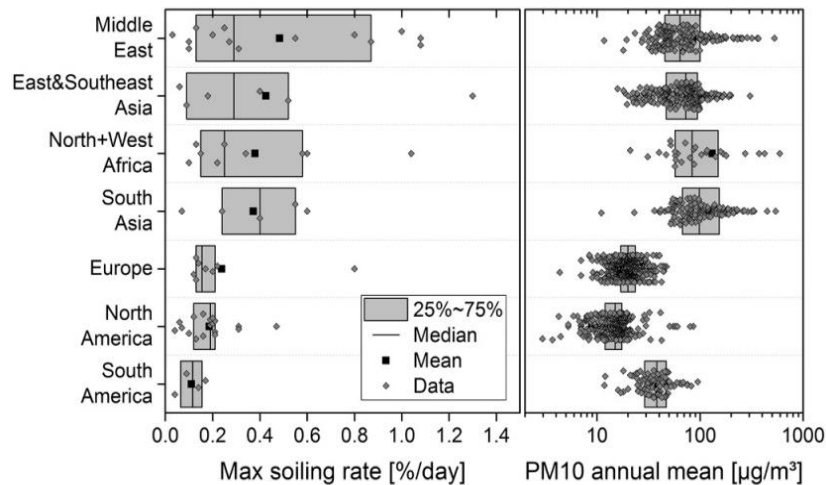


Fig. 2.3. Taux de salissure maximum par Jour VS Concentrations moyennes annuelles de poussières en suspension dans l'air

D'après la figure 2.3, il existe une bonne corrélation entre le taux de salissure maximal élevé et les concentrations annuelles moyennes de poussières en suspension dans l'air pour les particules de moins de 10 µm de différentes régions. Ces résultats ont une bonne relation avec une carte mondiale de la concentration médiane annuelle des poussières en suspension dans l'air pour les PM_{2.5} dans différentes régions mentionnées comme l'Afrique du Nord et de l'Ouest, l'Asie du Moyen-Orient et l'Est et le Sud-Est de l'Asie, caractérisées par des conditions climatiques arides et de très faibles précipitations (Fig 2.4).

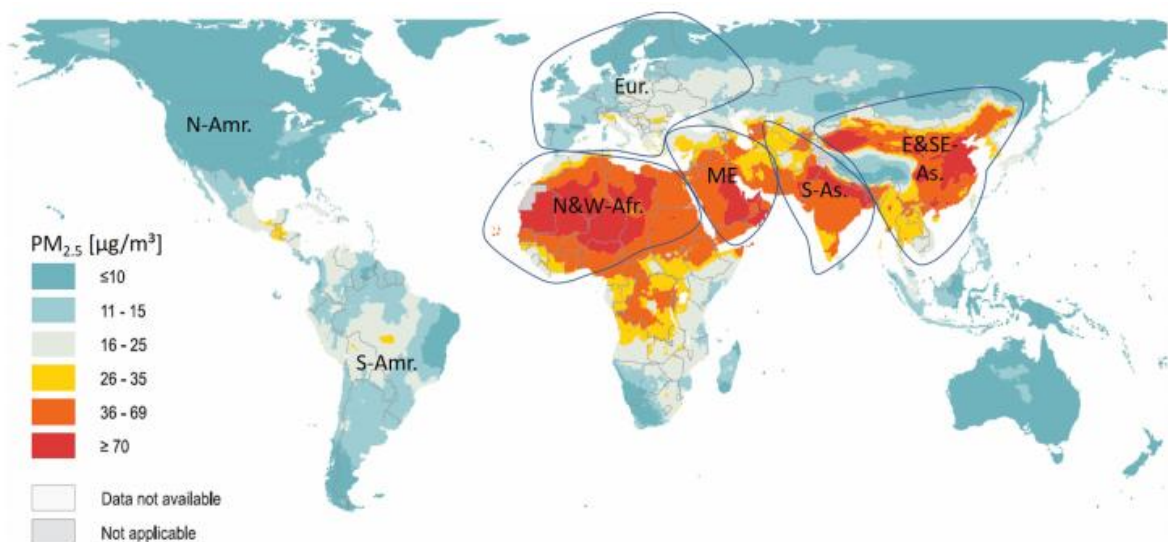


Fig. 2.4. Carte mondiale de la concentration moyenne annuelle de particules fines de 2,5 microns ou moins

La figure 2.4 présente la concentration médiane annuelle de $PM_{2,5}$ en microgrammes par mètre cube qui indique les régions avec des concentrations de poussières faibles et plus élevées.

1.2 Causes d'accumulation de poussière

Suite aux chiffres de concentration de poussières en suspension dans l'air, notre objectif est de comprendre les phénomènes de salissures ainsi que les facteurs affectant l'accumulation de poussières sur les surfaces [8]. En fait, l'accumulation de poussière dépend de quatre facteurs essentiels: Type de poussière, facteurs environnementaux, facteurs d'emplacement et facteurs d'installation (Fig. 2.5).

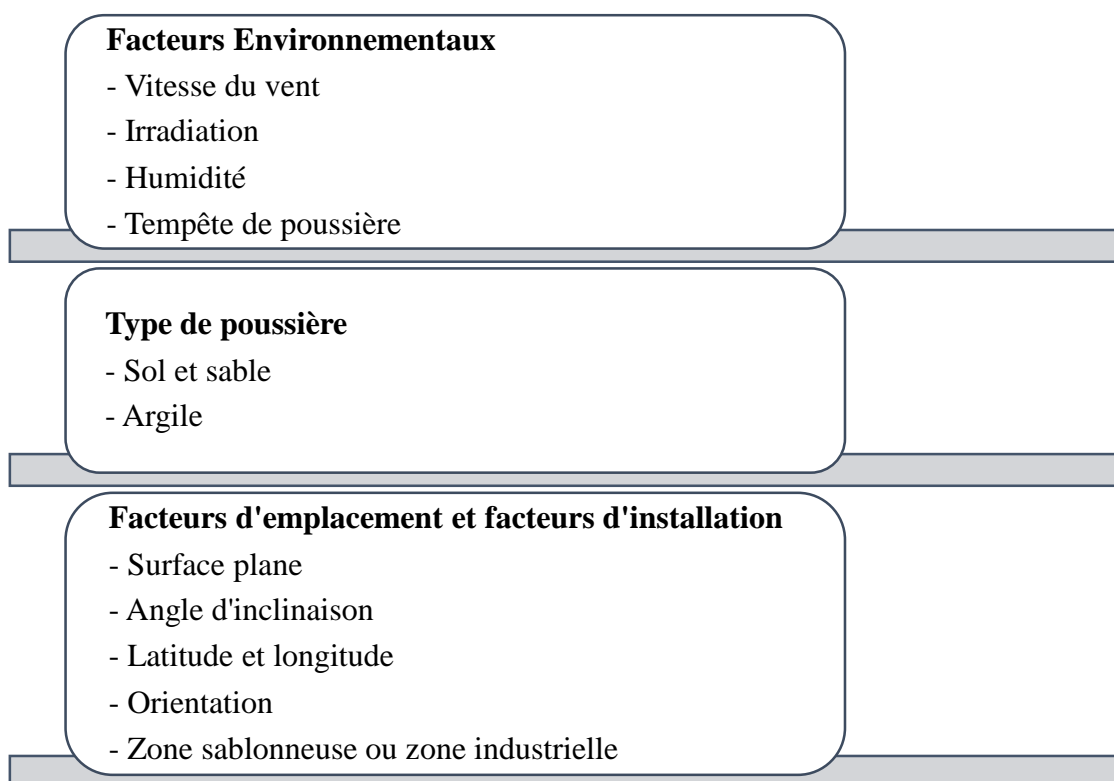


Fig. 2.5. Causes d'accumulation de poussière

Les quatre facteurs qui affectent l'accumulation de poussière sont interdépendants. Cependant, plus la surface est horizontale, plus la poussière peut s'accumuler; aussi lorsque la vitesse est plus élevée, la pression est plus faible et donc moins d'accumulation de sol. De plus, la surface peut contribuer au processus d'accumulation de poussière lorsque la surface est plus rugueuse.

2. Mesures de salissure

Nombreuses techniques sont disponibles pour quantifier les salissures sur les panneaux solaires et donc corrélées avec les pertes de rendement énergétique. En général, selon la littérature, ces

techniques sont classées en quatre sections: mesurer, la masse du sol, la sortie des modules solaires, la transmission de la lumière et la microscopie extérieure pour mesurer l'accumulation de poussière.

2.1 Masse du sol et puissance des modules solaires

L'accumulation de poussière à la surface des panneaux solaires peut réduire l'efficacité des modules solaires. Selon Al-hasan et al. [9], la masse du sol s'accumule proportionnellement à la perte de transmission et à la sortie des panneaux photovoltaïques. Ainsi, caractériser les salissures par la masse du sol est une méthode efficace pour mesurer les salissures qui nous permet de connaître la taille, la texture et la composition des particules de poussière adhérentes ainsi que de déterminer la quantité de rayonnement incident qui sera dispersée et absorbée. En plus de la masse du sol, la performance des panneaux PV est directement liée à la lumière incidente affectée par l'accumulation de masse du sol. Cependant, la sortie des modules solaires peut être quantifiée par le taux de salissure en utilisant la norme CEI 61724-1 [10], et donc calculer les courants de court-circuit de l'échantillon souillé sur les courants de court-circuit de l'échantillon propre.

Le taux de salissure peut être exprimé comme suit:

$$r_s(t) = \frac{I_{SC_{soil}}(t)}{I_{SC_{ref}}(t)} \quad (\text{II-3})$$

avec $I_{SC_{soil}}(t)$ et $I_{SC_{ref}}(t)$ sont les courants de court-circuit des échantillons solaires souillés et propres de référence.

Dans le contexte des miroirs réflecteurs, un certain nombre d'instruments portables sont utilisés pour mesurer la réflectance des miroirs solaires et donc corrélérer les pertes de rendement énergétique sur les surfaces solaires à l'adhérence des salissures. Les instruments incluent des appareils tels que le réflectomètre portable Abengoa Condor SR-6.1 pour mesurer la réflectance des miroirs [11]. Dans la littérature, un réflectomètre personnalisé a été développé pour capturer des images des contaminants du miroir et effectuer des mesures de perte de réflectivité quasi monochromatiques [12]. Le réflectomètre personnalisé basé sur un reflex numérique à objectif unique commercial (DSLRL) est présenté dans la figure 2.6.

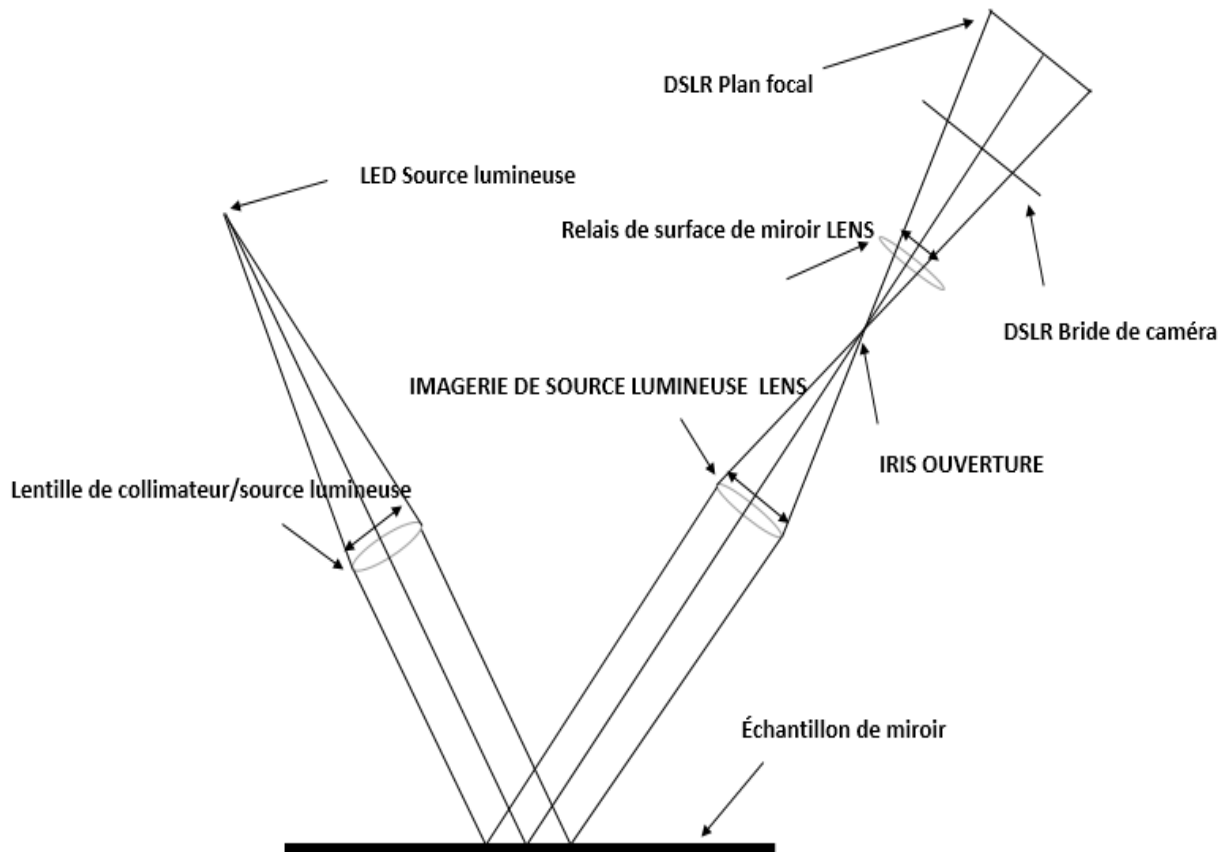


Fig. 2.6. *Disposition optique de la caméra de contamination basée sur un reflex numérique.*

La perte de réflectance est présentée dans l'équation développée par Barrier, collier (1980) [13]:

$$L = K + A. \sigma. \vartheta + B. \sigma. \vartheta^2 \quad (\text{II-4})$$

avec K est un bruit de résolution constant non lié à l'abrasion des poussières, σ la masse de poussière par unité de surface, A et B sont des variables de régression empiriques, ϑ la vitesse du vent.

2.2 Transmission lumineuse

Basé sur la revue de la littérature [14, 15], la salissure peut être caractérisée par la transmission de la lumière sur le substrat en verre. Dans le contexte des performances des panneaux PV, à l'aide d'un pyranomètre ou d'un spectromètre sur des échantillons de panneaux solaires, la perte de transmission des salissures peut être quantifiée de l'échantillon lorsqu'il est propre par rapport à souillé. Les particules de poussière ont tendance à atténuer préférentiellement les courtes longueurs d'onde lumineuses et donc à provoquer un léger décalage vers le rouge dans la lumière transmise.

2.3 Images par la microscopie des salissures en extérieur

La mesure des salissures peut également être quantifiée par une technique efficace basée sur les images d'échantillons souillés provenant de la microscopie des salissures en extérieur [16]. Le microscope a été développé par l'Institut de recherche sur l'environnement et l'énergie du Qatar, comprenant un petit microscope numérique de faible puissance connecté à un Raspberry Pi3 (Fig. 2.7).



Fig. 2.7. *Microscope de salissure extérieur (MSE)*

Le microscope comprend une lame de verre d'une surface de 4.40 mm^2 comme une surface de collecte des salissures et la résolution des images capturées était $0.935 \text{ }\mu\text{m}/\text{pixel}$. Dans cette recherche, le même type de microscope a été utilisé dans le chapitre VI. Le microscope pourra capturer les images des échantillons souillés et les transférer vers un logiciel ImageJ pour calculer le pourcentage de poussière accumulée.

II. Adhérence de la poussière sur les surfaces des miroirs réflecteurs

Les environnements désertiques sont considérés comme des sites appropriés pour l'installation des centrales CSC en fonction de l'irradiance normale directe élevée présentée dans ces zones. De plus, l'accumulation et l'adhésion de poussières sur les surfaces des miroirs présentent un obstacle à l'amélioration de l'efficacité des installations à énergie solaires concentrée. Dans cette section, nous présentons un aperçu des matériaux des miroirs réflecteurs et du type de revêtements anti-salissures ainsi que des techniques de mesure de l'adhérence de la poussière.

1. Les centrales thermique à concentration

Sur le marché des centrales solaires thermodynamiques à concentration CST, il existe quatre types de variantes de centrales CST [17], à savoir: Collecteurs Cylindro-paraboliques, collecteurs Fresnel linéaires, les centrales à tour et les collecteurs paraboliques. Une brève

description des technologies de production est fournie ci-dessous, suivie d'une discussion plus détaillée de chacune:

- ❖ **Collecteurs cylindro-paraboliques:** Selon la littérature, les collecteurs cylindro-paraboliques sont considérées comme les plus mûres des centrales solaires thermodynamiques. Comme illustré dans la figure suivante, les collecteurs cylindro-paraboliques dans lesquels les miroirs réflecteurs sont façonnés concentrent l'irradiation normale directe sur un récepteur cylindrique contenant un fluide caloporteur (huile thermique en général ou eau pour le cas de génération directe de vapeur) [18]. La température du fluide caloporteur (Heat transfer fluid HTF) passe de 293°C à 393°C, puis l'énergie thermique est utilisée dans le bloc thermique pour produire de l'électricité dans un générateur de vapeur conventionnel [18, 19].

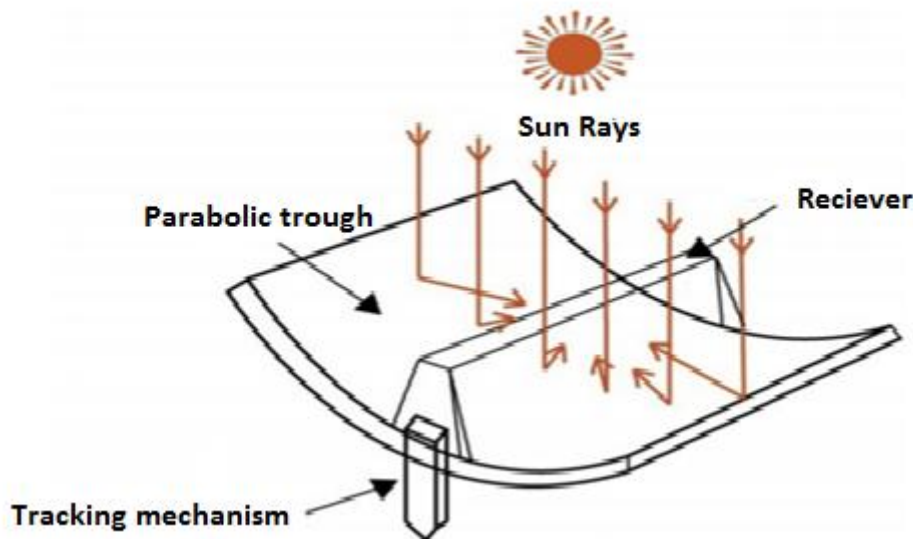


Fig. 2.8. Schéma du collecteur Cylindro-parabolique

- ❖ **Collecteurs Fresnel linéaires:** Les systèmes de Fresnel linéaires se composent d'un grand nombre de miroirs plats en rangées parallèles (voir Fig. 2.9). Les miroirs tentent de réfléchir le rayonnement vers le tuyau et les miroirs réflecteurs parallèles sont alignés dans une direction nord-sud pour maximiser l'efficacité des centrales solaires. En termes d'investissement, le Fresnel a utilisé une plus petite taille des miroirs; et donc le système Fresnel est peu coûteux par rapport aux autres types de centrales thermodynamiques [20].

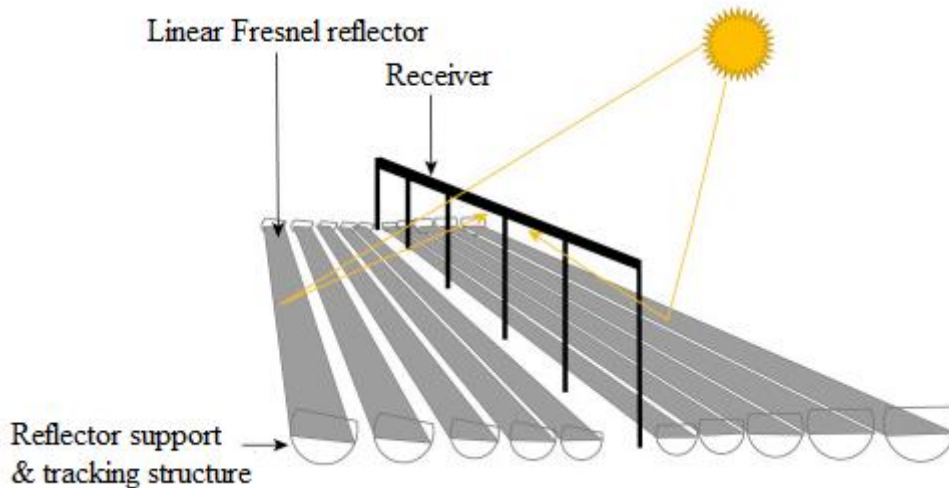


Fig. 2.9. Schéma du collecteur Fresnel linéaire

- ❖ **Les centrales à tour:** Comme illustré dans la figure suivante, les centrales solaires à tour utilisent des miroirs de poursuite (héliostats) pour concentrer la lumière du soleil sur un récepteur au sommet d'une tour (récepteur). Le récepteur contient un fluide caloporteur à une température d'environ 600°C pour générer de la vapeur et donc produire de l'électricité à travers la turbogénératrice [21]. Le récepteur contient un fluide caloporteur à une température d'environ 600°C pour générer de la vapeur et donc produire de l'électricité à travers la turbogénératrice.

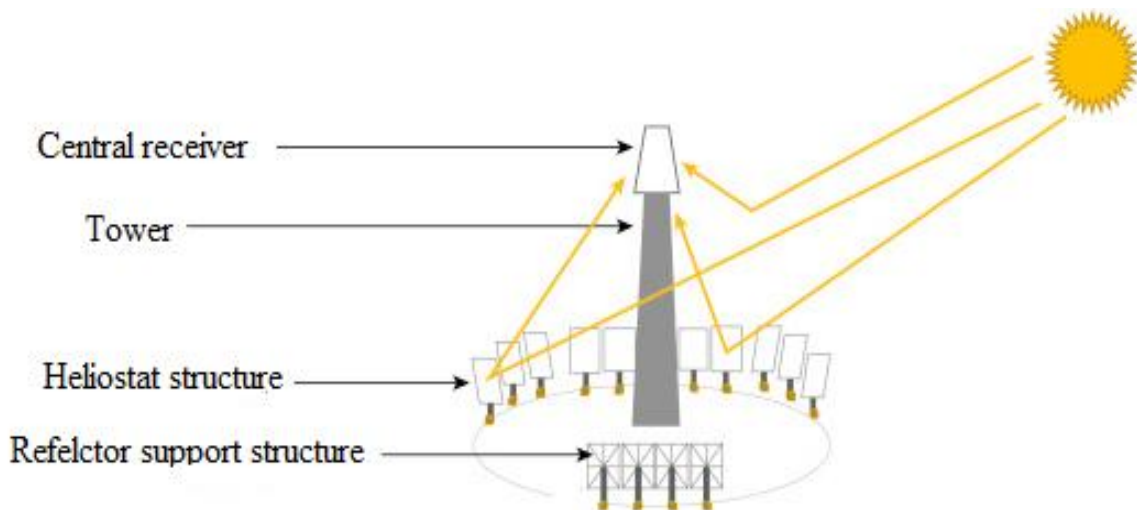


Fig. 2.10. Schéma de la centrale à tour

- ❖ **Les collecteurs paraboliques:** Le collecteur parabolique est constitué d'un miroir réflecteur parabolique en forme de parabole pour concentrer les radiations vers le récepteur situé sur le point focal de la parabole. Le récepteur contient le fluide caloporteur (HTF) qui faisait

fonctionner un moteur Stirling pour produire de l'électricité. De plus, pour maximiser son efficacité, la structure de la parabole solaire contient un système de suivi à deux axes pour suivre le soleil [22].

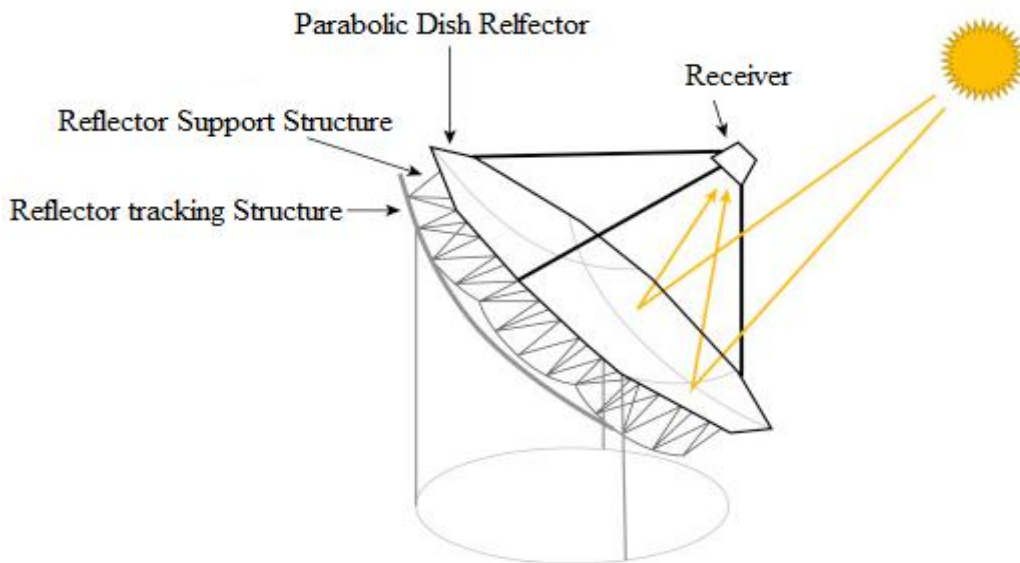


Fig. 2.11. Schéma du collecteur parabolique

Le champ solaire contient les miroirs réflecteurs, le récepteur avec fluide caloporteur, le système de suivi et l'échangeur de chaleur. Dans des conditions désertiques, sites appropriés pour les installations de centrales solaires, les miroirs réflecteurs sont considérés comme le composant principal des centrales solaires thermodynamiques, capables de transférer le rayonnement dirigé vers la surface d'un récepteur cible. Cependant, cet environnement de fonctionnement entraîne une exposition à des conditions météorologiques très difficiles, telles que des tempêtes de vent, et l'accumulation et l'adhérence de poussières et provoquant une diminution de leur réflectance spéculaire [23]. Dans ce contexte, l'objectif de ce travail est d'étudier l'adhérence des poussières sur les miroirs réflecteurs et donc de comprendre le mécanisme d'adhésion et de proposer des solutions pour améliorer la qualité des miroirs réflecteurs et donc l'efficacité des centrales solaires.

2. Miroirs réflecteurs

Pour les centrales solaires à concentration, le composant le plus important est les miroirs. Selon la littérature, deux types de structure de miroirs réflecteurs sont disponibles: les premiers miroirs de surface et les seconds miroirs de surface (Fig. 2.12 et Fig. 2.13).

- **Les premiers miroirs de surface:** Pour le premier miroir de surface, le revêtement métallique se dépose à l'avant du miroir, et donc la lumière incidente est directement réfléchi sur le dessus de la surface. En général, en raison des phénomènes d'encrassement, ce type de miroir réflecteur entraîne une exposition à de nombreux dommages et par conséquent une diminution de la réflectance spéculaire des miroirs.
- **Les seconds miroirs de surface:** Pour le deuxième miroir de surface, le revêtement métallique est déposé au dos d'un matériau transparent comme illustré sur la figure suivante (Fig. 2.13). L'avantage de ce type est qu'il y a une meilleure adhérence du film de dépôt sur le verre [24].

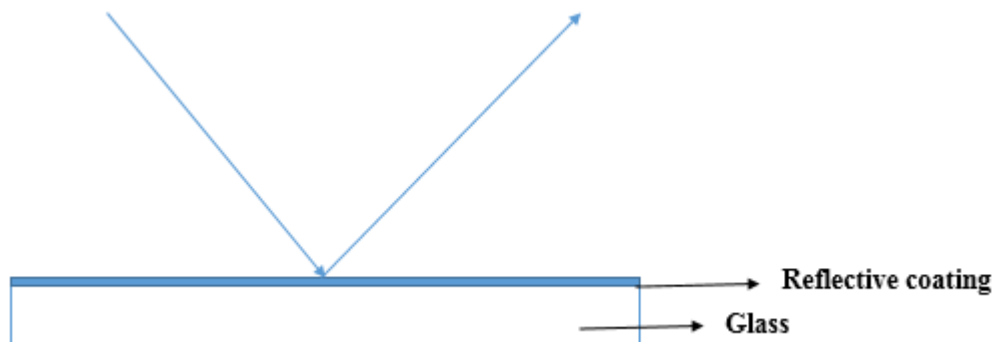


Fig. 2.12. Structures des premiers miroirs de surface

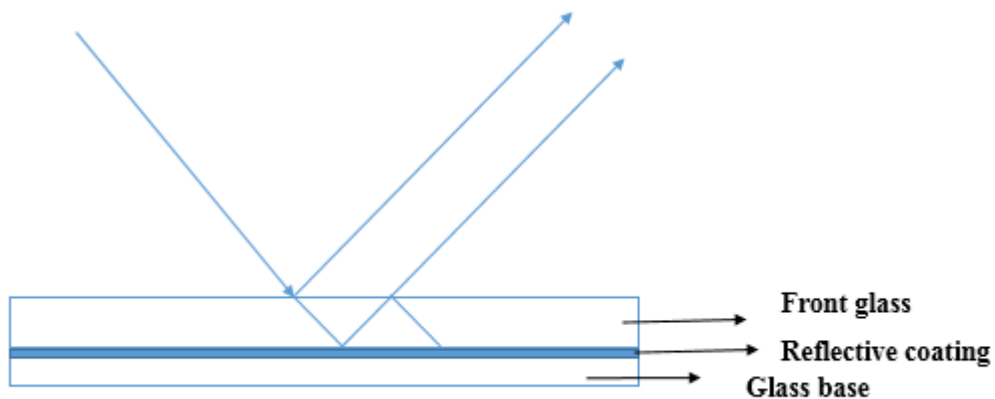


Fig. 2.13. Structures de miroirs de deuxième surface

En tant que matériaux constitutifs, la plupart des miroirs réflecteurs sont en argent ou en aluminium comme surfaces réfléchissantes. D'une part, par rapport à l'aluminium, l'argent a connu une réflectance élevée, une grande flexibilité et une légèreté, mais aussi le coût qu'il est plus important pour les miroirs réfléchissants en argent. D'autre part, l'argent a une faible durée de vie en raison du vieillissement des miroirs liés à la faible adhérence entre le revêtement d'argent et le substrat polymère [25].

- **La réflectance spéculaire**

Comme mentionné précédemment, pour les centrales solaires CSC, la réflectance spéculaire (SR) des miroirs est le paramètre le plus important. La lumière incidente peut être réfléchie, transmise, absorbée comme décrit dans la formule de la figure suivante [26]:

$$\mathbf{R + T + A = 1} \quad \text{(II-5)}$$

avec R la réflectance, T la transmittance, A l'absorption.

La réflectance de type des miroirs dépend des types de surface, de la réflectance spéculaire pour une surface lisse ou de la surface diffuse pour une surface rugueuse [27]. Sur une surface lisse, si l'irradiation incidente est réfléchi avec la même ampleur et intensité, la surface est spéculaire; mais sur une surface rugueuse lorsque le faisceau incident est réfléchi uniformément dans toutes les directions, la surface est diffuse comme illustré dans la figure suivante [28].

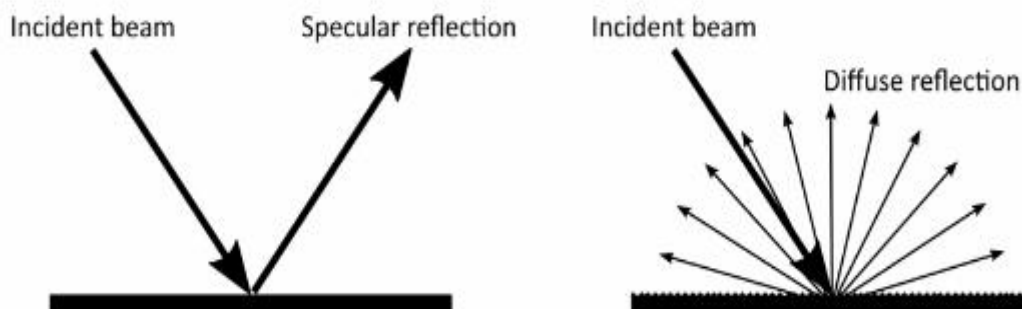


Fig. 2.14. *Réflectance spéculaire versus réflectance diffuse*

La réflectance spéculaire et la réflectance diffuse sont deux paramètres essentiels à la précision de la caractérisation des miroirs. Les types de miroirs réflecteurs candidats: Selon la littérature, sur le marché, quatre principaux types de miroirs réflecteurs sont disponibles; miroirs en verre argenté de première surface, miroirs en verre argenté de deuxième surface, miroirs en polymère argenté et miroirs en aluminium.

2.1 Miroirs en verre argenté de première surface

Les premiers miroirs sont obtenus par application de l'argent, sur la face avant du miroir. Comme illustré dans la figure suivante.

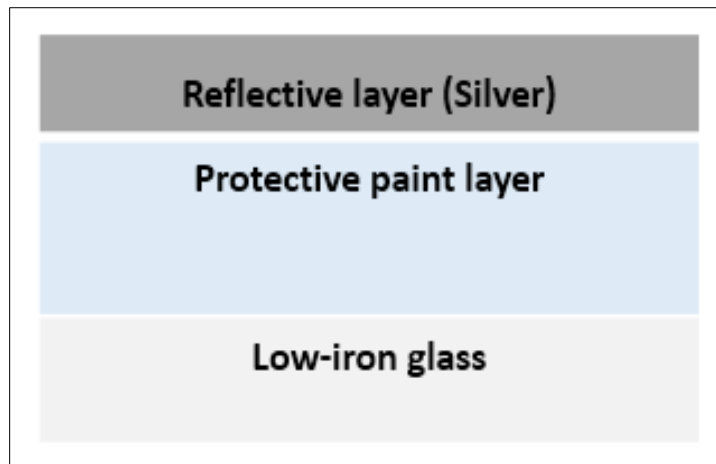


Fig. 2.15. *Miroir en verre argenté de première surface*

2.2 Miroirs en verre argenté de deuxième surface

Les seconds miroirs sont obtenus en appliquant l'argent, à la surface arrière du verre. Pour réduire la double absorption lors de la transmission de la lumière incidente, l'épaisseur du verre est comprise entre 1 à 4 mm. Dans la littérature [29], on distingue deux principaux types de miroirs en verre argenté de deuxième surface; verre mince lorsque le revêtement de l'argent est inférieur à 1 mm, et verre épais lorsque le revêtement de l'argent est d'environ 4 mm. De plus, pour protéger le revêtement d'argent de la dégradation, un certain nombre de revêtements sont appliqués comme illustré sur la figure suivante.



Fig. 2.16. *Verre argenté de deuxième surface*

2.3 Miroirs en polymère argenté

Les miroirs en polymère argenté sont obtenus en appliquant le film polymère sur la couche métallique réfléchissante recouverte d'un adhésif et le matériau du substrat comme illustré dans la figure suivant.

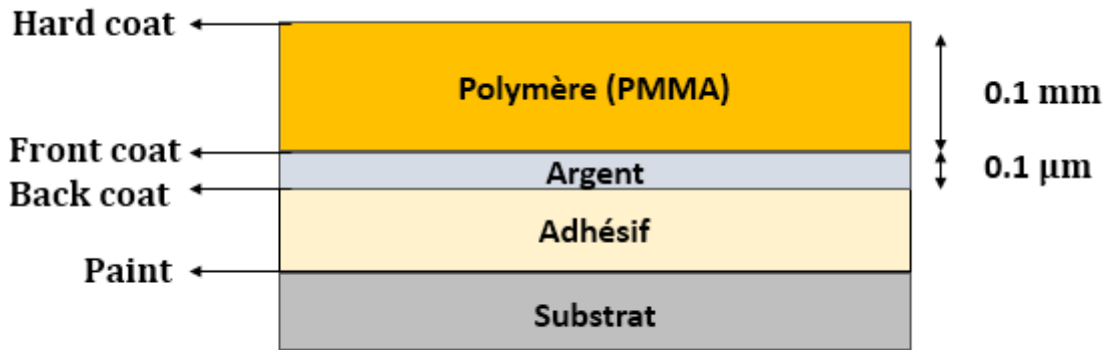


Fig. 2.17. Miroirs en polymère argenté

Le film polymère typiquement Poly-méthyl-méthacrylate (PMMA) se caractérise par sa haute transmittance et sa capacité à résister aux dommages et aux rayons UV. Par rapport aux miroirs en verre argenté, les miroirs en polymère argenté sont plus flexibles et aussi moins chers [30].

2.4 Miroirs en aluminium

La structure des miroirs en aluminium se compose d'un film d'aluminium déposé sur une surface en aluminium poli et protégé des dommages par l'application de revêtements d'oxydation de silice [31], comme illustré dans la figure 2.18. Généralement, selon leur flexibilité, l'application des miroirs en aluminium se fait dans les collecteurs Fresnel ou les cuiseurs solaires.

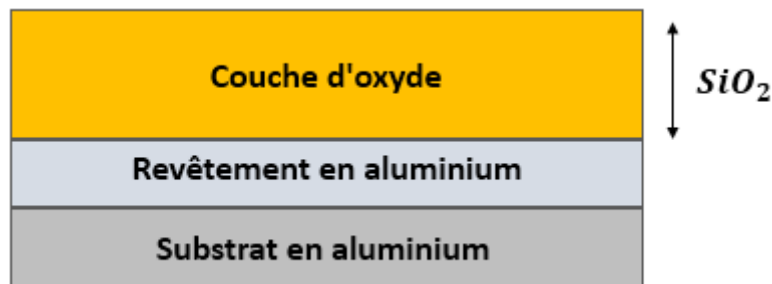


Fig. 2.18. Miroirs en aluminium

3. Revêtement antisalissure et la thermodynamique du revêtement autonettoyant

3.1 Revêtement antisalissure pour miroirs réflecteurs

Pour protéger les miroirs des phénomènes de salissure, trois principaux éléments du revêtement antisalissure sont présentés pour minimiser le dépôt de poussière et les pertes d'efficacité de l'installation des centrales solaires. Le premier type est un revêtement hydrophobe (hydrofuge),

le deuxième type est un revêtement hydrophile et le troisième type est un revêtement superhydrophile photocatalytique.

- **Revêtements hydrophobes**

Revêtement hydrophobe / Superhydrophobe (ou hydrofuge appelé aussi «effet Lotus») est une propriété de la surface qui a un angle de contact avec l'eau élevé et une faible énergie de surface pour créer l'effet autonettoyant [32]. Lorsque l'angle de contact avec l'eau dépasse 90° , la surface est hydrophobe, mais la surface est superhydrophobe lorsque l'angle de contact est supérieur à 150° (Fig. 2.19). Les surfaces hydrophobes / superhydrophobes tentent de minimiser le contact avec la surface du matériau.

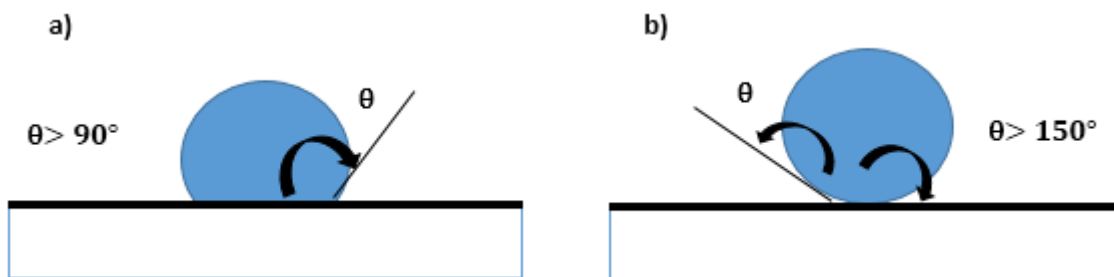


Fig. 2.19. Surfaces hydrophobes (a) et superhydrophobes (b)

Sur la base de la littérature, certains revêtements hydrophobes sont disponibles tels que SiO_2 , Al_2O_3 , SnO_2 , verres en silicate, etc. Les revêtements anti-salissures à base de Fluoropolymers combinés à base de silice sont les matériaux les plus appliqués en tant que revêtements anti-salissures hydrophobes pour créer l'effet autonettoyant [33].

- **Revêtements hydrophiles**

Surfaces hydrophiles / superhydrophiles caractérisées par leur énergie de surface élevée et leur capacité à maximiser le contact avec le matériau et à se répandre sur la surface (molécules polaires). Lorsque l'angle de contact avec l'eau est inférieur à 90° , la surface est hydrophile, mais la surface est superhydrophile lorsque l'angle de contact est inférieur à 45° comme illustré dans la figure suivante.

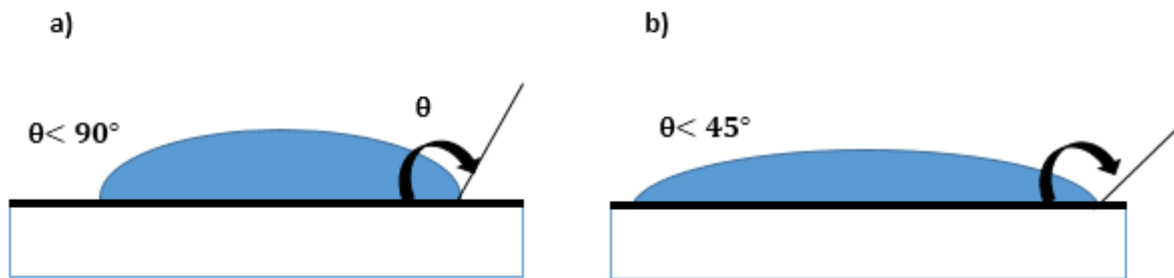


Fig. 2.20. Surfaces hydrophiles (a) et superhydrophiles (b)

Les revêtements superhydrophiles ont la capacité d'augmenter la transparence et de minimiser la saleté si les angles de contact sont inférieurs à 45° lorsque la propriété photocatalytique est activée, dans la section suivante, certains revêtements photo-catalytiques sont présentés.

- **Revêtements superhydrophiles photo-catalytiques**

Les revêtements photo-catalytiques à base d'oxydes de métaux de transition sont l'une des meilleures méthodes pour réduire la poussière et la saleté à la surface des réflecteurs. Dans la littérature, de nombreux candidats à la photo-catalyse tels que TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , et CeO_2 ..., TiO_2 est devenu le photo-catalyseur de référence avec la transparence élevée, la stabilité chimique (résistance à la photo-corrosion) et sa capacité à décomposer la matière organique à H_2O et CO_2 , dont l'objectif des propriétés des revêtements anti-salissures (Honda-Fujishima effect) [34, 35].

2.2 Effet autonettoyant sur les surfaces des réflecteurs

La création d'un effet autonettoyant sur les surfaces des réflecteurs est une méthode essentielle pour réduire l'adhérence et l'accumulation de poussière et ainsi améliorer l'efficacité des miroirs réflecteurs. Comme mentionné précédemment, l'effet autonettoyant de la surface est corrélé à l'angle de contact avec l'eau et à l'énergie de surface. Cependant, la propriété de mouillabilité dépendait de la composition chimique de la surface. Dans ce contexte, de nombreuses méthodes sont disponibles pour calculer l'angle de contact avec l'eau de la surface. Toutes les méthodes sont corrélées avec le modèle de Young qui calcule l'angle de contact d'une gouttelette déposée sur une surface parfaitement plane.

- **Modèle de Young**

Sur une surface idéale (lisse et homogène) [36], l'angle de contact est donné par l'équation de Young:

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (\text{II-6})$$

avec θ_Y l'angle de contact sur la surface solide, γ_{SV} la tension superficielle solide-vapeur, γ_{SL} la tension superficielle solide –liquide, γ_{LV} la tension superficielle liquide-vapeur..

Tel que présenté par l'équation de Young, la caractérisation de surface suppose qu'il n'y a qu'un contact en équilibre. En fait, il existe une hystérésis de l'angle de contact (Fig. 2.21). Le terme «**hystérésis d'angle de contact**» fait référence aux différences observées entre les angles de contact avançant et reculant, comme illustré dans la figure suivante.

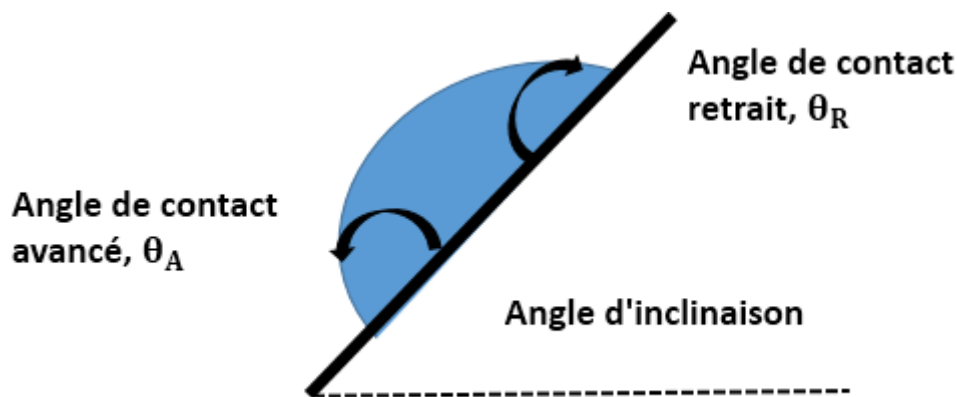


Fig. 2.21. *Hystérésis d'angle de contact*

L'angle de contact hystérésis est donné par l'équation:

$$\Delta\theta = \theta_a - \theta_r \quad (\text{II-7})$$

En 1962, Furmidge représente la force d'hystérésis par unité de longueur requise pour ancrer la gouttelette d'eau sur la surface [37].

$$H = \frac{mgs\sin\alpha}{w} = \gamma(\cos\theta_r - \cos\theta_a) \quad (\text{II-8})$$

avec θ_r l'angle de contact récurrent, θ_a l'angle de contact avancé, α est l'angle d'inclinaison minimal pour faire glisser la goutte, m la masse de la goutte, w la largeur de la goutte et γ la tension superficielle liquide/air.

Lorsque la surface est très lisse (surface idéale), la gouttelette glisse sans aucune hystérésis si la surface est inclinée. Cependant, selon la littérature, les principales causes affectant l'hystérésis de l'angle de contact sont la rugosité de la surface et les hétérogénéités (Shuttleworth

et Bailey, 1948) [38]. Sans aucune hystérésis, la valeur de l'angle de contact sur la surface a été couverte par deux modèles principaux, le modèle Wenzel en 1936 et Cassie et Baxter en 1944.

- **Modèle de Wenzel et Cassie & Baxter**

Sur la base de l'équation de Young, il existe deux modèles principaux prenant en compte la rugosité de surface; Modèle Wenzel et modèle Cassie & Baxter. Le modèle de Wenzel prend en compte le changement géométrique dû à la rugosité de surface (Eq. II-9) [39]. Comme illustré dans la figure suivante, il existe une certaine rugosité de surface sur la surface réelle.

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_Y = r \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (\text{II-9})$$

avec θ_w est l'angle de contact apparent qui correspond à l'état d'équilibre stable, θ_Y est l'angle de contact apparent qui correspond à l'état d'équilibre stable [40].

Le facteur de rugosité de surface est donné par :

$$r = \frac{\text{Surface réelle}}{\text{Surface géométrique}} \quad (\text{II-10})$$

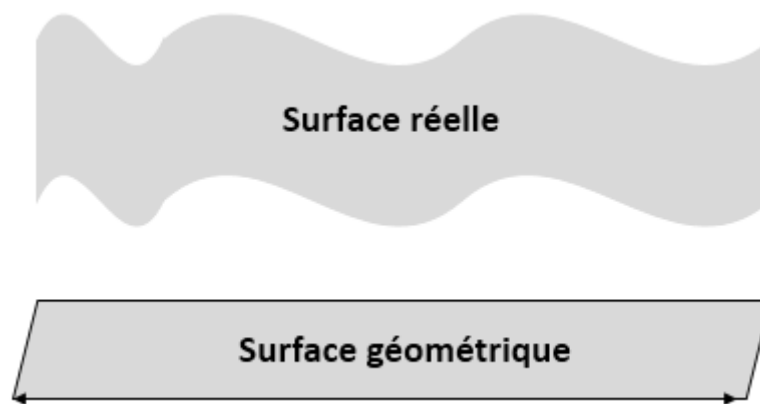


Fig. 2.22. Rugosité de surface sur la surface réelle

En plus du modèle de Wenzel, l'équation donnée par le modèle de Cassie & Baxter décrit le phénomène des poches d'air entre une goutte de liquide et les dépressions de surface.

$$\cos \theta_{C-B} = r \cos \theta + r' \cos \theta' \quad (\text{II-11})$$

avec r est la fraction de surface solide, et r' est la fraction de surface de l'air ($r + r' = 1$).

Lorsque l'une des surfaces est l'interface air-liquide: $\theta' = 180^\circ$

$$\cos \theta_{C-B} = -1 + r(1 + \cos \theta) \quad (\text{II-12})$$

L'augmentation de la fraction de surface de l'air liée au phénomène de poches d'air entre une goutte de liquide et la surface entraîne l'hydrophobie à la surface. Comme le montre la figure suivante, nous présentons l'illustration des deux modèles qui décrivent la mouillabilité en surface.

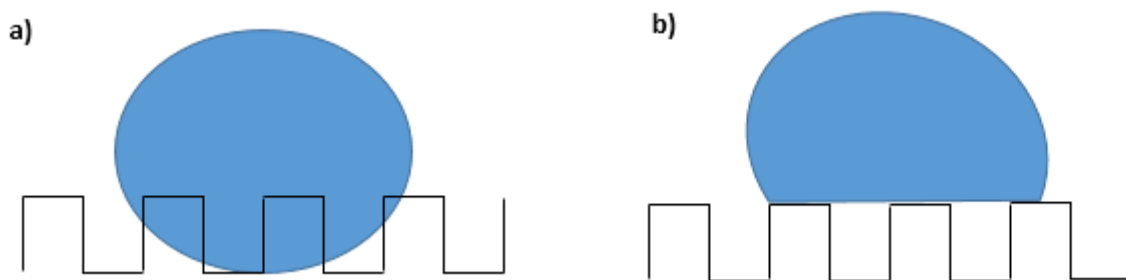


Fig. 2.23. Configuration de Wenzel (a) et configuration de Cassie & Baxter (b).

Pour le modèle de Wenzel, l'augmentation de la rugosité de surface amplifie l'hydrophilie naturelle ou l'hydrophobie du matériau (plus hydrophobe pour les surfaces hydrophobes, et plus hydrophile pour les surfaces hydrophiles). Ainsi, puisque le système est à plus haute énergie pour les surfaces hydrophobes, le modèle Cassie & Baxter propose que l'air puisse être des poches entre une goutte de liquide et la surface (Fig 2.23). Les critères de transition des surfaces à motifs pour le modèle de Cassie & Baxter au modèle de Wenzel sont discutés dans la section suivante.

- **Critères de transition du modèle Cassie & Baxter vers Wenzel pour les surfaces à motifs**

Selon Bharat Bhushan et al. [41], un critère de transition a été développé pour prédire le passage du modèle Cassie – Baxter au modèle Wenzel. En effet, la transition a été examinée sur la base de la présence de traces de poussière à la surface après évaporation des gouttelettes [42], aussi théoriquement, la transition a été décrite en considérant une petite goutte d'eau sur une surface superhydrophobe comme illustré dans la figure suivante.

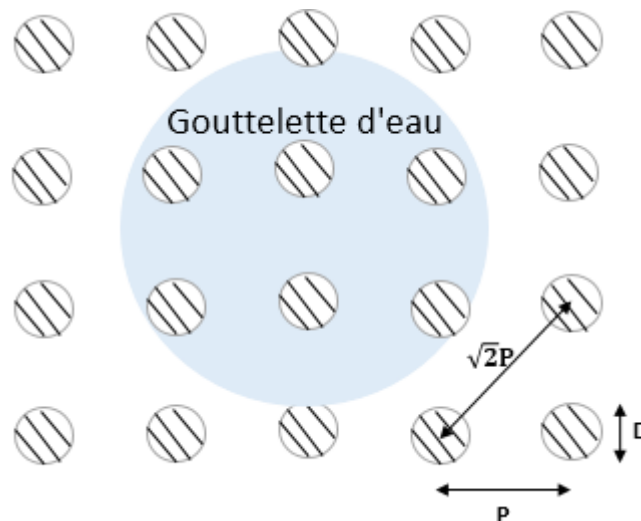


Fig. 2.24. Gouttelette d'eau sur une surface superhydrophobe composée d'un réseau régulier de piliers circulaires.

La courbure de la gouttelette est régie par l'équation de Laplace qui caractérise la relation entre la goutte maximale d'une gouttelette (δ), le pas (P) et la hauteur des piliers (H) [43]. En effet, si le statisme est beaucoup plus important que la profondeur de la cavité, la gouttelette contactera simplement le fond des cavités entre les piliers (pas d'air disponible). Selon la figure 2.24, la gouttelette d'eau sera suspendue au fond des cavités entre les piliers. Une autre vue en coupe de gouttelettes sur les surfaces superhydrophobes peut être illustrée dans la figure suivante. De plus, selon l'équation de Laplace, la gouttelette maximale est calculée en utilisant l'équation suivante:

$$\delta \approx \frac{(\sqrt{2}P - D)^2}{R} \tag{II-13}$$

avec H est la hauteur des piliers, P le pas et D le diamètre.

Lorsque la gouttelette maximale est supérieure à la hauteur des piliers ($\delta \geq H$). Donc pas de poche d'air entre eux et donc la transition du régime Cassie-Baxter au régime Wenzel.

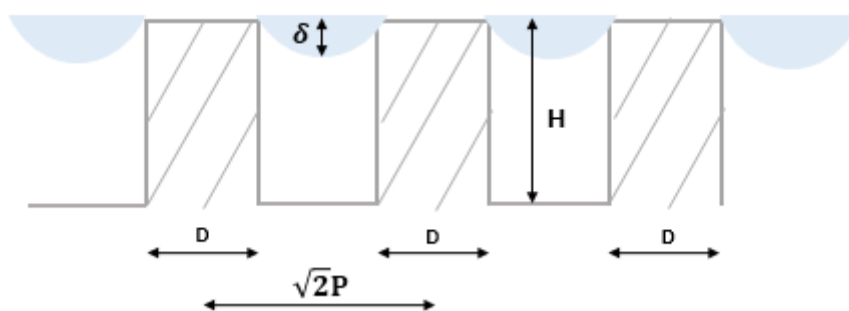


Fig. 2.25. La goutte maximale d'une gouttelette (δ) entre deux piliers

- **Mesure de rugosité de surface**

La rugosité de surface est une mesure de la texture de la surface, différents paramètres de rugosité sont utilisés tels que: rugosité arithmétique ou rugosité moyenne (R_a), rugosité quadratique moyenne (R_q) [44]. Une valeur de rugosité peut être calculée soit sur une ligne de profil (R_a , R_q) soit sur une surface (S_a , S_q). Cependant, la rugosité de la ligne de profil est plus courante mais les paramètres de rugosité de la zone donnent des valeurs plus significatives. La rugosité de surface de l'échantillon peut être mesurée par plusieurs méthodes différentes. Dans la littérature, la microscopie à force atomique (AFM) et le profilomètre sont souvent utilisés pour mesurer la rugosité de surface mais il faut noter que la zone de mesure de l'AFM est généralement limitée [45].

Le profileur de surface de stylet DektakXT est un outil avancé de mesure de la hauteur des marches en couches minces et épaisses. En plus de profiler la topographie de surface et l'ondulation, le système DektakXT mesure la rugosité communément appelée R_a .



Fig. 2.26. Profilomètre

Dans un profilomètre, le stylet est couplé mécaniquement au noyau d'un LVDT (Linear Variable Differential Transformer). Le LVDT produit un signal analogique correspondant au mouvement vertical du stylet. Ce signal est amplifié, conditionné, numérisé et stocké pour manipulation, analyse et affichage.

$$R_a = \frac{1}{n} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (\text{II-14})$$

avec n est le nombre de données prises le long de la longueur d'échantillonnage.

4. Mesure de l'adhérence de Poussière

L'adhésion est généralement définie par l'attraction physique entre des substances différentes. Selon David J. Quesnel et al. [46], les particules adhèrent aux surfaces en raison à la fois de l'existence de forces d'attraction entre les particules et les substrats. Cependant, dans notre contexte de recherche, la mesure de l'adhérence de la poussière sur les surfaces des réflecteurs est le meilleur moyen de connaître l'effet de la salissure sur les miroirs solaires et de conclure également sur le meilleur revêtement antisalissure afin d'éliminer les particules de poussière sur les surfaces des miroirs et améliorer leur efficacité.

La littérature sur l'adhérence de la poussière montre une variété d'approches pour mesurer l'adhérence de la poussière sur les surfaces. Dans cette section, une revue de la littérature des méthodes de mesure de l'adhérence des poussières a été présentée. Premièrement, sur la base de l'énergie libre de surface et de la théorie DLVO étendue, l'adhérence de la poussière peut être évaluée en utilisant l'équation de Dupre ou l'équation de Hamaker; ainsi que selon Rima Isaifan et Klemens Ilse [47, 48], l'adhérence peut être évaluée à l'aide de forces d'adhérence. Deuxièmement, selon Kazmerski et al. [49] et Cher Lin et al. [50], l'adhérence des poussières sur la surface peut être évaluée à l'aide de la microscopie à force atomique (AFM).

4.1 La mesure de l'adhérence de poussière basée sur la théorie DLVO étendue

- **Théorie DLVO et la théorie DLVO étendue**

Selon N.V. Churane et al. [51], la théorie DLVO développée par les scientifiques russes Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek en 1940 constitue la base de la science moderne des colloïdes et des interfaces. La théorie DLVO décrit l'adhésion entre deux surfaces en interaction par l'équilibre de deux forces opposées, l'attraction de Van der Waals et la répulsion électrostatique [52]. Ainsi, selon la théorie DLVO, l'expression du milieu énergétique libre d'interaction totale entre deux surfaces en interaction est définie comme suit:

$$W(\mathbf{r})_{\text{Total}} = W(\mathbf{r})_{\text{vdW attract}} + W(\mathbf{r})_{\text{electrostatic repuls}} \quad (\text{II-15})$$

avec $W(\mathbf{r})_{\text{vdW attract}}$ représente la force d'attraction van der Waals, et $W(\mathbf{r})_{\text{El rep}}$ représente la force électrostatique exprimée par le modèle du Gouy-Chapman comme l'expression suivante:

$$W(\mathbf{r})_{\text{electrostatic repuls}} = \frac{64\pi n_0 k_b T r_{\text{sphere}} \gamma^2 e^{-kr}}{k^2} \quad (\text{II-16})$$

γ est le potentiel de surface réduit: $\gamma = \tanh\left(\frac{Ze\Psi}{4k_B T}\right)$

avec Ψ est le potentiel en surface, n_0 Le nombre d'ions présents dans la masse (concentration en masse des ions), k_b la constante de Boltzmann, T la température en Kelvin, r la distance intermoléculaire (Distance de séparation), Z la valence des ions, e la charge élémentaire, K l'inverse de la longueur de Debye (la longueur de Debye est l'épaisseur de la double couche diffusée)

D'après la littérature [53], la théorie DLVO classique ne prend pas en compte les interactions polaires ni les interactions acide-base de Lewis. Cependant, l'énergie totale libre d'interaction est alors exprimée par la théorie DLVO étendue, exprimée par l'équation suivante:

$$W(\mathbf{r})_{Total} = W(\mathbf{r})_{vdW\ attr} + W(\mathbf{r})_{elect\ rep} + W(\mathbf{r})_{Lewis\ interaction} \quad (\text{II-17})$$

En plus de la théorie DLVO étendue, Fowkes a proposé en 1962 que le travail d'adhésion (W_{Adh}) entre deux surfaces en interaction soit présenté par l'équation [54]:

$$W_{Adh} = W_{Adh}^d + W_{Adh}^{nd} \quad (\text{II-18})$$

avec W_{Adh}^d représente l'interaction de dispersion (ou composante polaire), et W_{Adh}^{nd} représente l'interaction de non-dispersion (ou composante non polaire).

Lorsque la composante des interactions de non-dispersion est nulle, tous les solides auraient des propriétés hydrophobes. Les interactions de non-dispersion ou les interactions non polaires, y compris la liaison ionique ainsi que l'interaction de liaison hydrogène. Donc, selon Laskowski et al. [55], W_{Adh}^{nd} est nul signifie que la surface du solide est exempte de tout groupe ionique ou polaire avec lequel les molécules d'eau peuvent se lier. Cependant, selon l'approche Fowkes et Good van Oss l'énergie libre de surface (ELS) d'un solide est une somme de composants indépendants, associés à des interactions spécifiques:

$$\gamma_i = \gamma_i^d + \gamma_i^p + \gamma_i^h + \gamma_i^i + \gamma_i^{AB} \quad (\text{II-19})$$

avec $\gamma_i^d, \gamma_i^p, \gamma_i^h, \gamma_i^i$ et γ_i^{AB} sont les composants dispersion (Londres), polaire (Kessom), hydrogène, induction (Debby) et acide-base.

Fowkes a étudié principalement les systèmes contenant une substance (solide ou liquide) dans laquelle seules les interactions de dispersion apparaissent. Selon Fowkes, les interactions de dispersion sont liées aux interactions de Londres, résultant des fluctuations dipolaires électroniques. La méthode d'Owens-Wendt concerne à la fois les interactions polaires et non

polaires et basée sur des mesures d'angle de contact uniquement pour deux liquides standard ayant une polarité différente, ce qui simplifie l'expérience. Cette approche est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour calculer l'énergie libre de surface des matériaux polymères.

La description la plus large des phénomènes de surface déterminant la valeur de l'énergie libre de surface est considérée dans l'approche de Good Van Oss [56, 57].

Selon l'approche de Good-van Oss, la composante dispersive contient les interactions des dipôles instantanés γ^{LW} (Lifshitz–Van Der Waals), et le composant polaire γ^{AB} est divisé en un acide (accepteur d'électrons) et un composant basique (donneur d'électrons).

$$\begin{cases} \gamma_S = \gamma_S^{LW} + \gamma_S^{AB} \\ \gamma_L = \gamma_L^{LW} + \gamma_L^{AB} \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

$$\gamma_L^{AB} = 2\sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} \quad \text{et} \quad \gamma_S^{AB} = 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-}$$

avec γ_s^+ est le composant acide de Lewis, et γ_s^- est le composant base de Lewis.

La composante polaire γ^{AB} de l'énergie de surface peut être jusqu'à deux ordres de grandeur supérieure aux composantes de Van der Waals et elle est la plus forte à moins de 10Å°. Les interactions de Van der Waals sont généralement plus faibles que les interactions électrostatiques; cependant, γ_s^{LW} influencent les interactions sur de plus longues distances [58].

$$\gamma_{SL}^{Tot} = \gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW} - 2\sqrt{\gamma_L^{LW} \gamma_S^{LW}} + 2(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+}) \quad (\text{II-21})$$

L'équation d'Young s'écrit :

$$\gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos \theta_Y + \gamma_{SL} \quad (\text{II-22})$$

En combinant l'équation II-21 avec l'équation de Young, nous obtenons l'équation suivante en utilisant l'approche de Good-van Oss:

$$2 \left\{ \sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} \right\} = \gamma_L (1 + \cos \theta_Y) \quad (\text{II-23})$$

L'énergie de surface libre est déterminée à partir des mesures des angles de contact de trois liquides différents (liquides neutres, polaires et non polaires) de composants de tension de surface connus [59].

Nous résolvons le système suivant:

$$\begin{cases} 2 \left\{ \sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_{L1}^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_{L1}^+} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_{L1}^-} \right\} = \gamma_{L1} (1 + \cos \theta_1) \\ 2 \left\{ \sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_{L2}^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_{L2}^+} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_{L2}^-} \right\} = \gamma_{L2} (1 + \cos \theta_2) \\ 2 \left\{ \sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_{L3}^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_{L3}^+} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_{L3}^-} \right\} = \gamma_{L3} (1 + \cos \theta_3) \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

- **Travail d'adhésion:**

Selon Sina Ebnesajjad et al. [60], et Rafael Tadmor et al. [61], le travail d'adhésion est défini comme le travail thermodynamique réversible nécessaire pour séparer l'interface de deux phases de l'état d'équilibre à une distance de séparation de l'infini.

Le travail d'adhésion est défini par l'équation de Dupre:

$$\Delta W_{12}^{\text{adhésion}} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (\text{II-25})$$

avec γ_1 et γ_2 sont l'énergie de surface des miroirs réflecteurs (phase 1) et des particules de poussière (phase 2), et γ_{12} est l'énergie libre de la surface interfaciale entre eux.

Pour une combinaison liquide-solide, l'équation (Eq. II-25) peut être réécrite dans l'équation suivante:

$$\Delta W_{LS}^{\text{adhésion}} = \gamma_L + \gamma_S - \gamma_{LS} \quad (\text{II-26})$$

avec γ_L est la tension superficielle de la phase liquide, γ_S est l'énergie superficielle de la phase solide et γ_{LS} est la tension interfaciale-surface entre eux.

De même, le travail d'adhésion pour trois phases est présenté par l'équation:

$$\Delta W_{132}^{\text{adhésion}} = W_{12}^a + W_{33}^a + \Delta W_{13}^a - W_{23}^a = \gamma_{13} + \gamma_{23} - \gamma_{12} \quad (\text{II-27})$$

avec $\Delta W_{132}^{\text{adhésion}}$ est l'énergie de clivage de la première phase de la deuxième phase dans un milieu de la troisième phase.

Dans la figure suivante, nous présentons une illustration du clivage suivant les deux équations précédentes (Eq. II-26 et Eq. II-27):

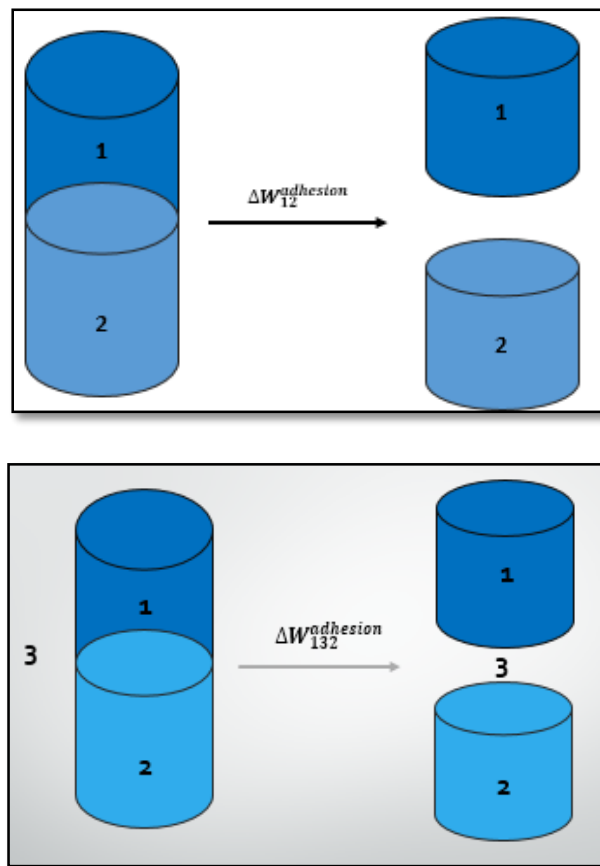


Fig. 2.27. Illustration du clivage associé au travail d'adhésion

Le travail d'adhésion est associé à l'énergie de surface et à la tension superficielle. Cependant, une compréhension de la terminologie de l'énergie de surface et de la tension de surface est très utile pour comprendre l'état physique du mécanisme d'adhésion.

D'une part, l'énergie de surface ou l'énergie libre de surface est définie comme la somme de toutes les forces intermoléculaires qui sont à la surface d'un matériau, c'est aussi le travail nécessaire pour créer une nouvelle unité de surface tout en séparant deux phases. Les surfaces en matériau solide peuvent être divisées en l'une des deux catégories d'énergie de surface haute ou basse. Physiquement, une surface à faible énergie de surface provoquera un angle de contact élevé (surface hydrophobe). De plus, la surface avec une énergie de surface élevée provoquera un angle de contact faible (surface hydrophile) comme illustré dans la figure suivante [62].

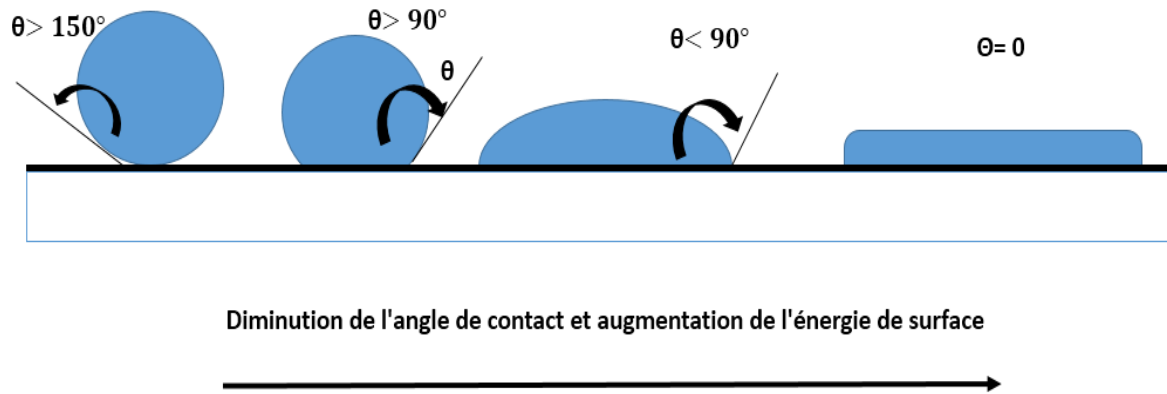


Fig. 2.28. Illustration de la relation entre l'angle de contact et l'énergie de surface.

D'autre part, la tension superficielle est associée au liquide et est définie comme la propriété de la surface d'un liquide qui lui permet de résister à une force extérieure.

- **Mesure de l'énergie superficielle et de la tension superficielle:**
- ❖ **Tension superficielle:** Selon la littérature, les techniques de mesure de la tension superficielle sont divisées en deux catégories: les méthodes statiques et dynamiques. Parmi les méthodes statiques disponibles; Technique de l'anneau Du Nouy (Dans cette méthode, un anneau en platine se soulevait lentement de la surface d'un liquide, et entraînait donc une force F qui nécessitait de soulever l'anneau de la surface du liquide et liée à la tension superficielle du liquide), et la technique de la plaque Wilhelmy (dans laquelle une plaque verticale avec un périmètre connu est attachée à une balance et immergée dans le liquide). De plus, parmi la méthode dynamique, il y a la technique de pression de bulle, dans cette méthode, la tension de surface est déterminée en mesurant la pression maximale de chaque bulle [60].
- ❖ **Énergie de surface:** la principale méthode utilisée pour déterminer l'énergie de surface du solide est une technique de goutte sessile comme illustré dans la figure suivante.



Fig. 2.29. Mesure de l'angle de contact «Sessile drop analyzer»

Dans cette technique, l'angle de contact à la surface du solide est mesuré à l'aide de trois liquides différents (liquides neutres, polaires et non polaires) de composantes de tension de surface connues [63].

4.2 Mésure de l'Adhérence du poussière par AFM

La microscopie à force atomique (AFM) est utilisée pour évaluer l'adhérence des poussières à la surface des panneaux solaires. Comme illustré dans la figure suivante, la mesure d'adhérence peut être évaluée en poussant ou en tirant la poussière sur la surface (le cantilever s'incline vers le haut ou vers le bas).

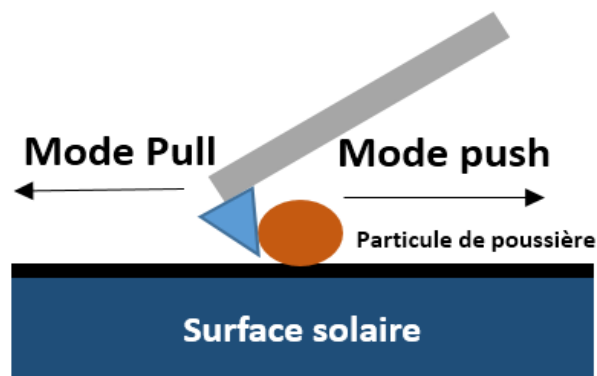


Fig. 2.30. Illustration de la mesure d'adhérence par AFM

Le changement physique résultant de la poussée ou de la traction de la poussière peut être lié à la force qui retient la particule à la surface et a donc évalué l'adhérence entre les particules de poussière et la microscopie AFM [64, 65].

5. Surveillance et dépôt de poussières par microscope en extérieur

Comme mentionné dans la section précédente, la mesure des salissures peut être quantifiée par une technique efficace basée sur les images d'échantillons souillés provenant de la microscopie des salissures en extérieur (OSM). La microscopie OSM nous permettra de mesurer le dépôt et l'élimination des particules de poussière supérieures à 10 micromètres. Tout d'abord, l'institut de recherche sur l'environnement du Qatar a développé une microscopie extérieure des salissures comprenant un petit microscope numérique de faible puissance [16]. En effet, la caméra numérique est connectée à un Raspberry Pi3 afin de sauvegarder et d'analyser les images souillées. Ensuite, le taux de poussière des échantillons solaires a été mesuré par le logiciel ImageJ à partir d'un microscope de salissure extérieur et donc au taux de salissure a été corrélé avec les paramètres des conditions météorologiques. Dans la littérature, un certain nombre de méthodes similaires utilisent la photographie avec des microscopes pour analyser le dépôt de particules [66, 67].

Par rapport aux références précédentes, dans la présente recherche (voir chapitre VI), nous avons utilisé une microscopie des salissures en extérieur en conditions réelles et nous avons collecté des données au cours du printemps et de l'été des deux saisons. Le réseau de neurones artificiels (RNA) a été utilisé pour analyser deux variables; le pourcentage de dépôt de poussière comme variable dépendante et les paramètres météorologiques comme paramètres indépendants. La valeur ajoutée de cette procédure suivie est la prévision du dépôt et de la remise en suspension des poussières uniquement par les conditions météorologiques dans une certaine région.

Références

- [1] B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi, and Y. Rémond, “Review of PV soiling particle mechanics in desert environments,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 872–881, 2017.
- [2] A. Sayyah, M. N. Horenstein, and M. K. Mazumder, “Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels,” *Sol. Energy*, vol. 107, pp. 576–604, 2014.
- [3] C. K. Wentworth and Iowa, *A scale of grade and class terms for clastic sediments*, vol. 30, no. 5. 1922.
- [4] S. Beaudoin *et al.*, “Fundamental Forces in Particle Adhesion,” *Part. Adhes. Remov.*, pp. 1–79, 2015.
- [5] K. Kroy *et al.*, “The physics of wind-blown sand and dust,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 75, Iop Publishing Reports, pp. 72, 2012.
- [6] S. Shag, Yaping, Hua, “A simple expression for wind erosion threshold friction velocity,” *J. Geophys. Res.*, vol. 105, no. d 17, pp. 437–443, 2000.
- [7] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, and J. Bagdahn, “Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, pp. 239–254, 2018.
- [8] M. Reza, H. Hizam, C. Gomes, M. Amran, M. Ismael, and S. Hajighorbani, “Power loss due to soiling on solar panel : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1307–1316, 2016.
- [9] A. Y. Al-hasan and A. A. Ghoneim, “International Journal of Sustainable A new correlation between photovoltaic panel’s efficiency and amount of sand dust accumulated on their surface,” *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 24, no. 4, pp. 187–197.
- [10] I. Electrotechnical, “Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring (IEC 61724-1, Edition 1.0, 2017- 03) (2017).”
- [11] A. Fernández-garcía, F. Sutter, L. Martínez-arcos, C. Sansom, F. Wolfertstetter, and C. Delord, “Equipment and methods for measuring reflectance of concentrating solar reflector materials,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 167, pp. 28–52, 2017.
- [12] D. J. Griffith, L. Vhengani, and M. Maliage, “Measurements of mirror soiling at a candidate CSP site,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1371–1378, 2014.
- [13] E. G. Collier, “Dust Storm Simulation for Accelerated Life Testing of Solar Collector Mirrors,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 105, no. 3, pp. 329–335, 1983.
- [14] “Smestad, G.P., Germer, T.A., Alrashidi, H. et al. Modelling photovoltaic soiling losses through optical characterization. *Sci Rep* 10, 58 (2020).”
- [15] S. A. and Y. R. B. Figgis, A. Ennaoui, “Review of PV Soiling Measurement Methods,” *IEEE, Int. Renew. Sustain. Energy Conf. (IRSEC), Marrakech*, pp. 176–180, 2016.
- [16] B. Figgis, A. Ennaoui, B. Guo, W. Javed, and E. Chen, “Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 158–164,

- 2016.
- [17] A. Manuel, J. Blanco (Australian Solar Thermal Research Initiative and S. Ramirez, Lourders (Reaserach Center for Energy, Environment and Technology, *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*, Woodhead P. Amerstrdam, 2016.
 - [18] C. S. Turchi, J. Stekli, and P. C. Bueno, “Concentrating solar power,” in *Fundamentals and Applications of Supercritical Carbon Dioxide (SCO₂) Based Power Cycles*, Elsevier Ltd, pp. 269–292, 2017.
 - [19] M. U. H. Joardder, P. K. Halder, M. A. Rahim, and M. H. Masud, *Solar Pyrolysis : Converting Waste Into Asset Using Solar Energy*. Elsevier Inc., 2017.
 - [20] M. J. Blanco and S. Miller, *Introduction to concentrating solar thermal (CST) technologies*. Elsevier Ltd, 2017.
 - [21] R. Pitz-paal, “Solar Energy - Concentrating solar power,” in *Future Energy*, Elsevier Ltd, pp. 405–432, 2014.
 - [22] A. Z. Hafez, A. Soliman, K. A. El-metwally, and I. M. Ismail, “Design analysis factors and specifications of solar dish technologies for different systems and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 1019–1036, 2017.
 - [23] J. Polo, C. Fernández-peruchena, and M. Gastón, “Analysis on the long-term relationship between DNI and CSP yield production for different technologies,” vol. 155, pp. 1121–1129, 2017.
 - [24] D. Lopes, R. Conceição, H. Gonçalves, E. Aranzabe, G. Pérez, and M. Collares-pereira, “Anti-soiling coating performance assessment on the reduction of soiling effect in second-surface solar mirror,” *Sol. Energy*, vol. 194, pp. 478–484, 2019.
 - [25] R. M. Bethea, M. T. Barriger, P. F. Williams, S. Chin, C. Solar, and P. Project, “Environmental Effects On Solar Concentrator Mirrors,” *Sol. Energy*, vol. 27, no. 6, pp. 497–511, 1981.
 - [26] C. E. Kennedy, “Optical durability of candidate solar reflectors,” *ASME Trans.*, pp. 1–10, 2016.
 - [27] A. Pina, “Technical Evaluation of an Improved Paint Coating with NIR Pigments Designed To Reduce Incident Solar Radiation : Application in the Caribbean Area,” *Energy Procedia*, vol. 115, pp. 463–479, 2017.
 - [28] T. Aytac and B. Barshan, “Surface differentiation by parametric modeling of infrared intensity scans,” *Opt. Eng.*, vol. 44, 2005.
 - [29] A. García-segura, A. Fernández-garcía, M. J. Ariza, F. Sutter, and L. Valenzuela, “Durability studies of solar reflectors : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 453–467, 2016.
 - [30] P. Schissel, “Silvered-PMMA reflectors,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 33, pp. 183–197, 1994.
 - [31] R. Almanza and P. Herna, “Development and mean life of aluminum first-surface

- mirrors for solar energy applications,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, pp. 1647–1651, 2009.
- [32] S. S. Latthe, R. S. Sutar, V. S. Kodag, A. K. Bhosale, and A. M. Kumar, “Self-cleaning superhydrophobic coatings : Potential industrial applications,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 128, no. December 2018, pp. 52–58, 2019.
- [33] S. A. Kulinich and M. Farzaneh, “Hydrophobic properties of surfaces coated with fluoroalkylsiloxane and alkylsiloxane monolayers,” *Surf. Sci.*, vol. 573, pp. 379–390, 2004.
- [34] K. Hashimoto, H. Irie, and A. Fujishima, “TiO₂ Photocatalysis : A Historical Overview and Future Prospects,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 8269–8285, 2005.
- [35] A. Fujishima, T. N. Rao, and D. A. Tryk, “Titanium dioxide photocatalysis,” *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.*, vol. 1, pp. 1–21, 2000.
- [36] O. Carrier and D. Bonn, “Chapter 2 - Contact Angles and the Surface Free Energy of Solids,” in *Droplet Wetting and Evaporation*, Elsevier Inc., 2015, pp. 15–24, 1950.
- [37] C. Furmidge, “Studies at phase interfaces. I. The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention,” *J. Colloid Sci.*, vol. 17(4), pp. 309–324, 1962.
- [38] R. Bailey, “The spreading of a liquid over a rough solid,” *Discuss. Faraday Soc.*, no. 16, pp. 16–22, 1948.
- [39] A. Marmur, “Wetting on Hydrophobic Rough Surfaces : To Be Heterogeneous or Not To Be ?,” *Langmuir*, vol. 1, no. 2, pp. 8343–8348, 2003.
- [40] G. Wolansky and A. Marmur, “Apparent contact angles on rough surfaces : the Wenzel equation revisited,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 156, pp. 381–388, 1999.
- [41] Y. C. Jung and B. Bhushan, “Wetting transition of water droplets on superhydrophobic patterned surfaces,” *Scr. Mater.*, vol. 57, no. 12, pp. 1057–1060, 2007.
- [42] G. Mchale, S. Aqil, N. J. Shirtcliffe, M. I. Newton, and H. Y. Erbil, “Analysis of Droplet Evaporation on a Superhydrophobic Surface,” *Langmuir*, vol. 21, no. 3, pp. 11053–11060, 2005.
- [43] D. Q. Aurélie Lafuma, “Superhydrophobic states,” *Nat. Mater.*, vol. 2, no. 7, pp. 457–460, 2003.
- [44] A. Techniques, “Promising Future Processing Technology Promising Future Processing Technology,” in *Advances in CMP Polishing Technologies*, pp. 229–295, 2012.
- [45] U. Zafar, C. Hare, A. Hassanpour, and M. Ghadiri, “Drop test : A new method to measure the particle adhesion force,” *Powder Technol.*, vol. 264, pp. 236–241, 2014.
- [46] D. J. Quesnel *et al.*, “Aspects of Particle Adhesion and Removal,” in *Developments in Surface Contamination and Cleaning, Vol. 1*, 2nd ed., vol. 1, Elsevier Inc., pp. 119–146, 2016.
- [47] R. J. Isaifan, D. Johnson, L. Ackermann, B. Figgis, and M. Ayoub, “Solar Energy Materials and Solar Cells Evaluation of the adhesion forces between dust particles and

- photovoltaic module surfaces,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 191, pp. 413–421, 2019.
- [48] K. Ilse *et al.*, “Advanced performance testing of anti-soiling coatings - Part II : Particle-size dependent analysis for physical understanding of dust removal processes and determination of adhesion forces,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 202, p. 110049, 2019.
- [49] L. L. Kazmerski *et al.*, “Fundamental Studies of Adhesion of Dust to PV Module Surfaces,” *IEEE J. Photovoltaics*, pp. 1–11, 2016.
- [50] S. G. and all Cher Lin Clara Tan, “Adhesion of Dust Particles to Common Indoor Surfaces in an Air-Conditioned Environment,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 6826, pp. 541–551, 2014.
- [51] N. V Churaev, “The DLVO theory in Russian colloid science,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 83, pp. 19–32, 1999.
- [52] S. Bhattacharjee, M. Elimelech, and M. Borkovec, “DLVO Interaction between Colloidal Particles : Beyond Derjaguin’s Approximation,” *Croat. Chem. ACTA*, vol. 71, no. 4, pp. 5–8, 1998.
- [53] M. Boström, V. Deniz, G. V Franks, and B. W. Ninham, “Extended DLVO theory : Electrostatic and non-electrostatic forces in oxide suspensions,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 126, pp. 5–15, 2006.
- [54] J. M. Sebastian FIRLIK, “Comparison of methods for the surface free energy determination of polymeric layers aligning liquid crystals science technique,” *Sci. Tech.*, no. 4, 2010.
- [55] J. A. K. J.Laskowski, “The Hydrophilic--Hydrophobic Transition on Silica,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 29, no. 4, pp. 670–679, 1968.
- [56] M. K. C. C. J. Van Oss, “Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems,” *Chem. Rev.*, vol. 88, pp. 927–941, 1988.
- [57] E. Matykina, I. Garcia, J. J. De Damborenea, and M. A. Arenas, “International Journal of Adhesion & Adhesives Comparative determination of TiO₂ surface free energies for adhesive bonding application,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 31, no. 8, pp. 832–839, 2011.
- [58] A. Zdziennicka, K. Szymczyk, J. Krawczyk, and B. Jańczuk, “Some remarks on the solid surface tension determination from contact angle measurements,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 405, pp. 88–101, 2017.
- [59] A. Khaldoun *et al.*, “Influence of heavy metals adsorption on the surface-energy properties of fluorinated montmorillonite clays ‘Rassoul,’” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 290, pp. 1–6, 2006.
- [60] W. Is, A. N. Interface, and S. Tension, “Surface Tension and Its Measurement,” in *Adhesives Technology Handbook*, pp. 19–34, 2015.
- [61] M. Shah, P. Wasnik, and S. B. Yadav, “Solid-Liquid Work of Separation,” *Langmuir*, vol. 33, no. 15, pp. 3594–3600, 2017.

- [62] C. T. Chan, K. M. Ho, and K. P. Bohnen, “Surface Reconstruction: Metal Surfaces and Metal on Semiconductor Surfaces,” in *Physical Structure*, vol. 1, pp. 101–136, 1996.
- [63] S. J. Marshall, S. C. Bayne, R. Baier, A. P. Tomsia, and G. W. Marshall, “A review of adhesion science,” *Dent. Mater.*, vol. 6, no. 26, pp. 11–16, 2010.
- [64] S. Alexander *et al.*, “An atomicresolution atomicforce microscope implemented using an optical lever,” *J. Appl. Phys.*, vol. 65, no. 1, pp. 164–167, 1989.
- [65] B. Bhushan and O. Marti, “Scanning Probe Microscopy – Principle of Operation , Instrumentation , and Probes,” *Nanotribology and Nanomechanics*, pp. 37–110, 2011.
- [66] P. Taylor *et al.*, “High Resolution Study of Micrometer Particle Detachment on Different Surfaces,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 47, no. 4, pp. 351–360, 2013.
- [67] P. Taylor *et al.*, “Dry Deposition Velocities as a Function of Particle Size in the Ambient Atmosphere,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 239–252, 1994.

**Chapitre III : Évaluation de l'adhérence
des salissures à la surface des miroirs
réflecteurs via la théorie DLVO étendue**

Résumé

Dans le chapitre précédent, un état de l'art a été présenté sur les phénomènes des salissures de poussières sur les surfaces des réflecteurs solaires ainsi tous les paramètres influençant l'adhérence des poussières tels que l'énergie de surface et la rugosité de surface sont discutés. Aussi, un aperçu des méthodes de mesure de l'adhérence de poussières est également présenté. En effet, sur la base de chapitre précédent, l'adhérence de la poussière peut être évaluée soit à l'aide de la microscopie à force atomique (AFM) ou en utilisant l'équation de Dupre ou l'équation de Hamaker par l'application de la théorie de DLVO. Cependant, selon M. Ghadiri et al. [1], la microscopie à force atomique n'est pas très précise, pas rentable et prend du temps. Pour les applications d'ingénierie, il existe un besoin d'une méthode simple et directe pour calculer le travail d'adhésion. Dans ce chapitre l'adhérence de la poussière a été évaluée par la théorie de DLVO. En effet, trois types de miroirs sont étudiés, le premier est le miroir commercial utilisé dans le projet NOOR 1, le second est un miroir avec nano-revêtement hydrophobe amorphe Al_2O_3 et le troisième est un miroir avec nano-revêtement hydrophile TiO_2 . Les particules de poussière ont été collectées dans trois régions potentielles pour la construction des centrales CST au Maroc (régions d'Ouarzazate, Tinghir et Midelt). Sur la base de la théorie DLVO étendue et le modèle de Good–van Oss, l'énergie d'adhésion a été déterminée entre les différents types de miroirs et les échantillons de sable. Les résultats ont montré que le travail d'adhésion entre les miroirs avec un nano-revêtement d'alumine hydrophobe et des particules de poussière de Tinghir a une valeur minimale de $42,78 \text{ mJ/m}^2$ par rapport aux autres échantillons. Ce résultat peut s'expliquer par le caractère hydrophobe de la surface de ce miroir et la nature des minéraux argileux du sol extrait du site de Tinghir. Les résultats de la diffraction des rayons X ont montré que les minéraux argileux de type Illite et Kaolinite sont présents en quantités importantes dans Tinghir et cela explique la faible adhésivité de la poussière de Tinghir à la surface des miroirs, car l'Illite et la kaolinite sont des argiles gonflent partiellement dans l'eau et donc très faible adhérence à une surface solide. Aussi, il a été démontré que pour les fractions d'argile, les particules de poussière de Midelt sont composées de Smectites par rapport à la poussière d'Ouarzazate et Tinghir. En effet, le Smectites est une argile très gonflante dans l'eau par rapport aux minéraux argileux du type Illite, Kaolinite et Vermiculite.

I. Introduction

Pour les centrales solaires concentrées, les régions désertiques sont considérées comme les plus adaptées aux installations de centrales électriques, principalement en raison de leur fort rayonnement solaire direct. Cependant, cet environnement d'exploitation entraîne une exposition à des conditions météorologiques très difficiles, telles que des tempêtes de vent et des tempêtes de sable / poussière, entraînant une diminution de leur réflectance spéculaire. Ces facteurs de dégradation peuvent sérieusement affecter l'efficacité des miroirs, entraînant une baisse drastique de leur efficacité [2]. En fait, une diminution de 5% de la réflectance spéculaire des miroirs entraînerait une augmentation importante du coût de l'énergie et de la consommation d'eau pendant le processus de nettoyage [3].

Dans la littérature, des études ont montré que la salissure est un phénomène très complexe difficile à prévoir. Plusieurs groupes de chercheurs mènent des expériences en extérieur et en intérieur pour quantifier l'effet de l'encrassement sur les propriétés optiques de différents miroirs réflecteurs (avec et sans revêtements anti-encrassement), et corrélent la baisse des performances mesurées avec les différents paramètres météorologiques et évaluent les mécanismes d'adhésion sur différentes surfaces [4,5,6,7]. De plus, les recherches dans la littérature ont montré que l'application de revêtements hydrophobes ou hydrophiles sur les miroirs réflecteurs représente une très bonne solution au problème de salissure [4].

Les seuls facteurs de nettoyage naturels rapportés dans la littérature sont le vent, la pluie et l'humidité. Cependant, selon Zaihide et al. [8], ces phénomènes ne sont pas toujours efficaces car ils peuvent parfois augmenter le dépôt ou l'adhésion des particules de poussière au lieu de les empêcher (c'est-à-dire des vitesses de vent modérées et des pluies légères). Selon Jiang et al. [9], les particules de poussière d'une taille de particules comprise entre 0,1 et 100 μm nécessitent une vitesse de cisaillement et une vitesse réelle du vent allant de 0,23 à 57,56 m/s et de 0,82 à 2219,8 m/s pour surmonter les forces d'adhérence et ainsi entraîner la remise en suspension. D'autre part, les recherches ont discuté l'effet des particules de poussière sur les miroirs réflecteurs [7, 8], mais aucun d'eux n'a étudié l'énergie libre de surface d'interaction entre les particules de poussière et les miroirs réflecteurs, ni le degré d'adhésion entre eux.

De nombreuses méthodes ont été présentées pour déterminer le travail d'adhésion entre deux phases. Selon Kazmerski et al. [12] et Cher Lin et al. [13], la mesure d'adhérence entre les particules de poussière et les miroirs réflecteurs peut être effectuée par microscopie à force atomique. Cependant, selon M. Ghadiri et al. [1], la microscopie à force atomique n'est pas très précise, pas rentable et prend du temps. Pour les applications d'ingénierie, il existe un besoin

d'une méthode simple et directe pour calculer le travail d'adhésion. Dans ce chapitre, nous proposons une méthode simple pour prédire le degré d'adhérence de la poussière à la surface des miroirs en utilisant la théorie DLVO étendue. Certains modèles sont disponibles pour la détermination du travail d'adhésion entre deux objets comme les modèles A. Dupre et Hamaker. Dans cette présente recherche, le travail d'adhésion des particules de poussière sur les surfaces des miroirs a été déterminé sur la base du modèle Dupre.

Dans nos travaux précédents, plusieurs procédures expérimentales ont été menées où une préparation réussie de nouveaux types de miroirs a été proposée. Le principal type de miroirs réflecteurs a été développé par dépôt de cuivre (50 nm) / argent (100 nm). Le premier type de miroir proposé était protégé par une couche d'alumine hydrophobe (1 μm) et un deuxième type était protégé par une couche de dioxyde de titane super hydrophile (100 nm). Les deux miroirs présentent une très bonne réflectance spéculaire de 94% [3,4,5,6]. Dans ce travail, nos activités de recherche se concentrent sur l'adhésion des particules de poussière à la surface des miroirs réflecteurs préparés précédemment et la comparent au miroir commercial utilisé dans le projet NOOR 1.

Plusieurs études ont été menées pour identifier les régions potentielles pour les installations de centrales solaires à concentration au Maroc [14, 15]. Certains paramètres sont cruciaux lorsqu'il s'agit de choisir la zone appropriée pour l'installation des centrales solaires, comme l'irradiation normale directe supérieure à (2000 kWh/m²), la surface plane, la disponibilité de l'eau et également la densité de population. Alami Ahmed Merrouni et al. [14], a choisi la région orientale du Maroc et en particulier Ain Beni Mathar comme site potentiel pour l'installation des centrales solaires basée sur un logiciel standard de Système d'Information Géographique (SIG). Houda Ennaceri et al. [15], suggèrent que Missouri, Erfoud et Zagora représentent des sites potentiels pour des installations de centrales CSC basées sur l'irradiation directe (DNI).

Dans la présente recherche, trois régions ont été sélectionnées: Midelt, Ouarzazate et Tinghir comme zones potentielles optimales pour les installations de centrales CSC. Ce choix s'est basé sur les résultats d'études menées par l'Agence marocaine de l'énergie solaire et le plan solaire marocain [16]. Le premier site choisi est Midelt, cette région est connue pour son fort ensoleillement de 5340Wh/m²/jour et son abondance en ressources en eau, en effet, le barrage Hassan II près de Midelt assurera son approvisionnement en eau. La deuxième région choisie est Ouarzazate (la plus grande central CSC au monde, lancée le 24 février 2016) afin d'évaluer la capacité des miroirs réflecteurs du centrale NOOR Ouarzazate à attirer ou à repousser les particules de poussière. Le troisième site choisi est Tinghir (situé à environ 130 km au nord-est de Ouarzazate) et il se caractérise par sa forte irradiation normale directe de 5470 Wh/m²/ jour.

L'interaction entre les particules de poussière et la surface du miroir est directement liée à leur énergie libre de surface qui définit le degré d'adsorption et d'adhérence. En général, l'énergie libre de surface est brièvement définie comme le travail nécessaire pour produire une nouvelle unité de surface tout en séparant deux phases pour atteindre un nouvel équilibre [17]. Dans cette recherche, nous nous sommes concentrés sur le travail d'adhésion pour évaluer l'interaction entre différents types de particules de poussière avec des échantillons de miroir réflecteur.

Dans des travaux antérieurs, A. Ghanbari et al. [18] ont étudié l'influence d'un revêtement à base de Zirconium sur l'énergie libre de surface et les performances d'adhérence d'un substrat en acier doux revêtu d'époxy. Des composants à énergie libre de surface et une approche van Oss – Good ont été utilisés et le degré d'adhésion a été conclu. Les résultats indiquent que la composante γ - de la surface augmente, ce qui entraîne une augmentation du travail d'adhésion. Il a été conclu que le ZCC augmentait la force d'adhérence de l'acier doux au revêtement organique et les performances d'adhérence de l'acier doux traité au Zirconium.

II. Contexte théorique

1. L'énergie libre de surface

L'énergie libre de surface est liée à la force excédentaire par unité de surface, définie comme la somme de toutes les forces intermoléculaires qui sont à la surface d'un matériau, c'est aussi le travail nécessaire pour créer une nouvelle unité de surface tout en séparant deux phases et atteindre un nouvel équilibre [17], il reflète également le degré d'attraction ou de répulsion entre deux surfaces ou phases en contact. Pour expliquer le terme de "travail d'adhésion"; sur la base de la théorie DLVO, différentes approches ont été proposées dans la littérature. Selon les modèles Fowkes, Owens-Wendt et Good van Oss, l'énergie libre de surface peut être déterminée en mesurant les angles de contact de trois liquides différents à la surface d'un solide [19, 20].

2. Travail d'adhésion

L'adhésion est généralement définie par l'attraction physique entre des substances différentes. Selon la théorie de Fowkes, pour comprendre l'adhésion, nous devons examiner les forces d'adhérence intrinsèques entre le substrat et l'adhésif à travers leurs tensions de surface. Certains modèles de prédiction du travail d'adhésion entre deux objets sont disponibles dans la littérature basée sur l'énergie libre de surface comme les modèles de Dupre et Hamaker [20]. Selon le scientifique français Dupre, le travail d'adhésion est défini comme le travail thermodynamique

réversible qui est nécessaire pour séparer l'interface de deux phases de l'état d'équilibre à une distance de séparation de l'infini [27, 28].

Dans cette étude, le travail d'adhésion entre les échantillons de miroirs réflecteurs et les particules de poussière (deux phases) a été déterminé à l'aide de l'équation de Dupré:

$$\Delta W_{12}^{\text{adhesion}} = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (\text{III-1})$$

avec γ_1 et γ_2 sont l'énergie de surface des miroirs réflecteurs (phase 1) et des particules de poussière (phase 2), et γ_{12} est l'énergie libre de la surface interfaciale entre eux.

$$\gamma_{12} = \gamma_1^{\text{LW}} + \gamma_2^{\text{LW}} - 2\sqrt{\gamma_2^{\text{LW}} \gamma_1^{\text{LW}}} + 2(\sqrt{\gamma_1^+ \gamma_1^-} + \sqrt{\gamma_2^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} - \sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+}) \quad (\text{III-2})$$

$$\Delta W_{12}^{\text{adhesion}} = 2\sqrt{\gamma_1^{\text{LW}} \gamma_2^{\text{LW}}} + 2\sqrt{\gamma_1^+ \gamma_2^-} + 2\sqrt{\gamma_1^- \gamma_2^+} \quad (\text{III-3})$$

avec γ^{LW} représente les interactions des dipôles instantanés les interactions des dipôles instantanés (Lifshitz–Van Der Waals), γ_s^+ est le composant acide de Lewis et γ_s^- est le composant base de Lewis.

Par conséquent, en fonction des valeurs des différents composants de l'énergie libre de surface (γ^+ , γ^- et γ^{LW}) des miroirs réflecteurs et des composants d'énergie libre de surface des particules de poussière, le travail d'adhésion entre eux peut varier. En utilisant l'équation III-3, nous pouvons prédire le degré d'attraction entre les deux surfaces solides.

III. Procédure Expérimentale

1. Caractérisation des miroirs et de particules de poussière

1.1 Caractérisation des miroirs

Trois principaux types d'échantillons de miroir sont étudiés, le premier est le miroir commercial utilisé au projet NOOR 1 à Ouarzazate développé par la société espagnole SENER, le second est un miroir avec un nano-revêtement d'alumine hydrophobe et le troisième est un miroir avec nano-revêtement hydrophile de dioxyde de titane. Les deux derniers échantillons de miroirs ont été préparés par nos collaborateurs et ont donné lieu à des publications intéressantes [4, 6], nous avons préparé deux types d'échantillons de miroirs développés par le dépôt de cuivre (50 nm) / argent (100 nm) sur des substrats en verre épais en utilisant PVD Sputtering avec une

réflectance spéculaire élevée 98,6%. En utilisant la technique de dépôt par réaction de gaz de couche ionique, un revêtement d'alumine amorphe (1 μm) a été déposé sur le premier type d'échantillons de miroirs et un revêtement antisalissure de TiO_2 (100 nm) pour le deuxième type d'échantillons de miroirs, qui a conservé une très bonne réflectance spéculaire 94% après dépôt de revêtements protecteurs.

La rugosité de surface des différents échantillons de miroirs a été étudiée par le profileur de surface de stylet DektakXT (rayon de pointe du diamant du stylet = 12,5 μm , avec une plage de force de 0,03 à 15 mg), montrant une rugosité quadratique moyenne (RMS) de 1,91 nm pour le miroir réflecteur avec revêtement de Al_2O_3 , 15,26 nm pour le miroir réflecteur avec revêtement de TiO_2 , et 19,02 nm pour le miroir commercial.

1.2 Caractérisation par diffraction des rayons X des fractions d'argile des particules de poussière

Comme mentionné précédemment, les particules de poussière ont été collectées dans trois régions potentielles pour les installations de centrales solaires à concentration au Maroc, plus précisément dans les régions d'Ouarzazate, Tinghir et Midelt. Les compositions de phase de différents types de particules de poussière ont été analysées par diffraction des rayons X. Les caractérisations par diffraction des rayons X ont été effectuées pour connaître les types de fractions d'argile qui sont présentes dans différents types de particules de poussière collectées.

Une séparation de la fraction d'argile dans le sol a été effectuée en séparant les fractions de particules de poussière inférieures à 2 μm en utilisant la méthode de sédimentation d'une suspension d'eau avant de mener les caractérisations par diffraction des rayons X [23].

Les données dans la figure 3.1 montrent qu'en plus des minéraux de quartz et de carbonates, les minéraux argileux de type Vermiculites, Kaolinite et Illite sont présents en traces.

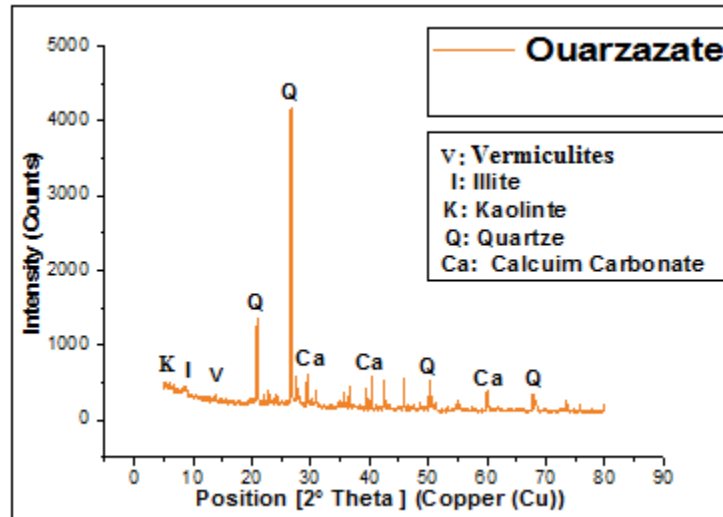


Fig. 3.1. Analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière d'Ouarzazate

D'autre part, les données obtenues à partir des particules de poussière de Midelt, comme le montre la figure 3.2, démontrent qu'en plus des minéraux de quartz et de carbonates, le type Illite de particules d'argile est présent en grande quantité tandis que les autres types d'argile sont présentes à faibles concentrations, comme la kaolinite, Vermiculite et Smectites (une argile partiellement gonflante) [24]. De même, sur la figure 3.3, le Illite est le principal type de minéraux argileux présents dans les particules de poussière de Tinghir.

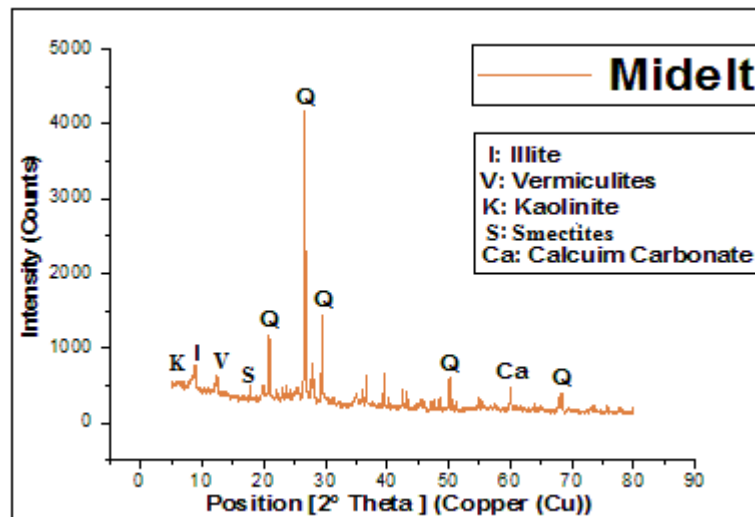


Fig. 3.2. Analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière du Midelt

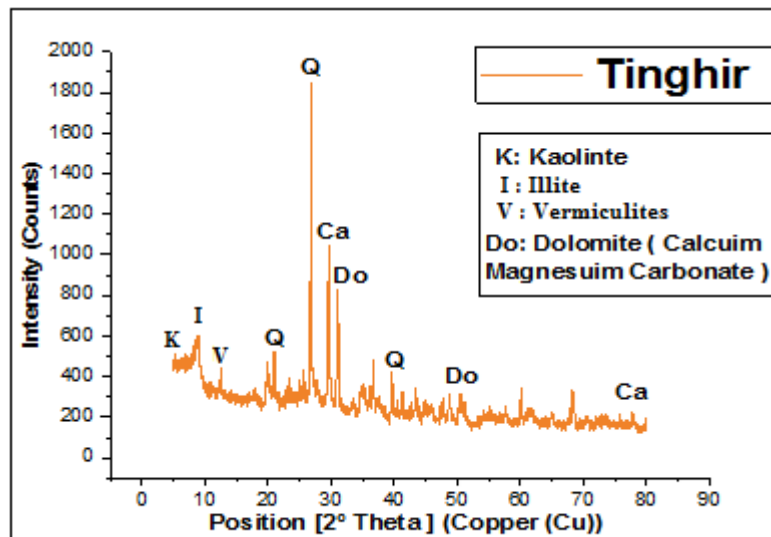


Fig. 3.3. Analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière de Tinghir

2. Détermination de l'énergie libre de surface

2.1 Mesures des angles de contact des échantillons de miroirs

Les angles de contact de différents échantillons de miroirs ont été mesurés par l'analyseur de gouttes sessiles DSA-100S. L'eau distillée, l'éthylène glycol et le diiodométhane de composants connus pour les tensions de surface étaient les trois liquides de sonde utilisés (voir tableau 3.1) [23]. Les mesures des angles de contact de différents échantillons de miroirs réflecteurs sont présentées dans le tableau 3.2.

Table. 3.1. Composants de tension superficielle des liquides.

Liquids	Composants de tension superficielle (mJ/m ²)			
	γ_L^{Tot}	γ_L^{LW}	γ_L^-	γ_L^+
H ₂ O	72.56	21.6	25.4	25.4
Ethylene Glycol	48	29	1.92	47
Diiodomethane (CH ₂ I ₂)	50.5	50.5	0.7	0.0

Table. 3.2. Valeurs d'angle de contact de l'eau, de l'éthylène glycol et du diiodomethane sur différents échantillons.

Miroirs	L'angle du contact [± 1]		
	H ₂ O	Ethylene Glycol	Diiodomethane
Miroir commercial	45.56°	36.15°	48.80°
Miroir à base du TiO ₂	41.8°	31.88°	21.49°
Miroir à base d'alumine	101.5°	94.04°	86.06°

2.2 Préparation d'échantillons de particules de poussière

Pour déterminer l'énergie libre de surface, différents types d'échantillons de particules de poussière ont été préparés. Les particules de poussière collectées ont été préparées selon la procédure suivante: tout d'abord, la fraction granulométrique inférieure à 2 μm a été séparée par sédimentation d'une suspension aqueuse d'un minéral broyé, puis 30 g des particules obtenues ont été agités pendant une heure dans 250 ml de NaCl 1 M Solution. Ces deux étapes ont été répétées quatre fois. Ensuite, les échantillons ont été centrifugés et le surnageant a été jeté. Enfin, les particules de poussière ont été séchées à 110 °C et conservées dans des flacons en polyéthylène [23].

2.3 Mesure des angles de contact des particules de poussière

Nous avons suivi la même procédure mentionnée précédemment pour les échantillons de miroirs réflecteurs, en utilisant l'analyseur de gouttes sessiles DSA-100S pour les mesures de trois liquides de sonde: eau distillée, éthylène glycol et diiodométhane sur les surfaces des échantillons de particules de poussière. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.3.

Table. 3.3. Valeurs d'angle de contact sur différents échantillons de particules de poussière.

Types de poussières	L'angle du contact [± 1]		
	Eau	Ethylene Glycol	Diiodomethane
Poussière d'Ouarzazate	28.81°	26.23°	16.15°
Poussière de Midelt	36.01°	31.76°	23.88°
Poussière de Tinghir	41.62°	34.16°	30.53°

2.4 Mesures d'énergie libre de surface d'échantillons de miroirs

En utilisant l'approche de Good Van Oss, nous avons déterminé les composants de l'énergie libre de surface des échantillons de miroirs réflecteurs, comme indiqué dans le tableau 3.4.

Table. 3.4. Composants de l'énergie libre de surface des échantillons de miroirs.

Miroirs	Composants d'énergie libre de surface (mJ/m ²) [± 1]			
	γ_s^{Tot}	γ_s^{LW}	γ_s^-	γ_s^+
Miroir commercial	37.94	27.61	0.61	43.74
Miroir à base du TiO ₂	41.87	36.96	0.14	43.03
Miroir à base d'alumine Al ₂ O ₃	12.18	12.18	0	6.55

Les mesures de l'énergie libre de surface des échantillons de miroirs en verre ont montré que l'échantillon miroir basé sur le revêtement protecteur Al₂O₃ a la valeur minimale par rapport à l'échantillon miroir basé sur le revêtement protecteur TiO₂, ce qui peut s'expliquer par le comportement super-hydrophobe à la surface de l'alumine.

2.5 Mesures d'énergie libre de surface des particules de poussière

L'approche de Good Van Oss a été utilisée pour déterminer les composants de l'énergie libre de surface pour les particules de poussière.

Table. 3.5. Composants de l'énergie libre de surface des échantillons de particules de poussière.

Types de poussières	Composants d'énergie libre de surface (mJ/m ²) [± 1]			
	γ_s^{Tot}	γ_s^{LW}	γ_s^-	γ_s^+
Ouarzazate	42.08	36.84	0.12	57.15
Midelt	40.49	35.52	0.122	51.55
Tinghir	39.76	33.57	0.21	45.76

Le composant de base de Lewis a tendance à dominer les énergies de surface polaire des surfaces sèches. La composante d'énergie de surface de base de Lewis est la plus importante contributrice à la réactivité de surface avec les sites polaires [25]. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.5.

IV. Résultats et discussion

L'adhérence des salissures sur les miroirs réflecteurs est un phénomène très complexe difficile à prévoir. Dans ce travail, une nouvelle approche a été présentée pour étudier les effets de salissure basés sur l'interaction physico-chimique et l'énergie libre de surface pour comprendre ce phénomène très complexe. L'approche est basée sur l'énergie libre de surface d'interaction entre les particules de poussière et les miroirs réflecteurs, et ainsi le degré d'adhésion entre eux. Par conséquent, l'importance de cette recherche réside dans le fait qu'elle montre que l'adhérence entre les différents échantillons de miroirs réflecteurs et les particules de poussière a été calculée en utilisant l'équation de Dupré, les résultats sont présentés sur la Fig. 3.4.

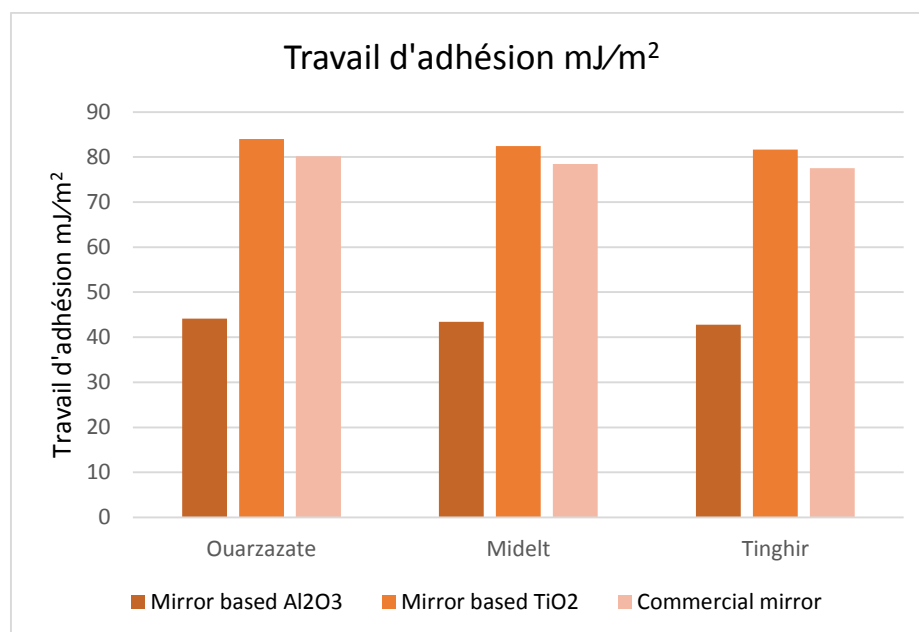


Fig. 3.4. Travail d'adhésion entre différents types de particules de poussière et les miroirs

Nos activités de recherche se concentrent sur l'effet des particules de poussière présentées sur les régions potentielles d'installation des centrales solaires à concentration. Dans ce contexte, nous avons analysé l'effet des particules de poussière à travers la prédiction du travail d'adhésion nécessaire pour séparer l'interface entre les particules de poussière et les miroirs réflecteurs sur la base de l'énergie libre de surface.

D'une part, suite aux mesures de l'angle de contact avec l'eau sur les différents échantillons de miroirs réflecteurs à base de revêtements protecteurs de dioxyde de titane et d'alumine, nous avons obtenu que les angles de contact avec l'eau étaient respectivement de $41,8^\circ$ (couche hydrophile) et $101,5^\circ$ (couche hydrophobe). Pour les échantillons de miroirs commerciaux de NOOR 1 à Ouarzazate, l'angle du contact avec l'eau a été atteint à $45,56^\circ$ (couche hydrophile). En fait, l'hydrophilie est due à l'énergie de surface, la rugosité des échantillons et à la capacité de former des liaisons hydrogène avec l'eau [26].

Dans cette recherche, nous avons remarqué que les angles de contact des échantillons de miroir à base d'alumine et de dioxyde de titane sont différents. Cependant, l'angle de contact pour l'échantillon revêtu d'alumine est élevé selon le type d'alumine utilisé. Dans des travaux précédents [6], nous avons conclu que l'hydrophilie ou l'hydrophobicité de l'alumine a été remarquée en réalisant une transformation de phase d'amorphe en cristallin ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$). Pour le revêtement d'alumine amorphe, l'angle de contact avec l'eau atteint est de $101,5^\circ$ tandis que pour l'alumine cristalline ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$), l'angle de contact avec l'eau est de $68,5^\circ$.

Dans ce travail, le choix de l'alumine amorphe est basé sur sa transparence et sa stabilité élevées par rapport à l'alumine cristalline. Pour le dioxyde de titane, l'hydrophilie est photo-induite, c'est-à-dire qu'elle n'apparaît que lorsque la surface est éclairée aux rayons UV [27]. En effet, les trous photo-induits diffusent à la surface des matériaux TiO_2 et créent des défauts qui contrôlent leurs propriétés de mouillage. Ces trous et électrons permettent la transformation des molécules d'oxygène et d'eau environnantes en radicaux hydroxyles OH qui permettent la photodégradation et la décomposition d'un nocif des substances organiques.

En plus des propriétés chimiques et physiques des échantillons revêtus d'oxyde de titane et d'alumine. Il y a une petite différence entre le verre non revêtu et les échantillons revêtus d'oxyde de titane. Cependant, l'angle de contact avec l'eau obtenu pour l'échantillon revêtu d'oxyde de titane est de $41,8^\circ$ et l'angle de contact avec l'eau pour le verre non revêtu est de $45,56^\circ$. Dans la littérature [28], l'angle de contact avec l'eau obtenu pour le verre non revêtu est de 55° . Par conséquent, nos résultats sont en bon accord avec la littérature [28], la petite différence entre nos résultats ($45,56^\circ$) et la littérature (55°) dépend des conditions de préparation, ce qui est en corrélation avec la rugosité et l'énergie libre de surface de notre verre non revêtu.

D'autre part, les mesures de l'énergie libre de surface γ_s^{Tot} sur les différents types d'échantillons de particules de poussière ont atteint $42,08 \text{ mJ/m}^2$ pour les particules de poussière

d'Ouarzazate, 40.49 mJ/m² pour Midelt et 39,76 mJ/m² pour Tinghir. La petite différence entre eux réside dans le pourcentage de constituants minéraux argileux. Pour expliquer tous ces résultats, il est nécessaire de revenir aux résultats de diffraction des rayons X pour connaître les minéraux argileux présents. Pour les particules de poussière d'Ouarzazate, les données montrent qu'en plus des minéraux de quartz et de carbonates, et pour les minéraux argileux (Vermiculites, Kaolinite et Illite), sont présents en traces. Tandis que, les données obtenues à partir des particules de poussière de Midelt, le Illite et le Vermiculites sont présents en grandes quantités, et pour les particules de poussière de Tinghir, le type Illite et Kaolinite sont présents en quantités importantes tandis que la vermiculite est présenté en trace.

Sur la base des mesures de l'énergie libre de surface et de l'équation de Dupre, le travail d'adhésion entre les échantillons de miroirs réflecteurs et les particules de poussière collectées montre que $\Delta W_{12}^{\text{adhesion}}$ pour Miroir à base du revêtement antialissure de TiO₂ a atteint 84.01 mJ/m² pour les particules de poussière d'Ouarzazate, 82.42 mJ/m² pour la poussière de Midelt et 81.63 mJ/m² pour la poussière de Tinghir. Les résultats diffèrent de ceux basés sur un miroir avec un revêtement antialissure Al₂O₃ comme ils l'ont atteint 44.14 mJ/m² pour les particules de poussière d'Ouarzazate, 43.39 mJ/m² pour les particules de poussière de Midelt et 42.78 mJ/m² pour les particules de poussière de Tinghir. En outre, les résultats des miroirs commerciaux de Noor ont atteint 80.17 mJ/m² pour les particules de poussière d'Ouarzazate, 78.48 mJ/m² pour les particules de poussière de Midelt et 77.52 mJ/m² pour les particules de poussière de Tinghir.

Compte tenu de ces résultats, nous concluons que les meilleurs résultats obtenus se situent entre le miroir avec revêtement d'alumine amorphe (Al₂O₃) et les particules de poussière de Tinghir (valeur minimale du travail d'adhésion entre eux), ce qui peut être expliqué par le comportement super-hydrophobe à la surface du revêtement d'alumine en raison d'une faible énergie de surface et du type de minéraux argileux présents dans les particules de poussière de Tinghir.

Suite aux résultats de l'analyse par diffraction des rayons X des particules de poussière de Tinghir, on constate que le type Illite de minéraux argileux est présent en grande quantité, et par le fait que l'Illite il se caractérise par sa très faible adsorption d'eau (argile non gonflante dans l'eau), nos résultats sont en bon accord avec les calculs du travail d'adhésion obtenu. De plus, le type Illite des minéraux argileux est caractérisé par une faible polarité avec l'eau (10 à 40 meq / 100 g pour la capacité d'échange cationique CEC) [29] par rapport aux d'autres types de minéraux argileux (tableau 3.6) et également par une faible valeur des forces Vdw ($\gamma_s^{LW} \approx 31 \text{ mJ/m}^2$) [30].

Table. 3.6. Valeurs de la capacité d'échange de cations (CEC) pour les minéraux argileux

Minéraux argileux.	CEC (meq/100 g)
Smectites	80-120
Illite	10 - 40
Kaolinite	1 - 10

Le gonflement des argiles peut nuire aux performances de flottation principalement en absorbant l'eau qui modifie la rhéologie [31].

Conclusion

Les particules de poussière déposées à la surface des miroirs réflecteurs sont soumises à une grande variété d'interactions; les forces de Van Der Waals et les forces électrostatiques [32]. Cependant, dans des conditions sèches présentées dans les régions potentielles pour la construction des centrales solaires à concentration les forces de Van Der Waals des fractions d'argile de particules de poussière sont considérées comme la principale cause de l'adhésion de surface des particules. Dans ce présent travail, on peut dire que les particules de poussière ne peuvent pas adhérer à la surface d'alumine super-hydrophobe en raison de la faible force d'interaction entre elles. En outre, les types de minéraux argileux présents dans les particules de poussière (Smectites, illites, vermiculites ou kaolinites) influent sur le travail d'adhésion entre l'échantillon de miroir réflecteur et les particules de poussière et sont liés à la capacité d'échange cationique des minéraux argileuse.

Références

- [1] U. Zafar, C. Hare, A. Hassanpour, and M. Ghadiri, “Drop test : A new method to measure the particle adhesion force,” *Powder Technol.*, vol. 264, pp. 236–241, 2014.
- [2] J. Polo, C. Fernández-peruchena, and M. Gastón, “Analysis on the long-term relationship between DNI and CSP yield production for different technologies,” vol. 155, pp. 1121–1129, 2017.
- [3] C. E. Kennedy, “Advances in concentrating solar power collectors:mirror and solar selective coatings,” *Assoc. Ind. Met. Coaters Laminators (AIMCAL), Fall Technical Conf.*, vol. 6103, 2007.
- [4] H. Ennaceri *et al.*, “Deposition of multifunctional TiO₂ and ZnO top-protective coatings for CSP application,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 298, pp. 103–113, 2016.
- [5] H. Ennaceri *et al.*, “Water-resistant surfaces using zinc oxide structured nanorod arrays with switchable wetting property,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 299, pp. 169–176, 2016.
- [6] E. Houda, B. Dounya, K. Asmae, B. Abdelilah, and E. Ahmed, “Deposition of Transparent Aluminum Oxide films on Silvered CSP Mirrors,” in *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2014)*, pp. 114–119, 2014.
- [7] B. Figgis, A. Ennaoui, S. Ahzi, and Y. Rémond, “Review of PV soiling particle mechanics in desert environments,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, pp. 872–881, 2017.
- [8] F. M. Zaihidee, S. Mekhilef, M. Seyedmahmoudian, and B. Horan, “Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel’s efficiency: Why and how,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 1267–1278, 2016.
- [9] Y. Jiang, L. Lu, A. R. Ferro, and G. Ahmadi, “Analyzing wind cleaning process on the accumulated dust on solar photovoltaic (PV) modules on flat surfaces,” *Sol. Energy*, no. August, pp. 1–6, 2017.
- [10] S. Ghazi, A. Sayigh, and K. Ip, “Dust effect on flat surfaces - A review paper,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 742–751, 2014.
- [11] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 698–733, 2013.
- [12] L. L. Kazmerski *et al.*, “Fundamental Studies of Adhesion of Dust to PV Module Surfaces,” *IEEE J. Photovoltaics*, pp. 1–11, 2016.
- [13] S. G. and all Cher Lin Clara Tan, “Adhesion of Dust Particles to Common Indoor Surfaces in an Air-Conditioned Environment,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 6826, pp. 541–551, 2014.
- [14] A. A. Merrouni, A. Mezrhab, and A. Mezrhab, “CSP sites suitability analysis in the Eastern region of Morocco,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 2270–2279, 2014.
- [15] H. Ennaceri, A. Ghennioui, A. Benyoussef, A. Ennaoui, and A. Khaldoun, “Direct

- normal irradiation-based approach for determining potential regions for concentrated solar power installations in Morocco,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 78–86, 2016.
- [16] R. Cantoni and K. Rignall, “Kingdom of the Sun: a critical, multiscale analysis of Morocco’s solar energy strategy,” *Energy Research & Social science.*, vol. 51, pp. 20–31, 2019.
- [17] E. J. Anna Rudawska, “Analysis for determining surface free energy uncertainty by the Owen – Wendt method,” *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 29, pp. 451–457, 2009.
- [18] A. Ghanbari and M. M. Attar, “Surface free energy characterization and adhesion performance of mild steel treated based on zirconium conversion coating: A comparative study,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 246, pp. 26–33, 2014.
- [19] J. M. Sebastian Firlik, “Comparison of methods for the surface free energy determination of polymeric layers aligning liquid crystals science technique,” *Sci. Tech.*, no. 4, 2010.
- [20] S. Beaudoin *et al.*, “Fundamental Forces in Particle Adhesion,” *Part. Adhes. Remov.*, pp. 1–79, 2015.
- [21] S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*, Second Edi. Norwich , NY, USA, 2008.
- [22] H. M. Pollock, D. Maugis, and M. Barquins, “The force of adhesion between solid surfaces in contact,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 33, no. 9, pp. 798–799, 1978.
- [23] A. Khaldoun *et al.*, “Influence of heavy metals adsorption on the surface-energy properties of fluorinated montmorillonite clays ‘Rassoul,’” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 290, no. 1–3, pp. 1–6, 2006.
- [24] C. T. Johnston, *Clay mineral–water interactions*, 1st ed., vol. 9. Elsevier Ltd., 2018.
- [25] G. Picotti, P. Borghesani, M. E. Cholette, and G. Manzolini, “Soiling of solar collectors – Modelling approaches for airborne dust and its interactions with surfaces,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 2343–2357, 2017.
- [26] R.-D. Sun, A. Nakajima, A. Fujishima, T. Watanabe, and K. Hashimoto, “Photoinduced Surface Wettability Conversion of ZnO and TiO₂ Thin Films ,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 105, no. 10, pp. 1984–1990, 2002.
- [27] O. Carp, C. L. Huisman, and A. Reller, “Photoinduced reactivity of titanium dioxide,” *Prog. Solid State Chem.*, vol. 32, no. 1–2, pp. 33–177, 2004.
- [28] N. K. Ibrayev, B. R. Ilyassov, and N. K. Ibrayev, “Development and characterization of cobalt based nano- structured super hydrophobic coating,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 146, pp. 2–8, 2016.
- [29] O. S. Thair Al-Ani, “Clay and clay mineralogy,” *Phys. – Chem. Prop. Ind. USES*, 2008.
- [30] Clint Matthew Miller, “Adhesion And The Surface Energy Components Of Natural Minerals And Aggregates,” Texas A&M University, 2011.
- [31] S. Farrokhpay, B. Ndlovu, and D. Bradshaw, “Behaviour of swelling clays versus non-swelling clays in flotation,” *Miner. Eng.*, vol. 96–97, pp. 59–66, 2016.

- [32] Q. Li, V. Rudolph, and W. Peukert, “London-van der Waals adhesiveness of rough particles,” *Powder Technol.*, vol. 161, no. 3, pp. 248–255, 2006.

**Chapitre IV: Étude de l'effet de salissure sur les
surfaces des miroirs réflecteurs via le calcul des forces
d'adhérence**

Résumé

Dans le chapitre précédent, l'adhérence de la poussière sur les miroirs réflecteurs a été évaluée expérimentalement par la théorie de DLVO. En effet, dans le but d'évaluer l'effet de la salissure par une autre méthode et aussi comparer les résultats présentés dans le chapitre III. Dans ce chapitre, nous évaluons les forces d'adhérence entre les particules de poussière sur les miroirs réflecteurs. Trois types de miroir réflecteur sont étudiés, le premier est basé sur un revêtement protecteur à base de TiO_2 superhydrophile, le second est le miroir commercial implanté à NOOR Ouarzazate, et le troisième est un miroir réflecteur à base d'alumine hydrophobe. En outre, deux types de particules de poussière sont étudiés. Le premier type est les particules de poussière d'Ouarzazate et le second type est les particules de poussière de Midelt. Il a été établi que dans les régions sèches présentées dans ces zones, pour un rayon de particule d'environ $2 \mu\text{m}$, les forces de Van der Waals sont dominantes pour les revêtements superhydrophiles/hydrophiles, et les forces capillaires sont négligées. Au contraire, pour le miroir réflecteur à base de revêtement protecteur hydrophobe Al_2O_3 , les forces capillaires sont dominantes alors que les Van der Waals sont négligés. Les force de Van der Waals sur les surfaces de l'échantillon de TiO_2 superhydrophile est dominante liée à la propriété photocatalytique du revêtement de TiO_2 superhydrophile et à la capacité de décomposer la matière organique en H_2O et CO_2 . Les forces de Van der Waals sur le miroir réflecteur avec un revêtement hydrophobe d'alumine (Al_2O_3), atteintes 4200 nN pour les particules de poussière Midelt et $27,6 \text{ nN}$ pour les particules de poussière d'Ouarzazate. Lequel tous sont en bon accord avec les résultats de diffraction des rayons X. Cependant, il a été démontré que pour les fractions d'argile, les particules de poussière de Midelt sont composées de Smectites par rapport à la poussière d'Ouarzazate. Smectites est une argile très gonflante dans l'eau par rapport aux minéraux argileux du type Illite, Kaolinite et Vermiculite (argile à faible gonflement dans l'eau). Par conséquent, l'argile gonflante contribue davantage à l'adhérence des particules de poussière sur les surfaces des miroirs réflecteurs. En conséquence, les miroirs avec des revêtements superhydrophiles sont plus appropriés pour les régions sèches à faible humidité, et les miroirs avec des revêtements hydrophobes sont plus appropriés pour les régions à forte humidité.

I. Introduction

L'adhésion de poussières sur les surfaces des miroirs réflecteurs, est un sujet de préoccupation croissant en raison de l'effet néfaste de l'accumulation de poussière sur les performances et la fiabilité du système solaire. Pour réduire l'effet des salissures sur les surfaces des miroirs de poussières et ainsi améliorer leur durabilité, l'application de revêtements anti-salissures pour les miroirs réflecteurs présente un grand intérêt. Cependant, en fonction des caractérisations potentielles des régions (conditions sèches ou d'humidité élevée) pour les installations de centrales CSC et PV. Les types d'anti-revêtement sélectionnés sont des revêtements hydrophobes ou hydrophiles. Selon Mello Ferreira et al.[1], l'application de deux films anti-salissures $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ est efficace pour réduire l'adhérence des particules de poussière. Le premier type est un sol-gel du revêtement TiO_2 superhydrophile, et le second type est un sol-gel du revêtement SiO_2 hydrophobe. De plus, Houda Ennaceri et al. [2, 3] ont développé de nouveaux types de miroirs réflecteurs protégés contre les salissures par deux types de revêtement anti-salissures; le premier type est protégé par dépôt de revêtements multifonctionnels de TiO_2 et ZnO (revêtement hydrophile) et le second type est protégé par dépôt de revêtement Al_2O_3 (revêtement hydrophobe).

Dans la littérature, les salissures dépendent de quatre facteurs essentiels [4]; type de poussière, facteurs environnementaux, facteurs d'emplacement et facteurs d'installation. Tous les facteurs sont interdépendants et de nombreuses techniques sont disponibles pour quantifier les salissures et corrélérer les résultats avec les pertes de rendement énergétique. En général, ces techniques sont classées en quatre sections: mesurer, la masse du sol, le rendement des modules solaires, la transmission lumineuse et la microscopie extérieure pour mesurer l'accumulation de poussière. La littérature sur l'adhérence de la poussière montre une variété d'approches pour mesurer l'adhérence de la poussière sur les surfaces. Premièrement, sur la base de l'énergie libre de surface et de la théorie DLVO étendue (Derjaguin, Landau, Verwey, Overbeek), l'adhérence de la poussière peut être évaluée en utilisant l'équation de Dupré ou l'équation de Hamaker; ainsi que l'adhérence de la poussière sur la surface peut être évaluée en utilisant la microscopie à force atomique (AFM) [5, 6]. Deuxièmement, suite à notre projet précédent qui a mené une préparation réussie de nouveaux types de miroirs réflecteurs anti-salissures, et le calcul du travail d'adhésion en utilisant la théorie DLVO étendue [7, 8]. Dans ce chapitre, l'adhérence de la poussière a été évaluée par les calculs des forces d'adhésion de la poussière. En outre, en

utilisant les particules de poussière collectées dans deux régions potentielles pour les installations des centrales solaires à concentration au Maroc (régions d'Ouarzazate et Midelt), les forces d'adhérence de la poussière ont été évaluées sur le miroir réflecteur commercial mis en œuvre au projet NOOR 1 Ouarzazate [9, 10], et aussi sur deux types de miroirs réflecteurs l'une protégé par revêtement antisalissure d'alumine et l'autre par revêtement antisalissure de TiO_2 .

II. Contexte théorique

1. Mécanisme d'adhésion de la poussière

Dans cette section, nous présentons un aperçu du mécanisme d'adhérence de la poussière sur les surfaces des miroirs. Comme indiqué dans la figure suivante, le cycle de vie des particules de poussière est décrit par quatre sections; Génération, dépôt, adhésion et élimination.

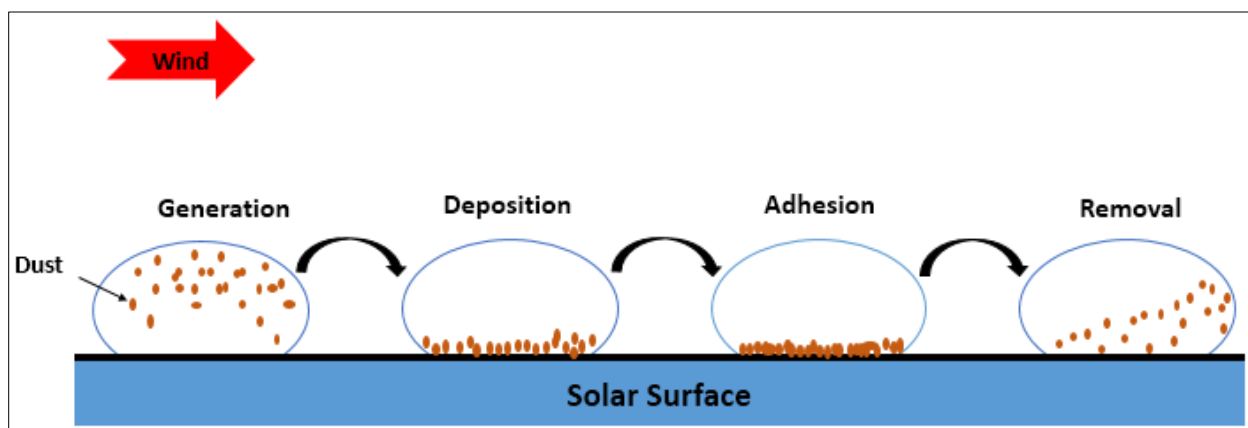


Fig. 4.1. Cycle de vie des particules de poussière

Nous commençons par étudier la génération de poussière sur les surfaces des miroirs réflecteurs, la génération de poussière est liée aux modes de transport. Dans la littérature, trois principaux modes de transport ont été proposés: le mode de reptation (ou fluage) pour les particules supérieures à $500\ \mu\text{m}$, la saltation pour les particules de diamètre compris entre $70\ \mu\text{m}$ à $500\ \mu\text{m}$ et le mode de suspension pour les petites particules inférieures à $70\ \mu\text{m}$. En fait, le mécanisme d'adhérence est la partie clé du cycle de vie de la poussière pour étudier l'effet de salissure et les performances anti-salissures des réflecteurs. Cependant, les particules adhèrent aux surfaces du fait à la fois de l'existence de forces d'attraction entre les particules et les substrats. Certaines méthodes sont disponibles pour déterminer les forces d'adhérence entre les particules de poussière et les surfaces solaires sont proposées. D'une part, selon Kazmerski et al. [5] et Cher Lin et al. [6] la mesure d'adhérence entre les particules de poussière et les miroirs réflecteurs peut être effectué en utilisant une microscopie à force atomique, le cantilever

s'incline ou s'incline vers le haut sur les particules de poussière. D'autre part, certaines recherches comme Ghadiri et al. [11], Ghanbari et al. [12], et Nguyen et al. [13], ont calculé les forces d'adhésion de particules fines basées sur les équations de Hamaker et Dupré en utilisant la propriété d'énergie libre de surface entre de deux objets (particules de poussière et le miroir réflecteur).

2. Forces d'adhésion

Selon la littérature [14,15,16], deux forces majeures affectent l'adhérence des particules de poussière sur les surfaces solaires. Dans des conditions sèches, les forces de Van der Waals sont dominantes tandis que sous une humidité élevée, les forces capillaires sont dominantes [17]. En effet, comme indiqué par Pennetta et al. [14], l'adhérence de la poussière est également renforcée par la dissolution des particules de poussière sur les gouttelettes d'eau et une humidité élevée.

En fait, l'adhérence de la poussière sur une surface solide est régie par quatre forces. Forces de Van der Waals, forces capillaires, forces électrostatiques et forces gravitationnelles:

$$\mathbf{F}_{\text{Adh}} = \mathbf{F}_{\text{vdw}} + \mathbf{F}_{\text{Cap}} + \mathbf{F}_{\text{el}} + \mathbf{F}_{\text{gravity}} \quad (\text{IV-1})$$

avec F_{vdw} les forces de Van Der Waals, F_{Ca} les forces capillaires, F_{el} les forces électrostatiques, et F_{gravity} les forces gravitationnelles.

- **Forces de Van der Waals (VDW):** Dispersion ou force de Van Der Waals définie comme la force affectée sur tout atome ou molécule pour être attirée par tout autre atome ou molécule. Par rapport aux autres forces, la force de VDW est dominante dans les régions sèches [18, 19]. Cependant, les forces de VDW entre une surface plane et une particule sphérique peuvent être exprimées par l'équation suivante:

$$F_{\text{vdw}} = \frac{AR}{6Z^2} \quad (\text{IV-2})$$

avec R est le rayon de la particule sphérique, A est la constante de Hamaker et Z est la distance de séparation entre une surface plane et une particule sphérique.

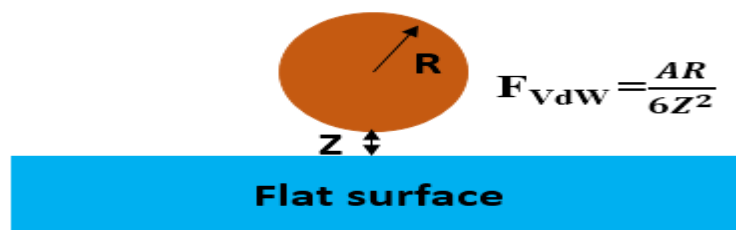


Fig. 4.2. Illustration de la force de Van Der Waal sur une surface plane

Pour un matériau donné, la constante de Hamaker peut être déterminée via les mesures d'angle de contact. En général, d'après la littérature [19, 20], nous calculons la constante de Hamaker à l'aide de l'équation suivante:

$$A = 24\pi r^2 \gamma_{12}^{LW} \quad (IV-3)$$

avec γ_{12}^{LW} sont les interactions de Lifshitz-van der Waals entre deux matériaux, et r est la distance de séparation entre deux atomes en vrac.

Dans ce contexte, γ_{12}^{LW} est donné en utilisant la règle de Good-Girifalco-Fowkes [21]:

$$\gamma_{12}^{LW} = (\sqrt{\gamma_1^{LW}} - \sqrt{\gamma_2^{LW}})^2 \quad (IV-4)$$

- **Forces capillaires:** La force capillaire est dominante en cas d'humidité élevée avec présence d'eau. Ainsi, l'humidité fait adhérer les particules à la surface [24]. De même, comme la force de van der Waals, la force capillaire entre une surface plane et une particule sphérique peut être exprimée par l'équation suivante:

$$F_{\text{Cap}} = 4\pi R \gamma \cos\theta \quad (IV-5)$$

avec R est le rayon des particules sphériques, γ est la tension superficielle de l'eau-air et θ est l'angle de contact de l'eau sur la surface.

La figure suivante présente une illustration de la force capillaire entre une surface plane et une particule sphérique.

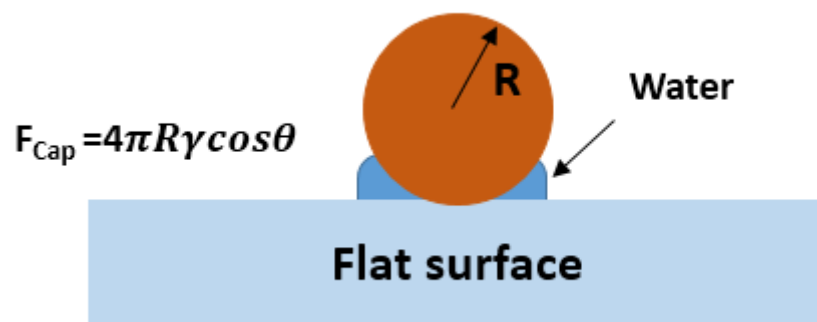


Fig. 4.3. Illustration de la force capillaire sur une surface plane

L'équation classique des forces capillaires ne dépend pas de l'humidité relative et l'humidité relative doit avoir une valeur fixe à 0% [22]; ce qui n'est pas le cas dans les conditions réelles

[23]. Dans ce contexte, selon la littérature Yakov Rabinovich et al. [22] a modifié l'équation IV-5 pour inclure l'effet de l'humidité:

$$F_{\text{Cap}} = 4\pi R\gamma \cos\theta \left(1 - \frac{z}{2r \cos\theta}\right) \quad (\text{IV-6})$$

avec R est le rayon des particules, γ est la tension superficielle de l'eau et θ est l'angle de contact de l'eau sur la surface, Z la distance de séparation, et r est le rayon d'équilibre du ménisque qui est donné par l'équation de Kelvin:

$$r = - \frac{V\gamma}{N_a k T \ln\left(\frac{P}{P_s}\right)} \quad (\text{IV-7})$$

avec V est le volume molaire de l'eau ($V = 18.03$ ml/mol), γ est la tension superficielle de l'eau, N_a est le nombre d'Avogadro (6.022×10^{23} atom/mol), k est la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} m²·Kg s⁻² K⁻¹) et T température absolue (K), P/P_s est l'humidité relative.

- **Forces électrostatiques:** Les forces électrostatiques apparaissent si les particules de poussière ont acquis une charge électrique dans l'atmosphère par les collisions. Même si les surfaces des miroirs ne sont pas chargées, les particules chargées attireront les particules de charges opposées et créeront une force électrostatique sur la surface [20]. Les forces électrostatiques peuvent être exprimées par l'équation suivante:

$$F_{\text{el}} = \frac{q^2}{4\pi K \epsilon_0 l^2} \quad (\text{IV-8})$$

Avec q les particules de charge, K est la constante diélectrique du milieu entre la particule et la surface, ϵ_0 la permittivité du milieu de l'espace libre et l la distance de séparation entre la particule chargée et la surface plane.

- **Forces gravitationnelles:** D'après la littérature [18], les forces gravitationnelles sont données par l'équation IV-9.

$$F_{\text{gravity}} = \frac{4\pi R^3 \rho g}{3} \quad (\text{IV-9})$$

avec R est le rayon des particules, ρ est la densité des particules et g est la constante d'accélération gravitationnelle.

III. Procédures expérimentales

1. Énergie de surface des particules de poussière

Dans cette partie, nous calculons l'énergie de surface des particules de poussière. La poussière a été collectée dans les régions d'Ouarzazate et Midelt (régions potentielles pour l'installation des centrales CSC au Maroc). Comme mentionné dans le chapitre III, les particules de poussière collectées ont été préparées et séchées à 110 °C et conservées dans des flacons en polyéthylène. Ensuite, à l'aide d'un analyseur de gouttes sessiles pour les mesures de trois liquides de sonde: eau distillée, éthylène glycol et diiodométhane sur les surfaces d'échantillons de particules de poussière, les composantes d'énergie de surface ont été évaluées sur la base de l'approche Good van Oss et les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Table. 4.1. Composantes d'énergie de surface des échantillons de particules de poussière.

Types de poussière	Composants d'énergie libre de surface (mJ/m ²) [± 1]			
	γ_s^{Tot}	γ_s^{LW}	γ_s^-	γ_s^+
Ouarzazate	42.08	36.84	0.12	57.15
Midelt	40.49	35.52	0.122	51.55

2. Distribution de la taille des poussières

Selon l'échelle de qualité de Wentworth [25], la taille de la poussière est définie comme de très fines particules d'argile et de limon d'un diamètre inférieur à 100 μm . Dans le cadre de cette recherche, il est nécessaire de connaître la distribution granulométrique des poussières dans les régions désertiques du Maroc dans lesquelles nous évaluons les forces d'adhérence des poussières sur les surfaces des miroirs à réflecteurs. Comme mentionné sur la figure 4.4, la distribution de taille des particules de poussière a été établie pour un diamètre compris entre 1 μm et 100 μm .

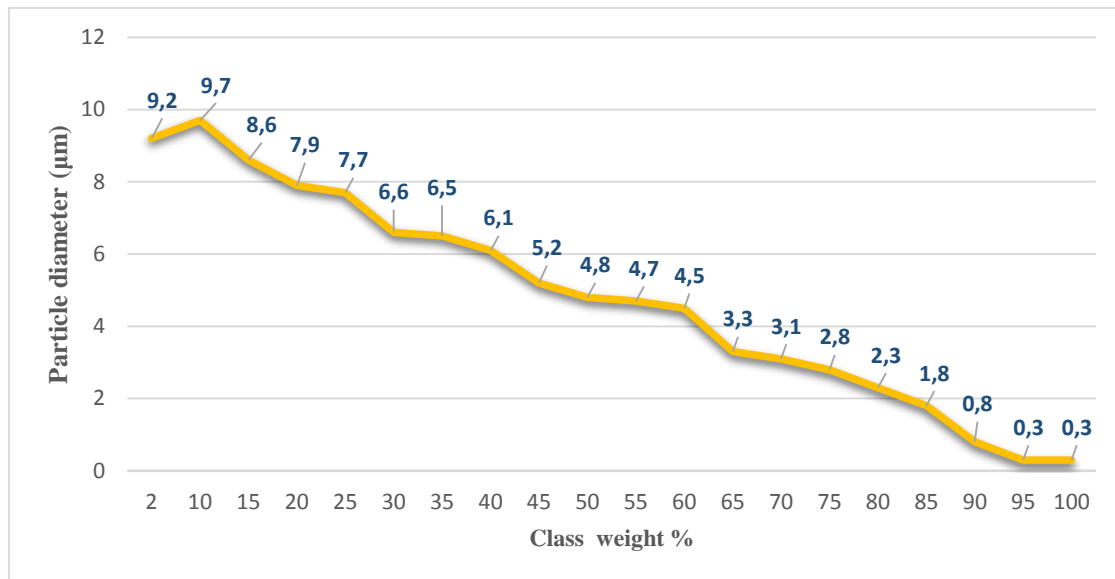


Fig. 4.4. La distribution de taille des particules de poussière

D’après la figure 4.4, il en résulte que 80% des diamètres de particules sont inférieurs à 65 µm. Par conséquent, dans cette recherche, nous évaluons les forces d'adhérence pour les particules de poussière de diamètre respectivement 2 µm, 10 µm, 15 µm, 20 µm, 30 µm, 40 µm, 50 µm, 60 µm, et 65 µm.

3. Fluorescence X des particules de poussière

La fluorescence X permet de déterminer la proportion d'éléments minéraux disponibles dans les poussières d’Ouarzazate ou de Midelt.

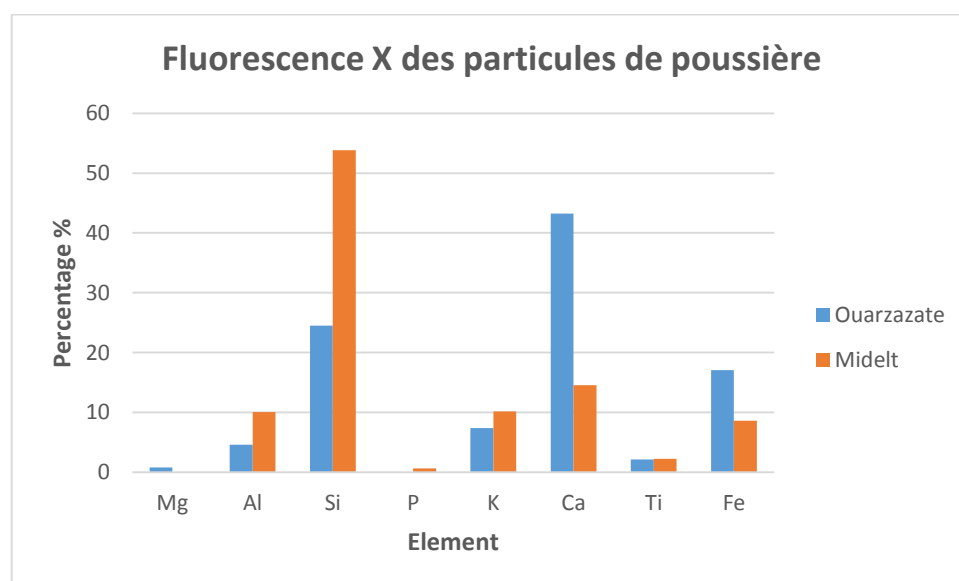


Fig. 4.5. Fluorescence X des particules de poussière

4. Diffraction des rayons X des particules de poussière

Une analyse par diffraction des rayons X a été réalisée pour identifier les types de fractions d'argile. Cependant, avant de mener les expériences aux rayons X, une séparation de la fraction d'argile dans le sol a été effectuée (particules de poussière inférieures à 2 μm) [7]. En conséquence, d'une part pour les particules de poussière d'Ouarzazate, les types de minéraux argileux de type Kaolinite et Illite sont présents en traces tandis que Calcium Carbonate et Quartz vermiculite sont présents quantités importantes (Fig. 4.6).

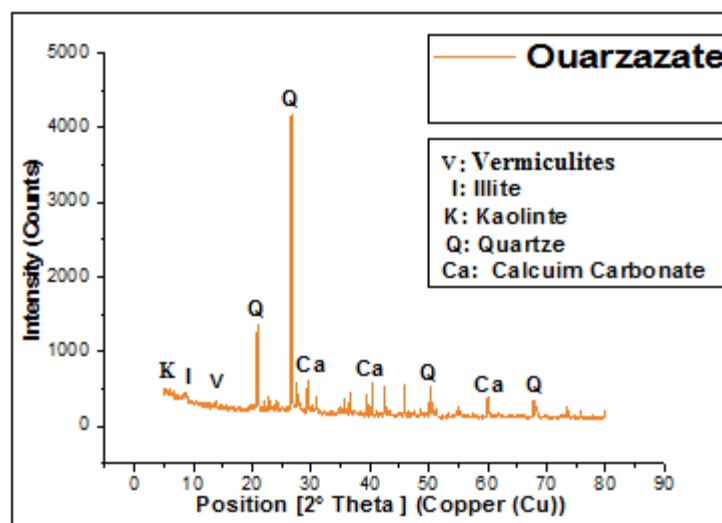


Fig. 4.6. Analyse par diffraction des rayons x des particules de poussière d'Ouarzazate.

D'autre part, comme le montre la figure 4.7 pour les particules de poussière de Midelt, les fractions d'argile d'Illite sont présentés en grande quantités importantes par rapport aux autres types de minéraux argileux (kaolinite, Smectites et vermiculites) sont présents en traces.

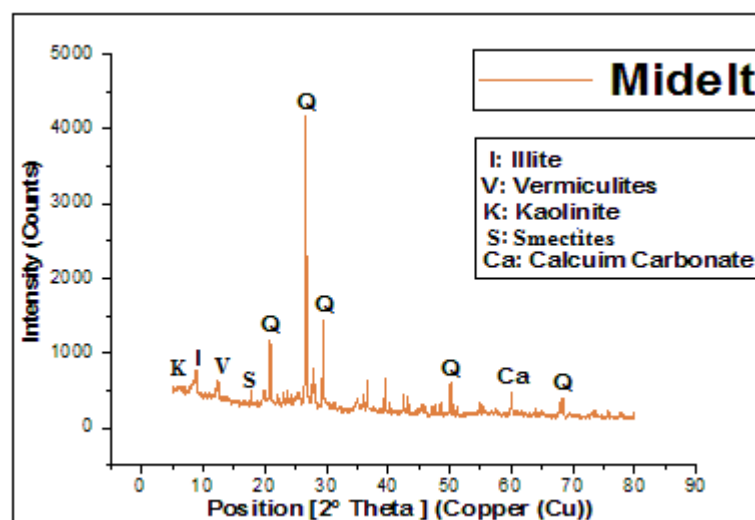


Fig. 4.7. Analyse par diffraction des rayons x des particules de poussière Midelt.

5. Énergie libre de surface des miroirs solaires

Selon l'approche de Van Oss, l'énergie de surface a été évaluée sur la base des valeurs d'angle de contact des trois liquides. Dans notre cas, pour déterminer l'énergie libre de surface, les angles de contact de l'échantillon ont été mesurés par l'analyseur de gouttes sessiles DSA-100S.

La surface est superhydrophile lorsque l'angle de contact est inférieur à 45° , ce qui est le cas pour le miroir avec revêtement superhydrophile de TiO_2 . Aussi, la surface est hydrophobe si l'angle de contact avec l'eau est supérieur à 90° , ce qui est le cas pour le miroir avec revêtement hydrophobe d'alumine (Al_2O_3).

Table. 4.2. Valeurs de l'angle de contact avec l'eau

Miroirs réflecteurs	Angle de contact avec l'eau($^\circ$) [$\pm 1^\circ$]
Miroir avec revêtement de TiO_2	5°
Miroir avec un revêtement d'alumine	101.5°
Miroir commercial	45.56°

Pour le miroir réflecteur avec revêtement du TiO_2 , il est à noter que dans cette partie nous utilisons un nouveau miroir avec revêtement superhydrophile de TiO_2 développé par Houda et al. [2], contrairement au miroir réflecteur utilisé au chapitre III avec revêtement hydrophile de TiO_2 .

6. Calcul des forces d'adhérence

6.1 Calcul des forces de Van der Waals forces

Suivant l'équation de Van Der Waals (Eq. IV-2), les valeurs de la constante de Hamaker dépendent des interactions Lifshitz – van der Waals entre deux matériaux.

Les valeurs des constantes de Hamaker ont été calculées à l'aide de l'équation IV-3 et de l'équation IV-4. Les valeurs des constantes de Hamaker pour la poussière d'Ouarzazate sont de $1.5 \times 10^{-18} \text{ mJ/m}^2$, et les valeurs des constantes de Hamaker pour la poussière de Midelt sont de $1.28 \times 10^{-18} \text{ mJ/m}^2$. Pour les constantes de Hamaker, nous prenons en compte l'interaction entre les particules de poussière et l'eau.

La distance de séparation (Z) entre une surface plane et une particule sphérique dépend de la valeur de rugosité des échantillons. Cependant, la hauteur minimale z peut être ajustée pour rencontrer la rugosité de la surface ($Z = 1,818 \times \text{rugosité}$) [9].

$$Z = 1.818 \times \text{roughness} \quad (\text{IV-10})$$

Ainsi, la rugosité de surface pour les échantillons de miroirs est respectivement de 15,26 nm pour le miroir avec revêtement superhydrophile de TiO_2 , 19,01 nm pour le miroir commercial et 1,9 nm pour le miroir avec un revêtement hydrophobe d'alumine (Al_2O_3). En conséquence, en utilisant l'équation IV-10, les valeurs la rugosité de la surface sont de 27,74 nm pour le miroir avec revêtement superhydrophile de TiO_2 , 34,57 nm pour le miroir commercial, et 3,45 nm pour le miroir avec revêtement hydrophobe d'alumine.

Les valeurs des forces de Van der Waals des particules de poussière d'Ouarzazate et Midelt sur les différents échantillons de miroirs réflecteurs sont présentées dans les figures suivantes.

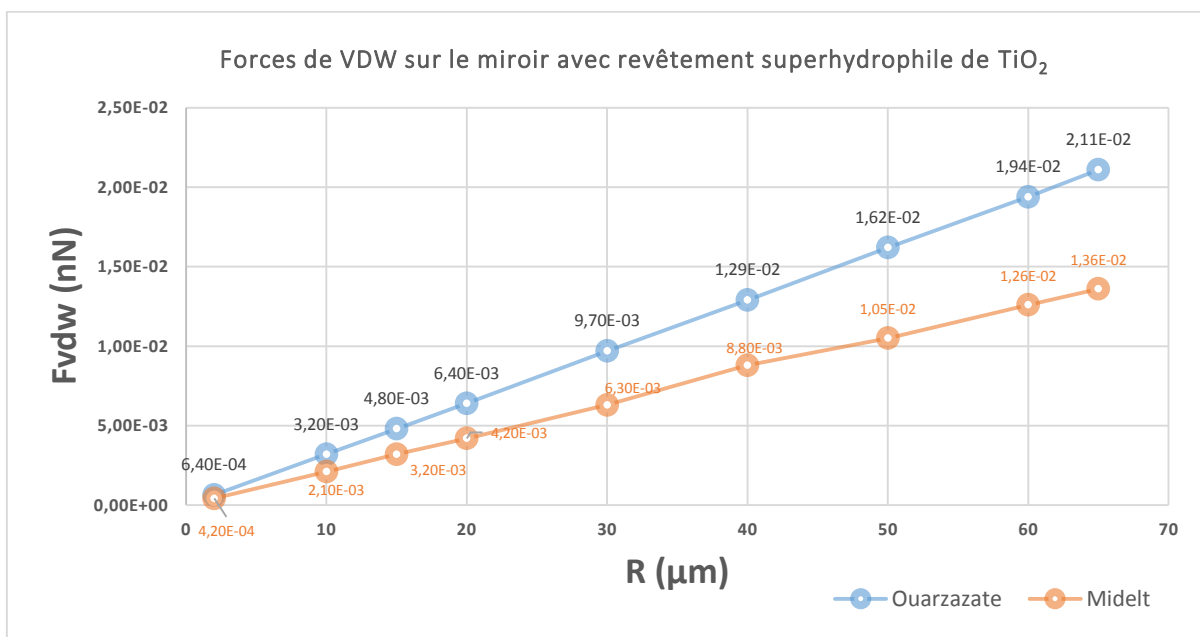


Fig. 4.8. Forces de VDW sur le miroir avec revêtement superhydrophile du TiO_2

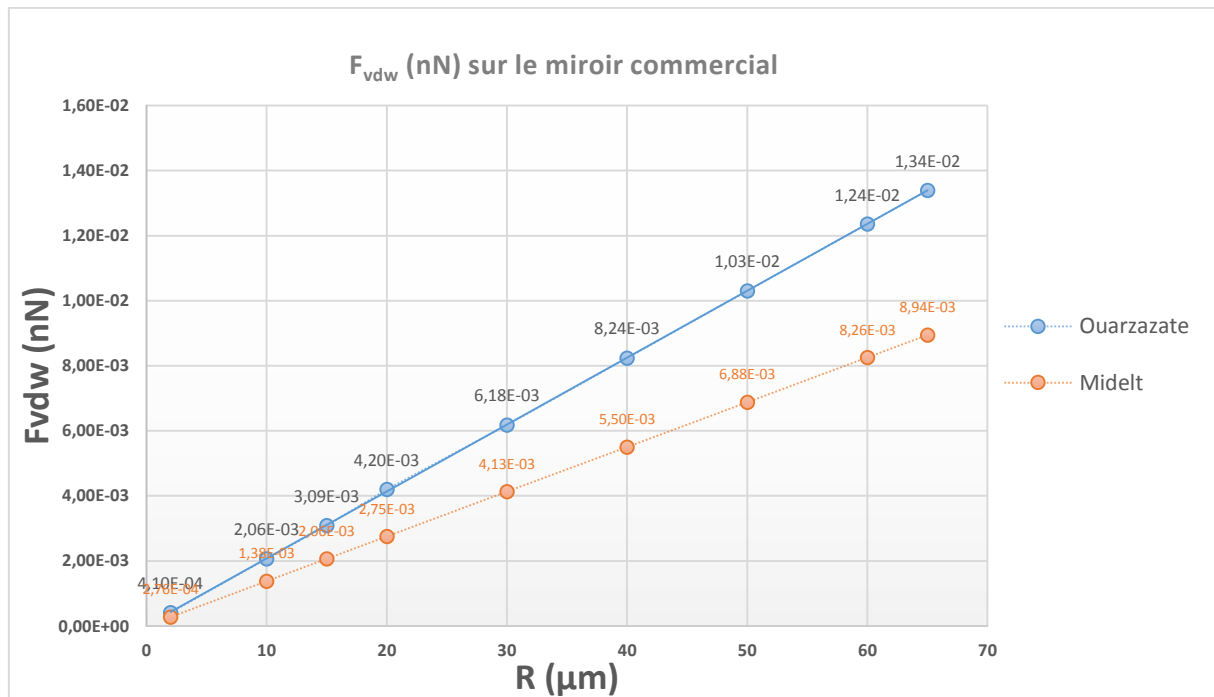


Fig. 4.9. Forces de VDW sur le miroir commercial

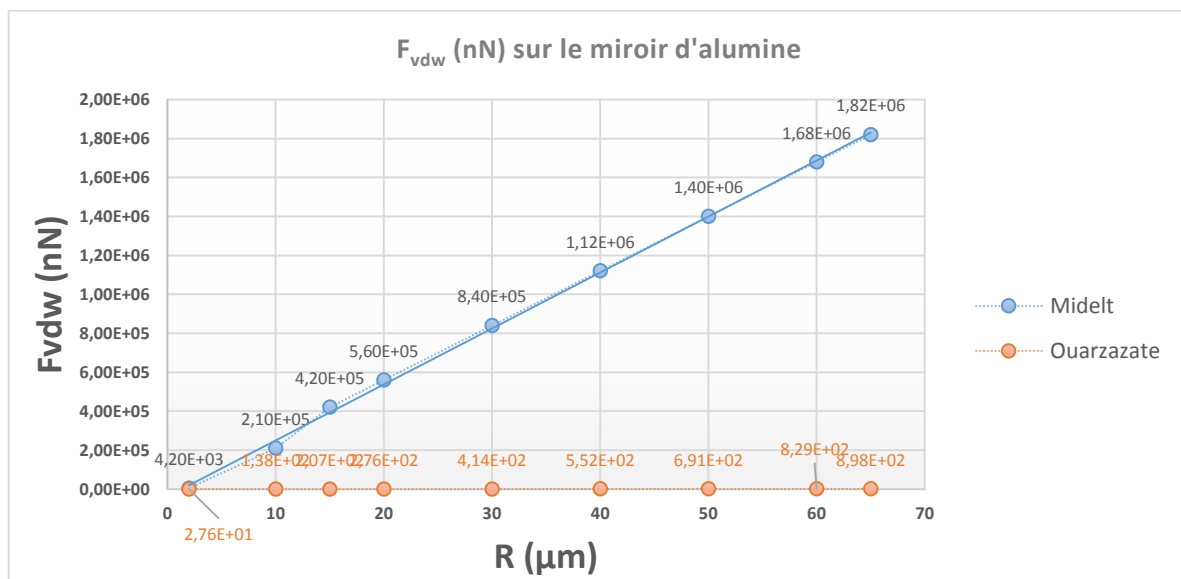


Fig. 4.10. Forces de VDW sur le miroir avec revêtement hydrophobe d'alumine

6.2. Calcul des forces capillaires

Dans la littérature, les forces capillaires associées à différentes valeurs de R ont été classiquement déterminées à l'aide de l'équation IV-5. Dans ce présent travail, pour inclure l'effet de l'humidité dans nos calculs, nous utilisons l'équation IV-6 et l'équation IV-7. Pour Midelt, l'humidité moyenne est de 58%, et pour Ouarzazate, l'humidité moyenne est de 43%. Aussi, la tension superficielle de l'eau était de 72 mJ/m² à 25 °C. Par conséquent, les forces

capillaires des particules de poussière d'Ouarzazate et Midelt sur différents échantillons de miroirs sont présentées dans les figures suivantes.

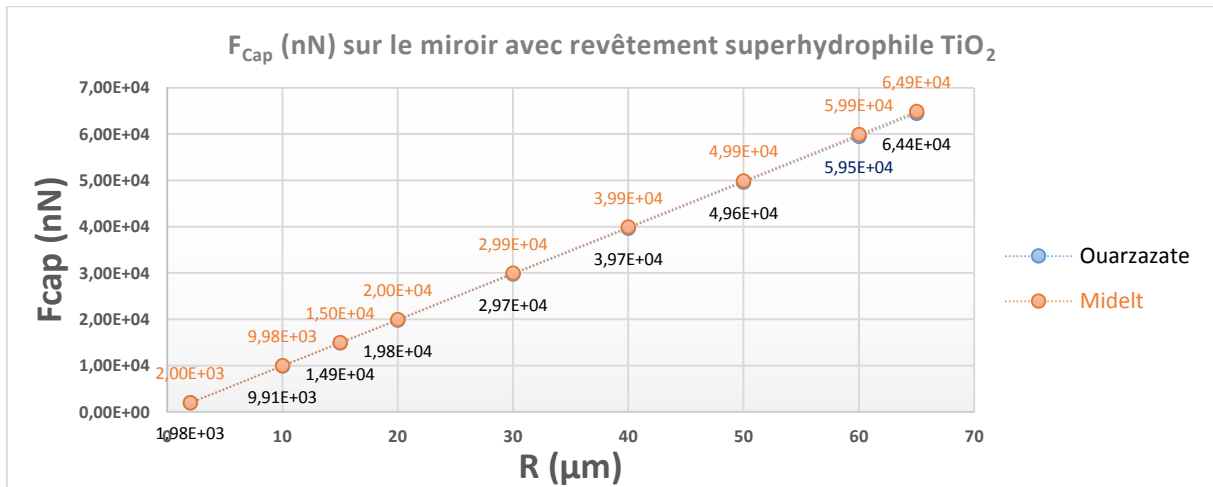


Fig. 4.11. Forces capillaires sur le miroir réflecteur avec revêtement superhydrophile de TiO₂

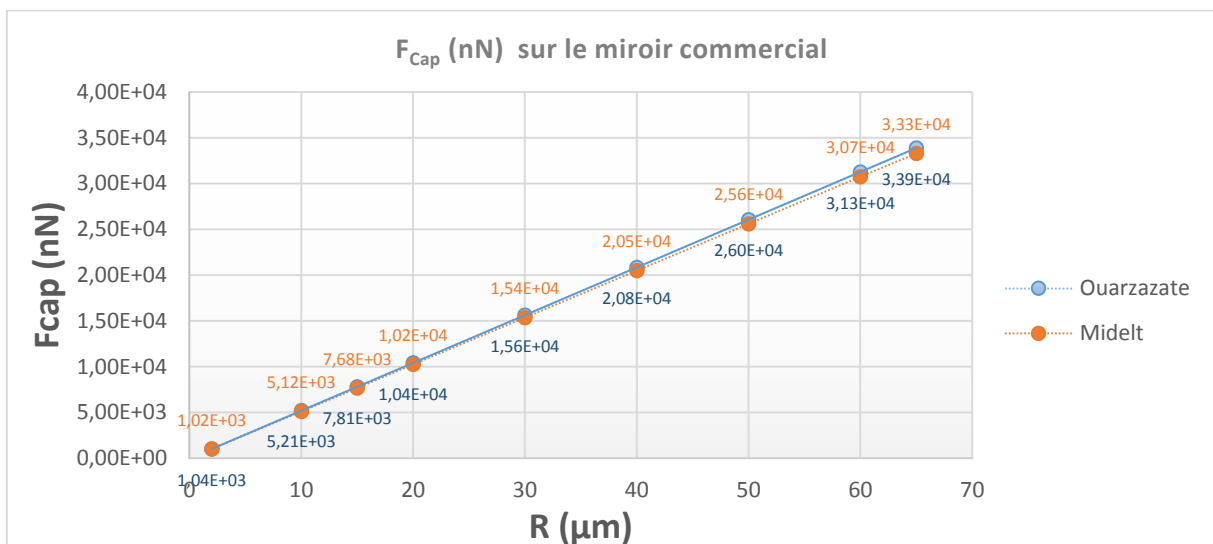


Fig. 4.12. Forces capillaires sur le miroir commercial

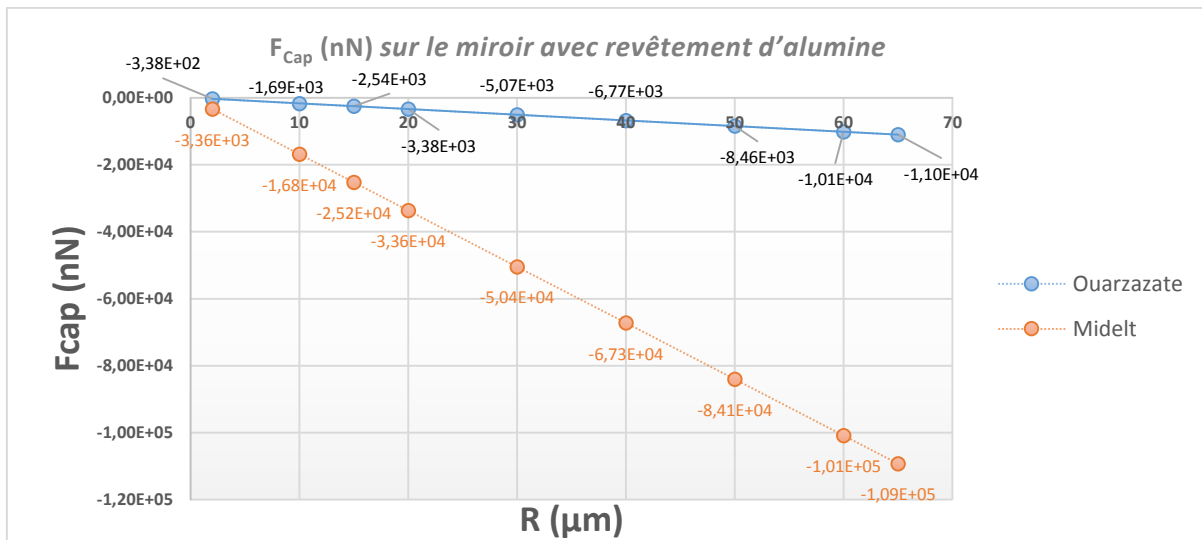


Fig. 4.13. Forces capillaires sur le miroir avec revêtement d'alumine

Comme le montrent les figures, les forces capillaires sont proportionnelles au rayon R des particules de poussière. Cependant, sur la base de l'équation IV-6, les forces capillaires sont plus importantes dans des conditions d'humidité élevée lorsque la surface est superhydrophile. De plus, lorsque la surface est hydrophobe les forces capillaires sont négatives, cela signifie que les particules de poussière sont répulsives (aucun ménisque n'est disponible); ce qui est le cas pour le miroir du Al₂O₃ (revêtement hydrophobe) [24].

6.3. Calcul des forces électrostatiques

En suivant l'équation IV-8, les forces électrostatiques sont associées à la charge des particules de poussière et au rayon des valeurs de particules sphériques (R). La permittivité de l'air (ϵ_0) est de $8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$, et la constante diélectrique (K) est égale à 1 dans notre cas (le milieu entre les particules et la surface est l'air). Aussi, pour la distance de séparation entre la particule chargée et la surface plane égale à deux rayons R ($l = 2R$).

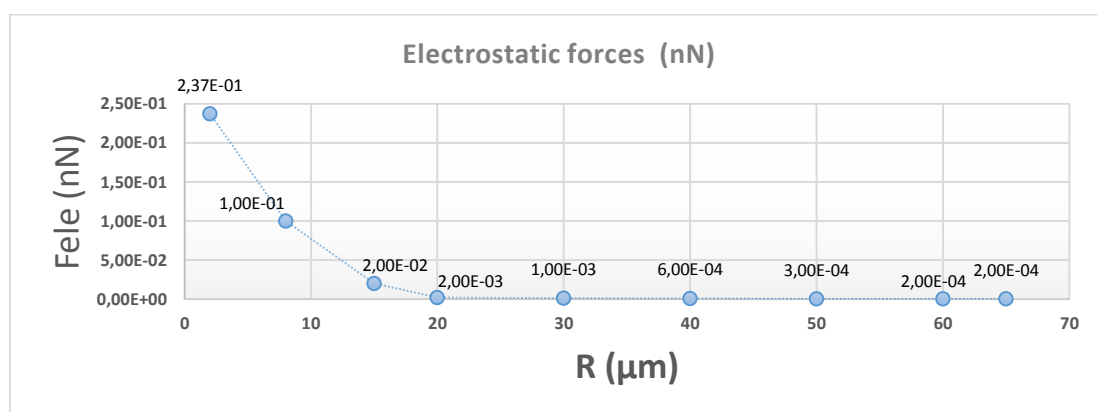


Fig. 4.14. Les forces électrostatiques pour différentes valeurs r

Selon la littérature [6], les forces électrostatiques sont plus faibles dans l'eau que dans l'air. En conséquence, les forces électrostatiques peuvent être importantes dans les régions sèches à faible humidité. Ensuite, en tenant compte du fait que nos échantillons de miroirs ne sont pas des conducteurs. Par conséquent, aucune interaction entre les particules chargées n'apparaît et la surface dissipera le dépôt de toute particule chargée.

6.4. Forces gravitationnelles

Les forces gravitationnelles ont été calculées à l'aide de l'équation IV-9. Pour une surface plane de densité ρ des particules égale à 2650 kg/m^3 et $g= 9.8 \text{ m/s}^2$.

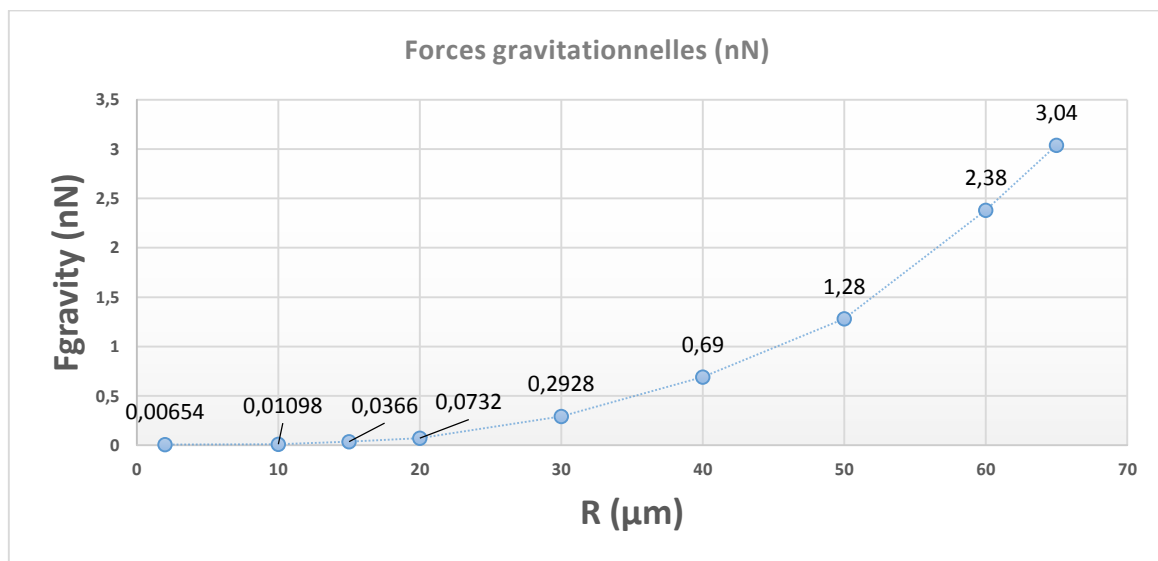


Fig. 4.15. Calcul des forces gravitationnelles pour une surface plane pour différentes valeurs de r

Dans notre cas, pour les petites particules dont la taille varie de $5 \mu\text{m}$ à $30 \mu\text{m}$, les forces gravitationnelles sont négligeables. En conséquence, selon la littérature, les forces gravitationnelles seront importantes que pour les particules de poussière avec un rayon de particule supérieur à $500 \mu\text{m}$ [25].

III. Résultats et discussion

Comme mentionné précédemment, les régions désertiques sont considérées comme des sites appropriés pour l'installation des centrales solaires. Cependant, l'adhérence de la poussière sur les surfaces des miroirs minimise la réflectance des miroirs et donc l'efficacité des centrales. Dans ce contexte, tous les chercheurs s'attachent à évaluer l'accumulation et l'adhérence des poussières présentées dans ces zones. En fait, selon les chercheurs précédents[26, 27], plusieurs approches sont proposées pour évaluer l'adhérence de la poussière entre les particules de poussière et les miroirs solaires soit sur la base de la microscopie AFM, ou à l'aide de l'équation de Dupré basée sur la théorie DLVO.

Dans cette recherche, suite à nos recherches sur l'évaluation de l'adhérence des poussières sur les surfaces des miroirs réflecteurs via la théorie DLVO étendue [7]. Le but de ce chapitre est d'évaluer l'effet d'adhérence des salissures à travers le calcul des forces d'adhérence des particules de poussière d'Ouarzazate et des particules de poussière de Midelt avec trois échantillons de miroirs réflecteurs. Le premier est un miroir réflecteur avec revêtement superhydrophile de TiO_2 , et le second est un miroir réflecteur hydrophile (miroir commercial) mis en œuvre dans NOOR 1 Ouarzazate, et le troisième est un miroir réflecteur avec revêtement hydrophobe d'alumine.

Comme mentionné dans le contexte théorique, les forces d'adhérence sont régies par quatre forces: les forces de Van der Waals (F_{vaw}), les forces capillaires (F_{cap}), les forces électrostatiques (F_{el}) et les forces gravitationnelles (F_{gravity}). Les forces de Van der Waals et capillaires sont considérées comme les deux principales forces qui affectent l'adhérence de la poussière sur les miroirs solaires.

Dans ce qui suit, nous discutons les résultats des forces d'adhésion pour le rayon de la particule $30 \mu\text{m}$ (particules de poussière moyennes) et le rayon de la particule égal à $2 \mu\text{m}$. Tout d'abord, comme présenté sur la Fig. 4.14, les valeurs des forces électrostatiques sont proportionnelles au rayon des particules (R). Cependant, pour les petits rayons de particules autour de $2 \mu\text{m}$, les forces électrostatiques sont importantes par rapport au rayon des particules autour de $65 \mu\text{m}$. Selon la littérature [28], les forces électrostatiques sont plus faibles dans l'eau que dans l'air. Par conséquent, les forces électrostatiques peuvent être importantes dans les régions sèches à faible humidité. Ensuite, en tenant compte du fait que les échantillons de miroirs utilisés dans ce travail ne sont pas des conducteurs. Par conséquent, aucune interaction entre les particules chargées n'apparaît et la surface dissipera le dépôt de toute particule chargée.

En ce qui concerne les résultats des forces capillaires sur les différents échantillons de miroirs réflecteurs, les forces capillaires sont proportionnelles au rayon R des particules de poussière. Pour un rayon de particule égal à $2 \mu\text{m}$, les forces capillaires sur le miroir à base de revêtement protecteur Superhydrophile TiO_2 ont été atteintes 1980 nN pour les particules de poussière de Midelt et 2000 nN pour les particules de poussière d'Ouarzazate. Les résultats ont montré que les valeurs des forces capillaires pour Midelt (avec 43% d'humidité) sont importantes par rapport aux poussières d'Ouarzazate (Fig. 4.11).

Par conséquent, les forces capillaires sont plus importantes en cas d'humidité élevée. De plus, les forces capillaires sur le miroir commercial hydrophile atteintes 1020 nN pour les particules

de poussière Midelt et de 1040 nN pour les particules de poussière d'Ouarzazate (Fig. 4.12). Ensuite, lorsque la surface est hydrophobe, les forces capillaires sont négatives (Fig. 4.13), ce qui est le cas pour le miroir réflecteur avec revêtement d'alumine (revêtement hydrophobe) [24]. Les valeurs négatives signifient que les particules de poussière sont répulsives (aucun ménisque n'est disponible). En conséquence, pour les surfaces hydrophobes, les forces capillaires sont négligées. Ce résultat est en bon accord avec la littérature. Cependant, selon la littérature [29, 30], les revêtements autonettoyants sont généralement hydrophobes / superhydrophobes car leur angle de contact avec l'eau est supérieur à 90° ; et donc l'adhérence entre la saleté et la surface est plus faible.

Pour les résultats des forces de van der Waals sur différents échantillons de miroirs réflecteurs, les forces de VDW sont proportionnelles au rayon R des particules de poussière. Pour un rayon de particule égal à $2 \mu\text{m}$, les forces VDW sur le miroir basées sur le revêtement de protection Superhydrophile TiO_2 atteintes 0,00042 nN pour les particules de poussière Midelt et 0,00064 nN pour les particules de poussière d'Ouarzazate (Fig. 4.11). Ensuite, pour le miroir réflecteur avec revêtement d'alumine (revêtement hydrophobe), les forces de VDW atteintes 4200 nN pour les particules de poussière Midelt, et 27,6 nN pour les particules de poussière d'Ouarzazate (Fig. 4.13). En ce qui concerne les résultats des forces VDW, les forces VDW sont plus faibles pour les miroirs hydrophiles / superhydrophiles par rapport aux miroirs hydrophobes. Les forces de Van der Waals à la surface de l'échantillon de TiO_2 sont plus faibles liées à la propriété photocatalytique du revêtement de TiO_2 superhydrophile et à la capacité de décomposer la matière organique en H_2O et CO_2 , (effet Honda-Fujishima) [31].

Premièrement, les forces de Van Deer Waals dépendent directement de la capacité de la surface à se polariser. Ainsi, en considérant les compositions de poussière présentées sur la figure 4. 5. Les constantes diélectriques de la calcite (6-9) et de la silice (4-6) [32, 33], sont toutes en bon accord avec les résultats de VDW force les résultats d'adhérence, où les particules de poussière d'Ouarzazate sont constituées de calcite et les particules de poussière de Midelt sont constituées de silice. Deuxièmement, la petite différence dans les forces de Van Deer Waals entre les deux types de particules de poussière réside dans le type de minéraux argileux présentés dans chaque type de particules de poussière (Fig. 4.6 et Fig. 4.7).

Pour les résultats de diffraction des rayons X pour les particules de poussière d'Ouarzazate et Midelt. Il a été démontré que pour les fractions d'argile, les particules de poussière de Midelt sont composées de Smectites par rapport à la poussière d'Ouarzazate. Smectites est une argile

très gonflante dans l'eau (70-150 meq / 100g) [34, 35]; par rapport aux minéraux argileux de type Illite, Kaolinite et Vermiculites (argile à faible gonflement dans l'eau). Ensuite, d'après nos travaux antérieurs [7], les fractions d'argile des particules de poussière contribuent davantage à l'adhérence des particules de poussière sur les surfaces des miroirs à réflecteur [36].

En conséquence, dans les régions sèches, les forces de van der Waals sont négligées pour les échantillons superhydrophiles et les forces capillaires sont importantes. Au contraire, pour le revêtement hydrophobe, les forces capillaires sont négligées pour les échantillons superhydrophiles, et les forces de van der Waals sont importantes. Donc, les miroirs CSP avec des revêtements superhydrophiles conviennent mieux aux régions sèches à faible humidité.

Conclusion

Les forces d'adhérence de la poussière sont les facteurs clés pour connaître la force de friction réelle des particules de poussière sur les surfaces solaires. Cependant, évaluer les forces d'adhérence est d'un grand intérêt pour améliorer la durabilité des miroirs réflecteurs solaires et donc le rendement des centrales solaires. Dans ce présent chapitre, les forces d'adhésion des poussières ont été évaluées entre les miroirs hydrophiles/superhydrophiles et le miroir hydrophobe avec des particules de poussières de Ouarzazate et Midelt. Cependant, dans les régions sèches, les forces de VDW sont dominantes pour le miroir hydrophobe et elles sont proportionnelles au rayon de poussière des particules; et les forces capillaires seront dominantes pour les miroirs hydrophiles / superhydrophiles. Cette étude nous aide à faire le meilleur choix pour une sélection des types de revêtements antisalissure pour les miroirs réflecteurs en fonction des types de régions; conditions sèches ou d'humidité élevée.

Références

- [1] M. Kharbach and T. Chfadi, “CO₂ emissions in Moroccan road transport sector: Divisia, Cointegration, and EKC analyses,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, pp. 396–401, 2017.
- [2] H. Ennaceri *et al.*, “Deposition of multifunctional TiO₂ and ZnO top-protective coatings for CSP application,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 298, pp. 103–113, 2016.
- [3] E. Houda, B. Dounya, K. Asmae, B. Abdelilah, and E. Ahmed, “Deposition of Transparent Aluminum Oxide films on Silvered CSP Mirrors,” in *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC 2014)*, pp. 114–119, 2014.
- [4] M. Reza, H. Hizam, C. Gomes, M. Amran, M. Ismael, and S. Hajjighorbani, “Power loss due to soiling on solar panel : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1307–1316, 2016.
- [5] L. L. Kazmerski *et al.*, “Fundamental Studies of Adhesion of Dust to PV Module Surfaces,” *IEEE J. Photovoltaics*, pp. 1–11, 2016.
- [6] S. G. and all Cher Lin Clara Tan, “Adhesion of Dust Particles to Common Indoor Surfaces in an Air-Conditioned Environment,” *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 6826, pp. 541–551, 2014.
- [7] A. EL Baraka, H. Ennaceri, A. Ennaoui, A. Ghennioui, A. Jorio, and A. Khaldoun, “A novel approach to evaluate soiling adhesion on the surface of CSP reflectors via extended DLVO theory,” *Appl. Phys. A*, vol. 125, pp. 1–8, 2019.
- [8] H. Ennaceri, A. Khaldoun, A. Benyoussef, T. Köhler, R. SáezAraoz, and A. Ennaoui, “Transparent and Hydrophilic TiO₂ Anatase as Top Protective Layer for CSP Reflectors,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 1119, pp. 355–359, 2015.
- [9] R. J. Isaifan, D. Johnson, L. Ackermann, B. Figgis, and M. Ayoub, “Solar Energy Materials and Solar Cells Evaluation of the adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 191, pp. 413–421, 2019.
- [10] K. Ilse *et al.*, “Advanced performance testing of anti-soiling coatings - Part II : Particle-size dependent analysis for physical understanding of dust removal processes and determination of adhesion forces,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 202, p. 110049, 2019.
- [11] U. Zafar, C. Hare, A. Hassanpour, and M. Ghadiri, “Drop test : A new method to measure the particle adhesion force,” *Powder Technol.*, vol. 264, pp. 236–241, 2014.
- [12] A. Ghanbari and M. M. Attar, “Surface free energy characterization and adhesion performance of mild steel treated based on zirconium conversion coating: A comparative study,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 246, pp. 26–33, 2014.
- [13] D. Nguyen, T. Phan, T. P. Hsu, and J. Phan, “Adhesion and surface energy of shale rocks,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 520, pp. 712–721, 2017.
- [14] S. Pennetta, S. Yu, P. Borghesani, M. Cholette, J. Barry, and Z. Guan, “An Investigation on Factors Influencing Dust Accumulation on CSP Mirrors,” in *AIP Conference Proceedings 1734*, vol. 070024, 2016.

- [15] A. Rifai, N. Abu, B. S. Yilbas, and M. Khaled, “Mechanics of dust removal from rotating disk in relation to self-cleaning applications of PV protective cover,” *Sol. Energy*, vol. 130, pp. 193–206, 2016.
- [16] R. A. Bowling, “An Analysis of Particle Adhesion on Semiconductor Surfaces,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 157, pp. 2208–2214, 1985.
- [17] A. H. Ibrahim, R. M. Brach, and P. F. Dunn, “Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow: Microparticle motion after detachment,” *J. Aerosol Sci.*, vol. 35, no. 10, pp. 1189–1204, 2004.
- [18] Q. Li, V. Rudolph, and W. Peukert, “London-van der Waals adhesiveness of rough particles,” *Powder Technol.*, vol. 161, no. 3, pp. 248–255, 2006.
- [19] L. R. W. David B.Hough, “The calculation of hamakar constants from liftshitz theory with applications to weeting phenomena,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 14, pp. 3–41, 1980.
- [20] C. Three, H. Constants, M. E. Distance, T. N. I. Surfaces, C. Materials, and P. I. Energies, “The Extended DLVO Theory,” *Interface Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 31–48, 2008.
- [21] M. K. C. C. J. Van Oss, “Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems,” *Chem. Rev.*, vol. 88, pp. 927–941, 1988.
- [22] Y. I. Rabinovich, J. J. Adler, M. S. Esayanur, A. Ata, R. K. Singh, and B. M. M. U, “Capillary forces between surfaces with nanoscale roughness,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, no. 96, pp. 213–230, 2002.
- [23] Y. I. Rabinovich, T. G. Movchan, N. V Churaev, and P. G. Ten, “Phase Separation of Binary Mixtures of Polar Liquids Close to Solid Surfaces,” *Langmuir*, vol. 7, pp. 817–820, 1991.
- [24] D. (Neuchatel U. Juncker, “Capillary Microfluidic Systems for Bio / Chemistry,” 2002.
- [25] S. Aramrak, M. Flury, and J. B. Harsh, “Detachment of deposited colloids by advancing and receding air-water interfaces,” *Langmuir*, vol. 27, no. 16, pp. 9985–9993, 2011.
- [26] B. Figgis, A. Ennaoui, B. Guo, W. Javed, and E. Chen, “Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 158–164, 2016.
- [27] C. He, J. Benkoski, W. L. Luedeman, J. O. Teehan, M. H. Sarah, and R. D. Lorenz, “Experimental investigation of surface adhesion of Titan analog materials : Mitigation by dust-repellent coatings Force,” *Planet. Space Sci.*, vol. 179, 2019.
- [28] M. Boström, V. Deniz, G. V Franks, and B. W. Ninham, “Extended DLVO theory : Electrostatic and non-electrostatic forces in oxide suspensions,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 126, pp. 5–15, 2006.
- [29] S. S. Latthe, R. S. Sutar, V. S. Kodag, A. K. Bhosale, and A. M. Kumar, “Self-cleaning superhydrophobic coatings : Potential industrial applications,” *Prog. Org. Coatings*, vol. 128, pp. 52–58, 2019.
- [30] V. A. Ganesh, H. K. Raut, A. S. Nair, and S. Ramakrishna, “A review on self-cleaning

- coatings,” *J. Mater. Chem.*, vol. 21, no. 41, pp. 16304–16322, 2011.
- [31] H. Search, C. Journals, A. Contact, M. Iopscience, and I. P. Address, “TiO₂ Photocatalysis : A Historical Overview and Future Prospects,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 8269–8285, 2005.
- [32] A. Martinez and A. P. Byrnes, “Modeling dielectric-constant values of geologic materials: An aid to ground-penetrating radar data collection and interpretation,” *Curr. Res. Earth Sci.*, vol. 247, no. 1, pp. 1–16, 2001.
- [33] I. Lebron, D. A. Robinson, S. Goldberg, and S. M. Lesch, “The Dielectric Permittivity of Calcite and Arid Zone Soils with Carbonate Minerals,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 68, no. 5, pp. 1549–1559, 2004.
- [34] G. E. Christidis, “Industrial clays,” in *European Mineralogical Union Notes in Mineralogy*, vol. 9, no. 1, pp. 341–414, 2011.
- [35] K. Egashira and H. Tanigawa, “Swelling properties of smectitic clays of different origins,” *Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 32, no. 4, pp. 635–638, 1986.
- [36] M. Geramian, M. Osacky, D. G. Ivey, Q. Liu, and T. H. Etsell, “Effect of Swelling Clay Minerals (Montmorillonite and Illite-Smectite) on Nonaqueous Bitumen Extraction from Alberta Oil Sands,” *Energy and Fuels*, vol. 30, no. 10, pp. 8083–8090, 2016.

**Chapitre V : Amélioration des techniques
de nettoyage des miroirs solaires**

Résumé

Dans les deux chapitres précédents, l'effet de la salissure a été évalué par deux méthodes. Dans le chapitre III l'adhérence de la poussière a été évaluée expérimentalement par la théorie de DLVO, ainsi dans le chapitre IV l'adhérence a été évaluée par calculs des forces d'adhérence. Ainsi, afin de minimiser les effets de la salissure sur les surfaces des miroirs solaires, l'application des films anti-salissures est efficace pour réduire l'adhérence de la poussière. Également, les centrales à énergie solaire concentrée nécessitent une consommation d'eau importante qui se trouve généralement dans des régions arides et dépourvues de ressources en eau, leur fonctionnement peut être problématique. Dans ce contexte, la plus grande centrale solaire thermique acceptée à ce jour est le central solaire marocain NOOR. Le but de ce chapitre est de trouver de nouvelles solutions pouvant être mises en œuvre dans le projet NOOR pour diminuer la consommation d'eau dans l'opération de lavage des miroirs réflecteurs, cependant basé sur la théorie DLVO étendue et le modèle Good-van OSS pour décrire l'adhérence entre les miroirs réflecteurs et les liquides de nettoyage pendant le processus de nettoyage. Certains additifs sont suggérés pour diminuer l'énergie libre de surface de l'eau et, par conséquent augmenter l'étalement et la mouillabilité de l'eau au contact des miroirs réflecteurs. Il est suggéré de mélanger tous les additifs choisis qui ont un faible travail d'adhésion avec de l'eau afin d'augmenter l'étalement et la mouillabilité de l'eau. Cependant, dans ce chapitre, le Ghassoul naturel, il est fortement recommandé de le mélanger avec de l'eau. En fait, le Ghassoul naturel contient à la fois un côté hydrophile (aimant l'eau), tel qu'un anion acide, ($-\text{CO}^{2-}$ ou SO^{3-}) et un côté hydrophobe (qui déteste l'eau); un côté contient des charges positives et l'autre des charges négatives. En outre, certains additifs et tensioactifs sont suggérés qui ont les mêmes propriétés pour diminuer la tension superficielle de l'eau comme l'oxyde de polyéthylène (PEO), l'alcool polyvinylique (PVOH), l'acétate de cellulose (CA), le sulfate de dodécyle de sodium (SDS) et le bromure de Cetyltriméthylammonium (CTAB).

I. Introduction

L'efficacité des centrales solaires à concentration dépend principalement de la réflectance des miroirs réflecteurs. Cependant, dans les régions désertiques et en raison de l'adhérence des salissures, les miroirs réflecteurs subissent des pertes de puissance de sortie significatives allant jusqu'à 1% par conséquent réduisent l'efficacité des centrales [1]. Ainsi, pour réduire l'effet de salissure sur les miroirs réflecteurs solaires, un nettoyage est nécessaire pour favoriser l'efficacité de l'électricité produite et minimiser l'adhérence et l'accumulation de poussière sur les surfaces des miroirs réflecteurs.

Dans ce contexte, comme illustré sur la figure 5.1, les techniques de nettoyage sont classées en deux catégories principales; Nettoyage naturel et nettoyage artificiel [2, 3]. Le nettoyage naturel signifie la pluie, le vent, la neige et la rosée; tandis que le nettoyage artificiel comprend le nettoyage à sec, la technique de tamis électrodynamique et la méthode de nettoyage humide. La méthode de nettoyage humide nécessite de l'eau en grandes quantités et sous haute pression continue pour éviter toute saleté de particules collées sur les surfaces des miroirs réflecteurs.

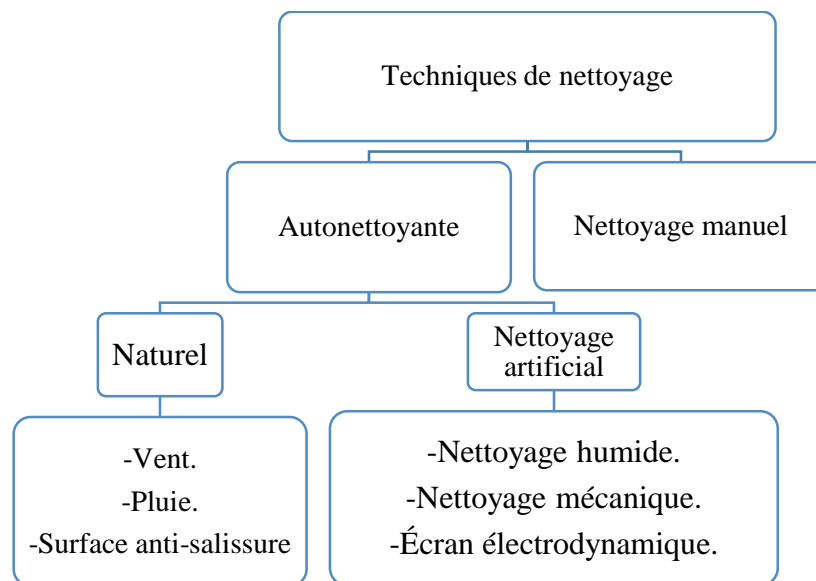


Fig. 5.1. *Techniques de nettoyage*

Le plus grand central solaire accepté à ce jour est le projet marocain NOOR (près d'Ouarzazate), qui produira jusqu'à 500 MW d'électricité d'ici 2020 [4]. Cependant, étant donné que les centrales CSC sont généralement situées dans des régions arides dépourvues de ressources en eau[5], les miroirs à réflecteur nécessitent également une utilisation importante d'eau dans le processus de nettoyage. Étant donné que la quantité d'eau utilisée dans cette technologie est très

perceptible et l'empêche d'être un système d'énergie entièrement verte. Notre objectif est de trouver de nouvelles solutions pour réduire la consommation d'eau utilisée dans le processus de nettoyage des miroirs réflecteurs. Notre approche principale suivie dans cette partie est d'ajouter des additifs à l'eau distillée pour une meilleure distribution de l'eau au contact des surfaces des miroirs réflecteurs.

Sur la base de la théorie DLVO étendue [6], notre approche a été prouvée et analysée en deux étapes: La première étape était le calcul de la tension superficielle des trois facteurs principaux (eau, additifs et miroir réflecteur) et la deuxième étape était le calcul du travail d'adhésion de la situation actuelle et le comparer sur la situation proposée; les calculs avaient été effectués en utilisant l'approche du modèle Good Van Oss. Cette comparaison conduit à suggérer l'ajout d'additifs et de tensioactifs ayant les mêmes propriétés que l'oxyde de polyéthylène (PEO), l'alcool polyvinylique (PVOH), le Ghassoul naturel, l'acétate de cellulose (CA), le sulfate de dodécyle de sodium (SDS) et le bromure de Cétyltriméthylammonium (CTAB); pour diminuer en conséquence la tension superficielle de l'eau, et donc un bon étalement au contact des miroirs solaires dans le processus de nettoyage. Tout au long de cette méthode, nous avons estimé une forte diminution de l'utilisation de l'eau lorsqu'elle est ajoutée avec une petite quantité d'argile; depuis, l'argile (Ghassoul) est un produit marocain hautement sûr, bon marché. Cette estimation garantira un bon nettoyage, une utilisation efficace de l'eau, un nombre limité de cycles de nettoyage et la promotion d'un produit national qui peut être utilisé dans de nombreux autres processus qui traitent l'eau et pas seulement dans le processus de nettoyage.

II. Méthodologie et procédures expérimentales

1. Méthodologie

Comme mentionné précédemment, le processus de nettoyage des réflecteurs solaires peut favoriser l'efficacité de l'électricité produite. Dans le central solaire NOOR, la technique de nettoyage humide est utilisée pour nettoyer les surfaces des miroirs réflecteurs. Cependant, dans ce travail actuel, notre recherche a commencé par croire que le contrôle des dépôts de gouttes d'eau est l'acteur clé pour améliorer l'efficacité des centrales solaires.

Notre objectif dans cette partie de la thèse est de proposer toutes les solutions réalisables qui peuvent être mises en œuvre dans le projet NOOR pour diminuer la consommation d'eau dans le processus de nettoyage. De plus, trouver les additifs parfaits tels que les polymères, ou les

substances organiques qui peuvent augmenter en conséquence l'étalement de l'eau au contact des surfaces des miroirs réflecteurs.

La méthodologie suivie dans cette partie est la suivante; Dans la première partie, basée sur la théorie DLVO étendue (1940) pour expliquer la stabilité de la suspension colloïdale (eau distillée et additifs) [7], la tension superficielle de différents liquides a été déterminée à l'aide du modèle de Good van Oss [8]. L'une des approches pour calculer la tension superficielle d'un liquide et d'un mélange liquide-additif consiste à comparer leur travail d'adhésion. Ainsi, afin de comparer le comportement de l'eau distillée uniquement au contact des miroirs et d'un mélange d'eau distillée et d'un additif en contact avec les miroirs, nous calculons l'énergie libre de surface et le travail d'adhésion de chaque partie des éléments de comparaison.

Dans la deuxième partie, nous calculons les forces d'adhérence entre des liquides mélangés avec des miroirs réflecteurs pour connaître le frottement réel entre eux. Lorsque les valeurs des forces d'adhérence sont élevées, l'étalement des liquides de nettoyage est faible et lorsque les valeurs des forces d'adhésion sont faibles, l'étalement des liquides de nettoyage est élevé et on conclut que nous avons une bonne opération de lavage.

2. Procédures expérimentales

2.1 Composant de tension superficielle des liquides

La première étape était le calcul de la tension superficielle des trois principaux facteurs: eau distillée, additifs et miroir réflecteur. Les composants de tension superficielle de l'eau distillée et tous les additifs utilisés sont présentés dans le tableau suivante [9, 10].

Table. 5.1. Tension superficielle des liquides

Liquides	γ_L^{Tot} (mJ/m ²)	γ_L^{LW} (mJ/m ²)	γ_L^- (mJ/m ²)	γ_L^+ (mJ/m ²)
Eau distillée	72.56	21.6	25.4	25.4
Ghassoul Naturel	55.47	31.23	32.1	4.57
Cellulose acetate (CA)	43.5	39	22.2	0.3
Polyvinyl alcohol (PVOH)	42	42	37	0
Polyethylene oxide (PEO)	45,1	44,3	58	0,02

avec γ_L^{Tot} , γ_L^{LW} , γ_L^- et γ_L^+ sont respectivement la tension superficielle totale, le composant de Lifshitz – Van Der Waals, le composant de base de Lewis et le composant d'acide de Lewis.

2.2 Energie libre de surface de miroirs

L'énergie libre de surface des échantillons de miroirs utilisés à NOOR a été déterminée en utilisant la méthode Good van Oss à partir des angles de contact de trois liquides différents. Nous avons utilisé un analyseur de forme de goutte (DSA-100S) pour les mesures des angles de contact des miroirs en verre et de trois liquides différents de tension superficielle connue, y compris l'eau, le diiodométhane et les liquides d'éthylène glycol, les résultats sont présentés dans le tableau 5.2. Utilisation de Good Van Oss approche pour déterminer les composants de l'énergie libre de surface des échantillons de miroirs réflecteurs, les résultats sont présentés dans le tableau 5.3.

Table. 5.2. Valeurs d'angle de contact ($\pm 1^\circ$) sur le miroir commercial.

Échantillon	Angle du contact [$\pm 1^\circ$]		
	Eau	Ethylene Glycol	Diiodomethane
Miroir commercial	45.56°	36.16°	48.80°

Table. 5.3. Energie libre de surface du miroir commercial.

Échantillon	γ_s^{Tot} (mJ/m ²)	γ_s^{LW} (mJ/m ²)	γ_s^- (mJ/m ²)	γ_s^+ (mJ/m ²)
Miroir commercial	37.94	27.61	0.61	43.74

2.3 Travail d'adhésion

La deuxième étape a été le calcul du travail d'adhésion de la situation actuelle et de le comparer à la situation proposée; les calculs ont été effectués à l'aide du modèle de Van Oss [8]. Pour la situation actuelle, nous calculons le travail d'adhérence entre le miroir commercial et l'eau distillée. Le travail d'adhésion de deux éléments en contact a été calculé à l'aide de l'équation de Dupré:

$$\Delta W_{\text{SL}}^{\text{adhesion}} = \gamma_s + \gamma_L - \gamma_{\text{SL}} \quad (\text{V-1})$$

avec γ_S et γ_L sont l'énergie de surface des échantillons de miroirs réflecteurs et de l'eau distillée, et γ_{SL} est l'énergie libre de surface interfaciale entre eux. L'énergie libre de surface interfaciale est déterminée à l'aide de l'équation suivante:

$$\gamma_{SL} = \gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW} - 2\sqrt{\gamma_L^{LW} \gamma_S^{LW}} + 2(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_L^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} - \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+}) \quad (V-2)$$

Suite à la mesure de l'énergie libre de surface de l'échantillon de miroir et de la tension superficielle de l'eau distillée, le travail d'adhérence entre eux a été réalisé 123.53 mJ/m². La valeur positive signifie que l'énergie de surface de l'eau au contact du miroir est élevée. Par conséquent, l'eau ne se propage pas très bien à la surface des miroirs.

$$W_{SWL} = W_{SL} + W_{WW} - W_{SW} - W_{LW} = \gamma_{SW} + \gamma_{LW} - \gamma_{SL} \quad (V-3)$$

avec W_{SWL} le travail d'adhésion de trois éléments (S : Surface, W : Water, et L : Liquid).

De plus, afin de calculer le travail d'adhésion de notre solution proposée; le travail d'adhésion de miroirs échantillons avec mélange d'additif eau, nous optons pour l'utilisation du modèle de Van Oss et le travail du théorème d'adhésion mais cette fois-ci avec trois éléments (réflecteur + eau + additif liquide). Les résultats des travaux de calculs d'adhérence sont présentés dans le tableau 5.4.

Table. 5.4. Travail d'adhésion (trois phases).

Liquides	$\Delta W_{SWL}^{adhésion}$ (mJ/m ²)
Ghassoul Naturel	27.82
Cellulose acetate (CA)	39.16
Polyvinyl alcohol (PVOH)	48.07
Polyethylene oxide (PEO)	52.27

2.4 Tensioactif pour le nettoyage des panneaux solaires dans la littérature

En plus des additifs liquides proposés dans la section précédente, deux principaux tensioactifs sont proposés dans la littérature pour le nettoyage des panneaux solaires [3]. En général, deux types sont disponibles; liquides anioniques et cationiques mélangés à de l'eau. Le premier type proposé dans cette recherche est le Sulfate de Dodécylsulfate de Sodium SDS, et le second type est le Bromure de Cetyltriméthylammonium (CTAB).

Table. 5.5. Composants de tension superficielle des tensioactifs [11]

Liquides	γ_L^{Tot} (mJ/m ²)	γ_L^{LW} (mJ/m ²)	γ_L^- (mJ/m ²)	γ_L^+ (mJ/m ²)
Sodium Dodecyl Sulphate (SDS)	38.51	27.1	42.62	0.76
Cetyltrimethylammonium bromide	58.76	27.5	36.3	5.6

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la consommation d'eau dans le processus de nettoyage dans les régions arides est cruciale. Cependant, l'utilisation d'un système d'eau développé peut minimiser la quantité d'eau consommée ainsi que les prix du processus de nettoyage.

Table. 5.6. Travail adhesion des tensioactifs (trois phases).

Liquides	$\Delta W_{\text{SWL}}^{\text{adhesion}}$ (mJ/m ²)
Sodium Dodecyl Sulphate (SDS)	40.85
Cetyltrimethylammonium bromide	26.35

Sur la base de l'équation V-2 et de l'équation V-3, dans le tableau suivant, nous présentons les travaux de calculs d'adhérence de trois phases. L'eau distillée (phase un), l'échantillon de miroir solaire (phase deux) et le surfactant (phase trois).

III. Résultats et discussion

Le travail d'adhérence permet de comprendre l'étalement d'un liquide sur un autre liquide ou sur une surface. Ses résultats permettent de prédire si l'épandage liquide se répandrait spontanément ou non. Par conséquent, si la réaction à une perte nette d'énergie libre, elle sera spontanée. Ainsi, plus l'adhérence du travail est inférieure à zéro, plus le liquide est hautement étalable. Les additifs utilisés dans nos tests varient entre les polymères, les tensioactifs et l'argile. D'après les résultats obtenus, nous pouvons remarquer que les valeurs du travail total d'adhérence de l'additif-miroir d'eau varient entre des valeurs élevées et faibles. Ces valeurs peuvent être interprétées en les comparant à la valeur du travail d'adhésion de la situation actuelle ($\Delta W_{\text{SWL}}^{\text{adhesion}}_{(\text{water/surface})} = 123.53$). Tout d'abord, il faut rappeler que l'énergie d'adhérence montre un bon étalement lorsque le travail d'adhésion est le travail est inférieur à zéro puisque l'énergie est libérée lorsque deux frontières phase-vapeur comprimées sont

détruites et une frontière liquide-solide ou liquide-liquide est créé. Par conséquent, les faibles valeurs obtenues ($\Delta W_{SWL}^{adhesion} (water/NaturalGhassoul/surface) = 27.82$, $W_{SWL}^{adhesion} (water/CA/surface) = 39.16$, $\Delta W_{SWL}^{adhesion} (water/SDS/surface) = 40.85$, $\Delta W_{SWL}^{adhesion} (water/CeBr/surface) = 26.35$) signifie qu'il est fortement recommandé d'utiliser ces additifs pour diminuer la tension superficielle de l'eau, puis pour bien répandre l'eau. Cependant, les valeurs élevées obtenues pour le travail d'adhésion ($\Delta W_{SWL}^{adhesion} (water/PEO/surface) = 52.27$) et $\Delta W_{SWL}^{adhesion} (water/PVOH/surface) = 48.07$; signifie que ces additifs ne se répandront pas bien sur la surface, par conséquent, ils ne sont pas recommandés. La diminution de la tension superficielle de l'eau lors du mélange avec un additif s'explique par les interactions des parois de Van der Waals, la surface des miroirs à une tension superficielle de base très faible; cela signifie que la surface a un bien-être élevé pour attirer des charges positives. Cependant, tous les polymères et argiles (Ghassoul) choisis et recommandés sont caractérisés par le fait qu'ils contiennent à la fois un côté hydrophile (aimant l'eau), comme un anion acide, ($-CO^{2-}$ ou SO^{3-}) et un hydrophobe (eau haïr) côté; un côté contient des charges positives et l'autre des charges négatives. Par conséquent, une fois que la solution d'additif d'eau entre en contact avec la surface, son côté hydrophile (qui a un bien-être élevé pour donner des charges) est facilement et rapidement attiré par la surface (ce qui conduit la solution à bien se répandre en surface). Pour conclure, nous suggérons d'ajouter des additifs qui ont les mêmes propriétés que le Ghassoul naturel et l'acétate de cellulose (CA), car ces additifs sont ceux qui diminuent la tension superficielle de l'eau. Aussi, certains tensioactifs comme le Sodium Dodécyle Sulphate (SDS) et le Bromure de Cétyltriméthylammonium (CTAB) suggéraient d'être mélangés avec de l'eau pour diminuer la tension superficielle de l'eau et donc un bon étalement au contact des miroirs réflecteurs solaires.

Conclusion

Les centrales solaires à concentration sont l'une des technologies les plus avancées en termes de production d'électricité à partir de l'énergie solaire. Cependant, cette technologie est confrontée à de nombreux problèmes; l'un de leurs principaux problèmes est leur forte consommation d'eau dans leurs opérations quotidiennes[5]. Par conséquent, ce chapitre aborde cette question; l'optimisation de l'eau dans le processus de nettoyage des miroirs car la quantité d'eau utilisée dans ce processus est très visible. Notre solution suggérée s'explique par l'énergie d'adhésion car c'est une bonne mesure de la facilité avec laquelle un liquide mouille un autre liquide ou un solide. On opte donc pour comparer le travail d'adhérence de l'eau en mélange avec un additif et en contact avec des miroirs avec le travail d'adhésion de l'eau juste au contact des miroirs. Cette comparaison conduit à suggérer l'ajout d'additifs et de tensioactifs ayant les

mêmes propriétés que l'oxyde de polyéthylène (PEO), l'alcool polyvinylique (PVOH), le Ghassoul naturel, l'acétate de cellulose (CA), le sulfate de dodécyle de sodium (SDS) et le bromure de Cetyltriméthylammonium (CTAB); pour diminuer en conséquence la tension superficielle de l'eau, et donc un bon étalement au contact des miroirs solaires dans le processus de nettoyage.

Références

- [1] T. Sarver, A. Al-Qaraghuli, and L. L. Kazmerski, “A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 22, pp. 698–733, 2013.
- [2] L. Álvarez-Rodrigo, A. Fernández-García, J. M. Márquez-Payés, L. Martínez-Arcos, and R. Aguiar, “Study of Different Cleaning Methods for Solar Reflectors Used in CSP Plants,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 80–89, 2014.
- [3] Y. Jiang, L. Lu, A. R. Ferro, and G. Ahmadi, “Analyzing wind cleaning process on the accumulated dust on solar photovoltaic (PV) modules on flat surfaces,” *Sol. Energy*, pp. 1–6, 2017.
- [4] Z. Aqachmar, A. Allouhi, A. Jamil, B. Gagouch, and T. Kousksou, “Parabolic trough solar thermal power plant Noor I in Morocco,” *Energy*, vol. 128, pp. 572–584, 2019.
- [5] B. F. Mohamed Soufiane and S. Abderafi, “Water consumption analysis of Moroccan concentrating solar power station,” *Sol. Energy*, vol. 172, Part, pp. 146–151, 2018.
- [6] C. Three, H. Constants, M. E. Distance, T. N. I. Surfaces, C. Materials, and P. I. Energies, “The Extended DLVO Theory,” *Interface Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 31–48, 2008.
- [7] N. V Churaev, “The DLVO theory in Russian colloid science,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 83, pp. 19–32, 1999.
- [8] P. C. Rieke, “Application of Van Oss-Chaudhury-Good theory of wettability to interpretation of interracial free energies of heterogeneous nucleation,” vol. 8, 1997.
- [9] B. Ja and T. Bialopiotrowicz, “The Components of Surface Tension of Liquids and Their Usefulness in Determinations of Surface Free Energy of Solids,” *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 127, no. 1, pp. 59–66, 1989.
- [10] A. Khaldoun *et al.*, “Influence of heavy metals adsorption on the surface-energy properties of fluorinated montmorillonite clays ‘Rassoul,’” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 290, pp. 1–6, 2006.
- [11] L. D. L. B.V. Derjaguin, “Theory of stability of highly charged lyophobic sols and adhesion of highly charged particles in solutions of electrolytes,” *Acta Physicochim*, vol. USSR 14, pp. 633–652, 1941.

Chapitre VI: Implémentation d'un microscope de salissures extérieur pour les investigations sur les dépôts de salissures sur les surfaces des miroirs solaires

I. Introduction

Sauver notre planète du changement climatique en réduisant les émissions de CO₂ est l'un des objectifs de l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier des panneaux solaires photovoltaïques et des miroirs solaires à concentration [1]. Dans la région MENA (Middle East and North Africa), où les énergies non renouvelables ne souffrent pas durablement d'une consommation d'énergie élevée [2]. Cependant, les énergies renouvelables comme l'énergie solaire sont une solution appropriée pour réduire la consommation élevée et diminuer le pourcentage d'émissions de gaz à effet de serre.

Pour les centrales solaires, les régions désertiques sont considérées comme les appropriés pour l'installation des centrales solaires à concentration en raison de leur forte irradiance solaire. Au Maroc, et exactement à Ouarzazate, il existe l'une des plus grandes centrales solaires au monde appelée «NOOR Ouarzazate». NOOR signifie lumière du soleil qui caractérise la région d'Ouarzazate (5470 Wh/m²/jour) [3]. Néanmoins, dans cet environnement d'exploitation qui connaît des conditions météorologiques difficiles telles que la poussière et les tempêtes et, par conséquent, ces conditions environnementales peuvent menacer l'efficacité et la puissance de sortie des systèmes solaires [4]. En effet, selon Wakim et al. [5], qui mènent des recherches sur l'effet des particules de poussière sur les panneaux photovoltaïques, la dégradation peut atteindre 17% pendant une durée de 6 jours sans aucun nettoyage.

Selon les revues de la littérature, des études menées sur le fait que le mécanisme de salissure est un phénomène très complexe qu'il est très difficile de quantifier et de prévoir son effet sur les systèmes solaires. En général, le terme de poussière est défini comme toute particule de moins de 500 µm de diamètre [6]. Mais, la saleté fait référence à toute accumulation de poussière ou de saleté sur la surface des panneaux solaires qui provoque une forte perturbation de la réflectance de l'irradiance solaire pour les miroirs ou de la transmittance de l'irradiance solaire pour les cellules solaires PV.

Selon les travaux précédents [7], le taux de poussière des échantillons solaires a été mesuré par le logiciel ImageJ à partir d'un microscope de salissures extérieur. Le microscope de salissures extérieur a mesuré le dépôt et l'élimination des particules de poussière de plus de 10 micromètres. De plus, le taux de salissure sur les surfaces des miroirs solaires dépend de facteurs environnementaux tels que la vitesse du vent, l'humidité. Par conséquent, les résultats d'ImageJ ont été corrélés avec les paramètres des conditions météorologiques.

Chapitre VI

Dans les chapitres précédents, nous évaluons l'influence de la salissure sur les miroirs réflecteurs par deux méthodes, par la théorie de DLVO dans le chapitre III et aussi par calculs des forces d'adhérence dans le chapitre IV. De plus, afin d'améliorer les résultats obtenus dans les chapitres précédents, il est nécessaire de trouver une méthode efficace pour évaluer l'effet du salisseur en temps réel et aussi prédire le pourcentage de poussière accumulée sur les surfaces des miroirs solaires dans les régions potentielles pour l'installation des centrales solaires à concentration. Par conséquent, dans ce présent chapitre, nous avons mené une recherche pour quantifier les données de particules de poussière, et corréliser cette quantification à la caractéristique des conditions météorologiques comme la vitesse du vent, la température, l'humidité et irradiation normale directe. Basé sur un microscope extérieur des salissures couplé à une Raspberry Pi3 pour connecter la caméra du microscope à l'ordinateur et par conséquent e l'évaluation du dépôt et de la remise en suspension des particules de poussière.

Dans cette partie, en conditions réelles, nous avons collecté des données au cours des deux saisons printemps et été. Cependant, nous utilisons un réseau de neurones artificiels (RNA) pour analyser deux variables : le pourcentage de dépôt de poussière comme variable dépendante et les paramètres météorologiques comme paramètres indépendants. La valeur ajoutée de ce travail, est la prédiction du dépôt de poussière et de la remise en suspension en fournissant uniquement les conditions météorologiques dans certaines régions potentielles des centrales solaires CSC ou PV. Par conséquent, en améliorant le processus de nettoyage des centrales solaires en connaissant le taux de dépôt de poussière réel dans des conditions météorologiques réelles.

Dans la littérature [7, 8], il existe de nombreuses méthodes d'apprentissage automatique pour prédire le pourcentage de poussière, telles que les machines à vecteurs de support (MVS), régression linéaire multiple (RLM) et réseau neuronal artificiel (RNA).

Dans ce travail, suite à nos précédents travaux sur l'adhérence des particules de poussière et les forces d'adhésion entre la poussière et les surfaces des miroirs solaires, nous concluons les paramètres environnementaux affectant le pourcentage d'adhérence et d'accumulation de poussière. Dans ce contexte, l'objectif principal de cette partie de la thèse est de développer un microscope extérieur des salissures capable de mesurer le dépôt et la remise en suspension des particules de poussière en temps réel. Cette recherche est organisée en deux grandes parties; la première partie de cette recherche est le développement d'un microscope extérieur des salissures pour prendre les photos de l'échantillon déposé en plein air dans l'université Al Akhawayn à

Ifrane. Les images microscopiques seront traitées automatiquement par un algorithme d'analyse d'image et couplé à Raspberry Pi3. Le Raspberry Pi3 est un outil utilisé pour connecter la caméra du microscope à l'ordinateur pour l'évaluation du dépôt et de la remise en suspension des particules de poussière. Étant donné que le microscope est connecté à une lentille de caméra de haute qualité, le bureau Raspbian fournit un dépistage en direct pour le microscope. Du microscope, les images de particules de sable et de poussière jusqu'à une taille de 1 μm seront visibles. Cependant, les paramètres de sortie de l'algorithme doivent être la distribution granulométrique des particules présentes dans le champ de vision du microscope au moment de la mesure. La deuxième phase de cette recherche consiste à corréliser les paramètres de sortie de l'algorithme aux paramètres environnementaux tels que la vitesse du vent, la température, l'humidité.

Les données expérimentales sont utilisées pour nous aider à déterminer le pourcentage d'accumulation de poussière basé sur le réseau neuronal artificiel RNA en fournissant uniquement les paramètres de données météorologiques. Par conséquent, concluez sur le meilleur processus et les meilleurs cycles de nettoyage en connaissant le taux de dépôt de poussière sur les miroirs solaires en temps réel.

II. Expérimental et Procédures

1. Microscope de salissure extérieur

Le microscope de salissures d'extérieur a été développé par l'institut de recherche sur l'environnement et l'énergie du Qatar [9], comprenant un petit microscope numérique de faible puissance connecté à un Raspberry Pi3 (Fig. 6.1). Le microscope comprend une lame de verre d'une surface de 4,40 mm^2 en tant que surface de collecte de salissures et la résolution des images capturées était de 0,935 $\mu\text{m}/\text{pixel}$.



Fig. 6.1. *Microscope de Salissure Extérieure (MSE)*

2. Collecte de données

Dans un premier temps, les images des échantillons ont été capturées à partir du microscope de salissures extérieur toutes les 10 minutes, puis enregistrées dans le Raspberry Pi3. Dans un deuxième temps, les données d'images seront extraites du Raspberry Pi3 et transférées vers le logiciel ImageJ [10]. Ensuite, les images seront ajustées de 280x1024 pixels à 318x254 pixels pour être compatibles avec le logiciel ImageJ. Le traitement dans le logiciel ImageJ est décrit en quatre étapes; seuil noir et blanc, seuil de couleur, bassin versant binaire et nombres de particules. Ainsi, le logiciel ImageJ est capable de calculer le pourcentage d'accumulation de poussière à la surface de chaque image de l'échantillon en comptant le nombre de particules de poussière déposées toutes les 10 minutes. La figure 6.2 illustre la configuration schématique de cette recherche du microscope de salissures en plein air à l'analyse Raspberry Pi3.

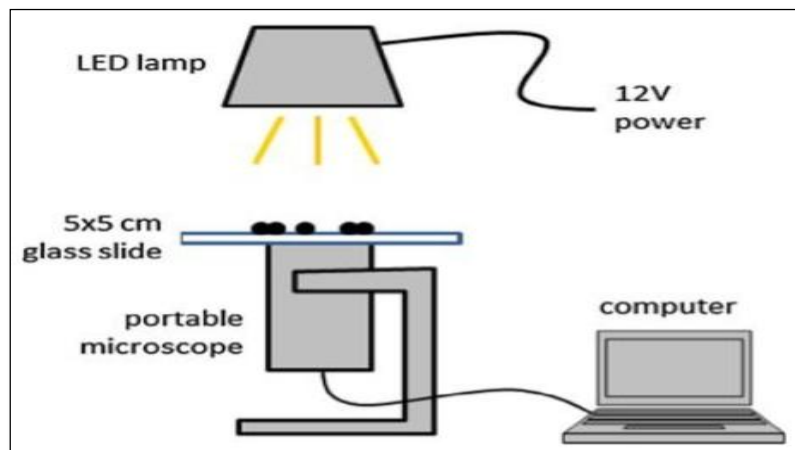


Fig. 6.2. Configuration schématique de l'analyse ImageJ avec le microscope de salissures extérieure

3. Développement et analyse de réseaux neuronaux artificiels (RNA)

Après le traitement des images sur le logiciel ImageJ; les images seront transférées sur un réseau neuronal artificiel. Donc, en conditions réelles et en fonction des paramètres météorologiques et du pourcentage de dépôt de poussière pendant deux saisons, printemps et été; un modèle dans le réseau neuronal artificiel (RNA) de type PMC (perceptron multicouche) a été développé pour prédire le dépôt et l'accumulation de poussière. Le modèle développé dans le réseau neuronal artificiel comporte deux variables; les entrées sont les conditions des paramètres météorologiques et la sortie est le pourcentage d'accumulation de poussière. Le réseau neuronal artificiel (RNA) de type PMC est organisé de manière que les informations circule de la couche

d'entrée vers la couche de sortie uniquement ; donc un réseau de propagation direct (feedforward).

3.1 Présentation des réseaux de neurones artificiels (RNA)

Selon la littérature [11, 12], le réseau de neurones artificiels (RNA) est un apprentissage automatique visant à réaliser un modèle simple inspiré du cerveau humain. Les RNA sont des modèles de calcul capables d'effectuer certains calculs basés sur les interconnexions entre les neurones. La valeur ajoutée de la machine à réseaux de neurones artificiels est la modélisation et l'optimisation des applications des systèmes d'ingénierie [13]. Comme illustré sur la figure 6.3, le modèle neuronal consiste en un groupe de liens de connexion appelés neurones de manière à échanger la communication entre eux. L'RNA comprend trois couches principales [14, 15]: la couche d'entrée (x_i), la couche cachée (h_i) et les couches de sortie (η_i).

La première couche est la couche d'entrée (x_i) qui implique dans nos cas l'étude des paramètres météorologiques (dont quatre entrées: vitesse du vent, humidité, température et point de rosée); selon les valeurs représentant le pourcentage de poussières accumulées en terme de chaque paramètre des paramètres météorologiques (T_i) avec $x_i = [D_i, T_i]$ ($i=1, \dots, n$). La deuxième couche est la couche cachée (h_i): qui utilise la fonction d'activation des neurones cachés pour effectuer une transformation sur l'entrée reçue, afin de garder les valeurs dans une plage gérable et pour indiquer la sortie de chaque couche cachée en fonction des entrées reçues . La troisième couche (η_i) est la couche de sortie qui obtient les informations déjà traitées et entraînées pour donner l'efficacité du modèle en utilisant l'équation suivante:

$$\eta_i = \sum_{h=1}^{H_h} \beta_h G(\overrightarrow{w}_h \overrightarrow{x}_i + \mathbf{b}_h) \quad (\text{VI-1})$$

avec \overrightarrow{w}_h est le vecteur de poids d'entrée qui relie les entrées de chaque neurone caché, \mathbf{b}_h est le biais d'entrée de chaque neurone caché, et β_h est un vecteur de poids de sortie qui relie les résultats de chaque neurone caché au neurone de sortie. Tous sont les paramètres internes du réseau neuronal artificiel et $G(\overrightarrow{w}_h \overrightarrow{x}_i + \mathbf{b}_h)$ est le neurone caché de la fonction d'activation.

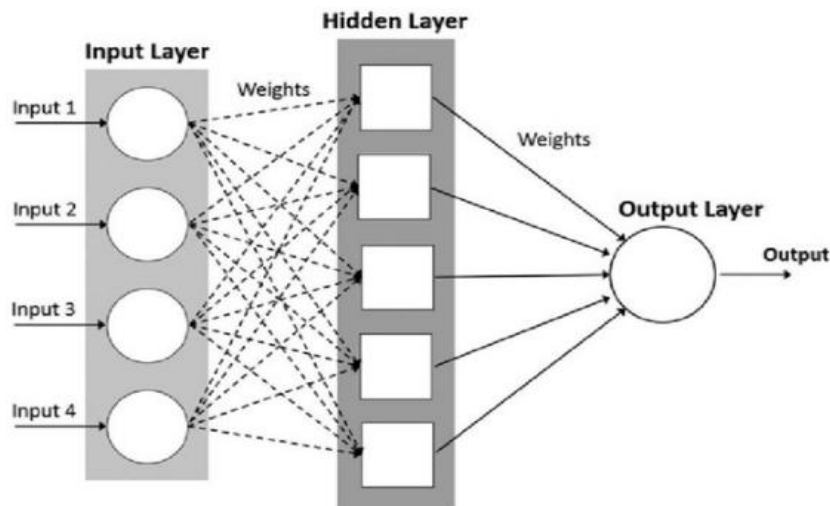


Fig. 6.3. Structure de RNA avec quatre entrées, un calque caché et une sortie

Dans la littérature, Il y a plusieurs types de fonctions de transfert qui peuvent être utilisés dans les réseaux neuronaux artificiels, tels que; la fonction sigmoïde, fonction Heaviside, fonction tangente hyperbolique, fonction gaussienne, etc. Dans cette partie de thèse on choisit la fonction non linéaire sigmoïde comme fonction d'activation. Car, contrairement à la fonction sigmoïde, les autres fonctions donnent seulement une sortie binaire ce qui rend plus difficile à estimer les poids optimaux.

3.2 Prétraitement des données

Pour analyser la qualité des données des paramètres d'entrée aux paramètres de sortie, il est nécessaire d'effectuer un prétraitement des données pour réduire les erreurs fournies par les mesures. Il est donc important de mettre les mesures en fonction des pourcentages de poussière fournis par le logiciel ImageJ. Ensuite, les paramètres d'entrée avec des valeurs manquantes sont supprimés. Sur la base du programme développé, les données sont traitées de manière similaire et les valeurs mesurées seront régulées et transformées en une taille commune par la procédure de normalisation.

3.3 Ensembles de test et de validation

Dans cette étape, avant d'exécuter le réseau, les données d'entrée et de sortie qui ont été précédemment normalisées et regroupées en trois catégories: ensembles de formation, de test et de validation. Les ensembles de données d'apprentissage sont présentés au réseau pendant l'apprentissage et le réseau est ajusté en fonction de son erreur. Plus le pourcentage que nous accordons à l'étape de formation est élevé, plus les données sont entraînées et plus le modèle est précis.

Les ensembles de test n'ont aucun effet sur la modélisation du RNA et fournissent ainsi une mesure indépendante des performances du réseau pendant et après la formation. Il varie généralement de 10% à 30%. L'ensemble de validation utilisé pour mesurer la généralisation du réseau et pour interrompre la formation lorsque la généralisation cesse de s'améliorer. Cet ensemble final donne des observations sur la formation et les tests. Dans ce modèle, nous avons utilisé une fourchette de 70%, pour la formation, 15% pour le test et 15% pour la validation du réseau.

3.4 Formation du RNA et prédiction

La figure 6.4 montre l'architecture du modèle conçu dans MATLAB. Une sortie (pourcentage de poussière) et quatre entrées ont été implantées; température, point de rosée, humidité et vitesse du vent. Tous les paramètres sont interdépendants dans un système mathématique formalisé complexe. Les poids sont déterminés sur la base de l'outil MATLAB. Ensuite, basé sur un processus de réseaux de neurones dynamiques; le diagramme de la figure montre comment les paramètres d'entrée, de couches cachées et de sortie sont liés d'une manière adéquate développée par le processus de complexité du réseau neuronal.

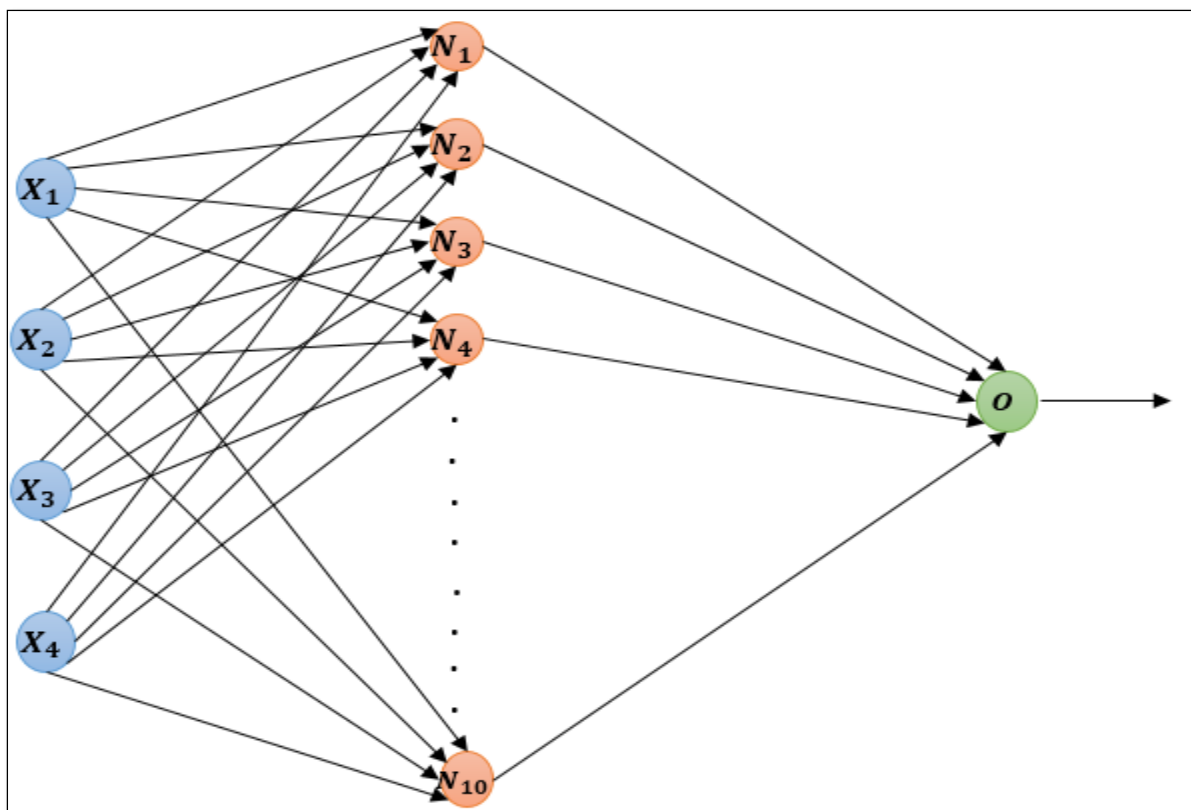


Fig. 6.4. Schéma de l'RNA avec quatre entrées et une sortie

avec X_1 , X_2 , X_3 et X_4 représente respectivement : la température, point de rosée, humidité et vitesse du vent.

III. Résultats et discussion

Dans cette partie de thèse, en conditions réelles, nous avons collecté des données au cours des deux saisons printemps et été. Cependant, sur la base de la machine RNA, deux types de variables sont implantés; le pourcentage de dépôt de poussière comme variable dépendante et les paramètres météorologiques comme paramètres indépendants. Par conséquent, après avoir exécuté le modèle RNA, les résultats ont démontré différents aspects du traitement du réseau neuronal, y compris les algorithmes et le processus qui nous permettraient d'analyser et d'interpréter les résultats. Tout d'abord, comme illustré dans la figure suivante; les algorithmes ont été divisés en quatre groupes principaux. La division des données était aléatoire car nous n'avons pas de classification spécifique des données; ceci est pertinent pour réduire les bruits des nombreuses données saisies, l'apprentissage était basé sur le modèle de Levenberg-Marquardt, et la performance a été évaluée sur la base de l'erreur quadratique moyenne MSE. De plus, le résultat a également fourni le nombre d'itérations, le temps et la performance.

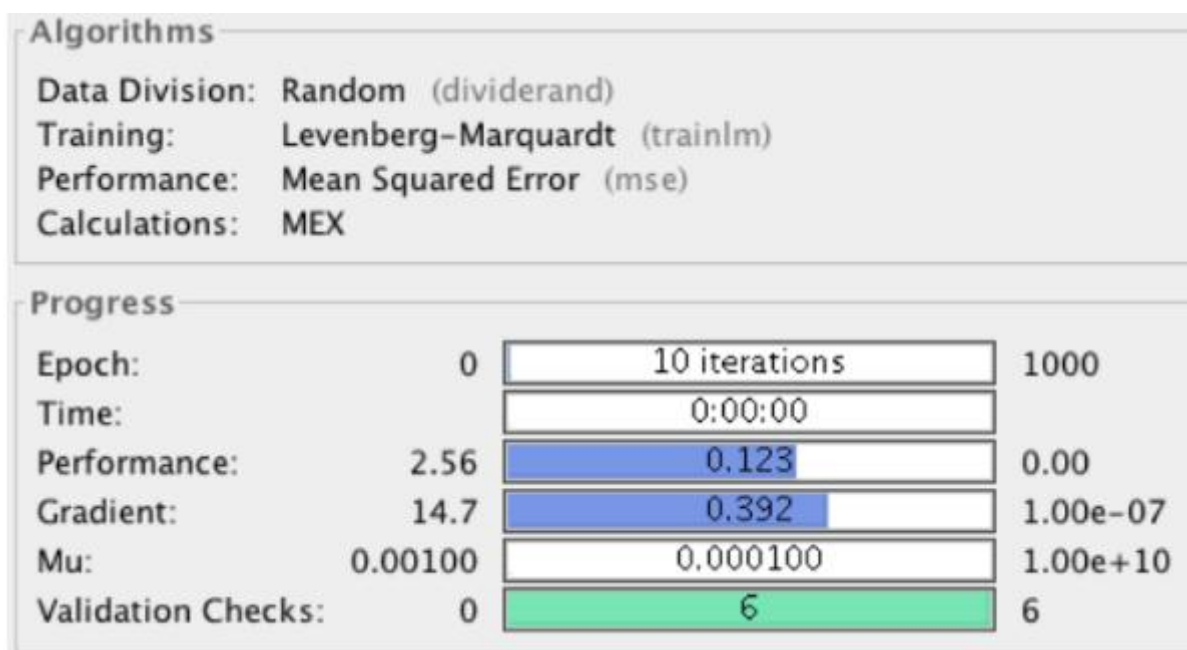


Fig. 6.5. Résultat de l'RNA dans MATLAB

1. Analyse des performances du RNA

Dans un premier temps, afin d'atteindre la meilleure modélisation de la prédiction du pourcentage de poussière, un code a été développé et généré dans MATLAB. Comme le montre la figure 6.5, les meilleurs résultats ont été indiqués en corrélation avec la performance moyenne de l'entraînement et les erreurs de test ainsi que la quantité d'époque d'entraînement. Le graphique montre que lorsque les pondérations sont améliorées, les valeurs élevées du réseau

se réduisent à une valeur moindre. Cette dernière est appelée «formation réseau». L'entraînement s'est principalement arrêté sur la base de la minimisation adaptative du poids à 10 époques. De plus, si l'une des trois lignes (Formation, Validation et Test) se croise ou passe près de la meilleure ligne, cela signifie que la convergence a été satisfaite, si ce n'est pas le cas, le recyclage du modèle est nécessaire. Dans notre cas, la ligne de validation passe par les meilleures lignes donc, la convergence a été faite et pas besoin de recycler le modèle.

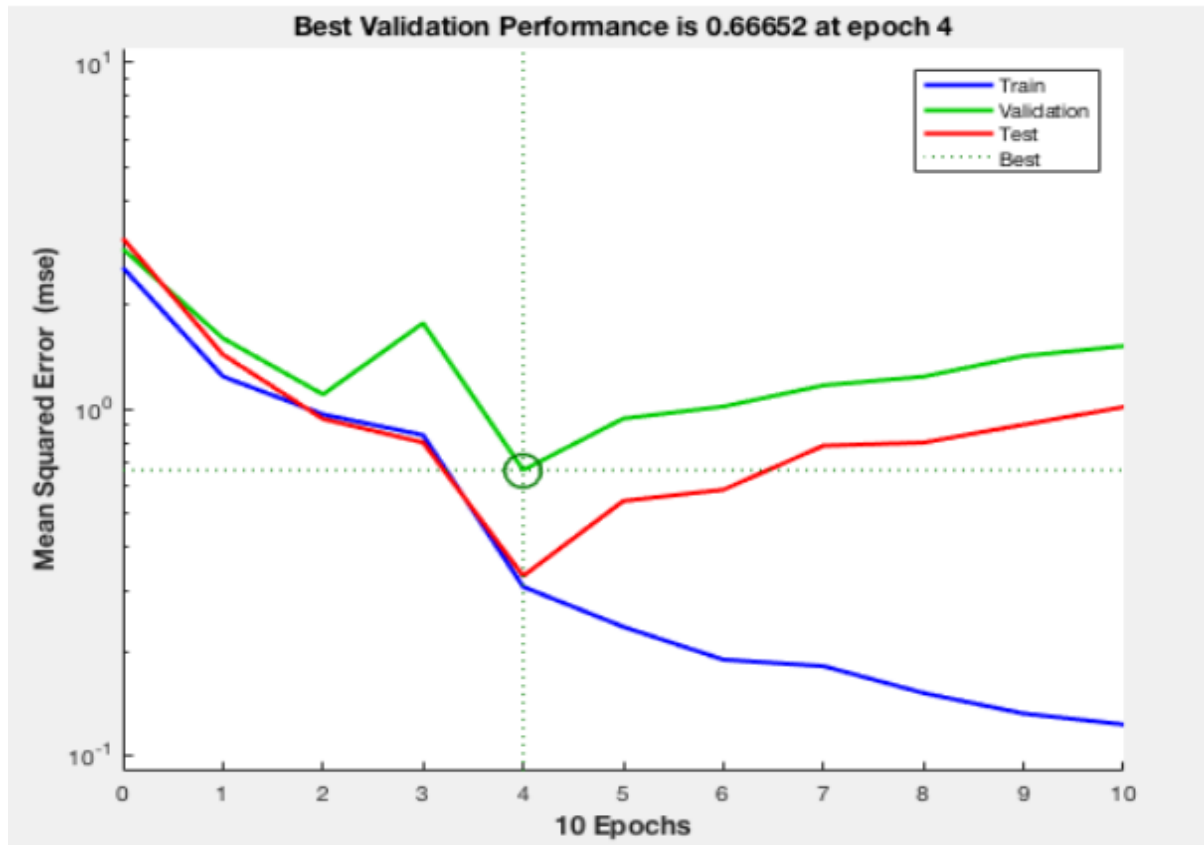


Fig. 6.6. *Tracé de régression.*

De plus, afin de conclure sur la satisfaction de la structure RNA, l'analyse de régression pour le modèle optimal RNA est présentée dans la figure 6.7.

Dans la figure 6.7, les valeurs R pour tous les graphiques sont proches de un (0,75207 à 0,86251), les cercles représentent les points de données et la ligne d'ajustement est le meilleur ajustement entre les cibles et les sorties.

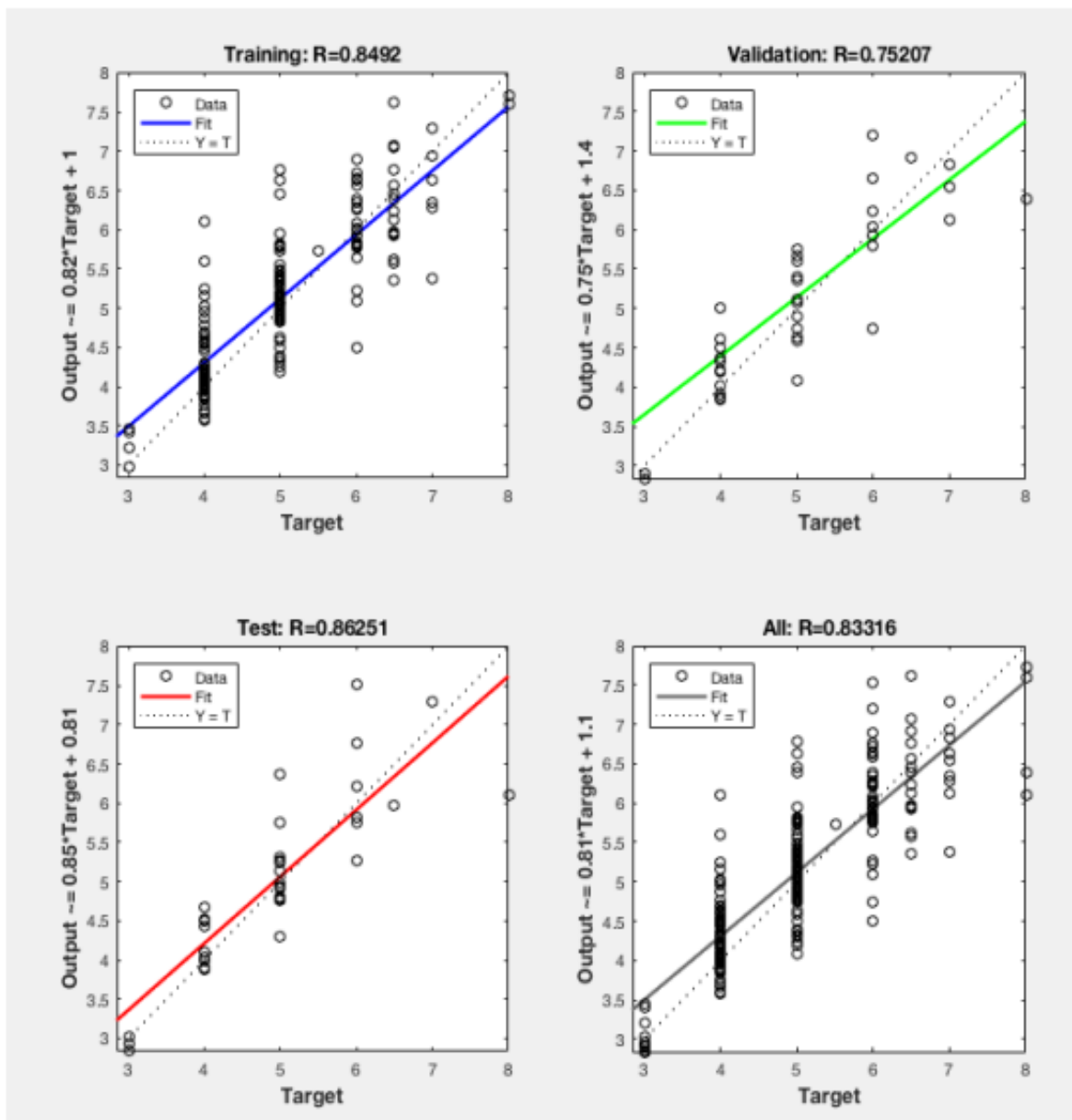


Fig. 6.7. Analyse de régression avec la formation, test et validation du RNA optimal

2. Analyse des performances de prédiction

Les figures suivantes présentent les performances de prédiction du modèle NARX en analysant la réponse en série chronologique, l'autocorrélation d'erreur et le croisement des erreurs d'entrée. Sur la figure 6.8, la réponse de la série chronologique présente les entrées, les cibles en fonction du temps, et peut définir quels moments ont été choisis pour l'apprentissage, les tests, l'autocorrélation et le croisement des erreurs d'entrée.

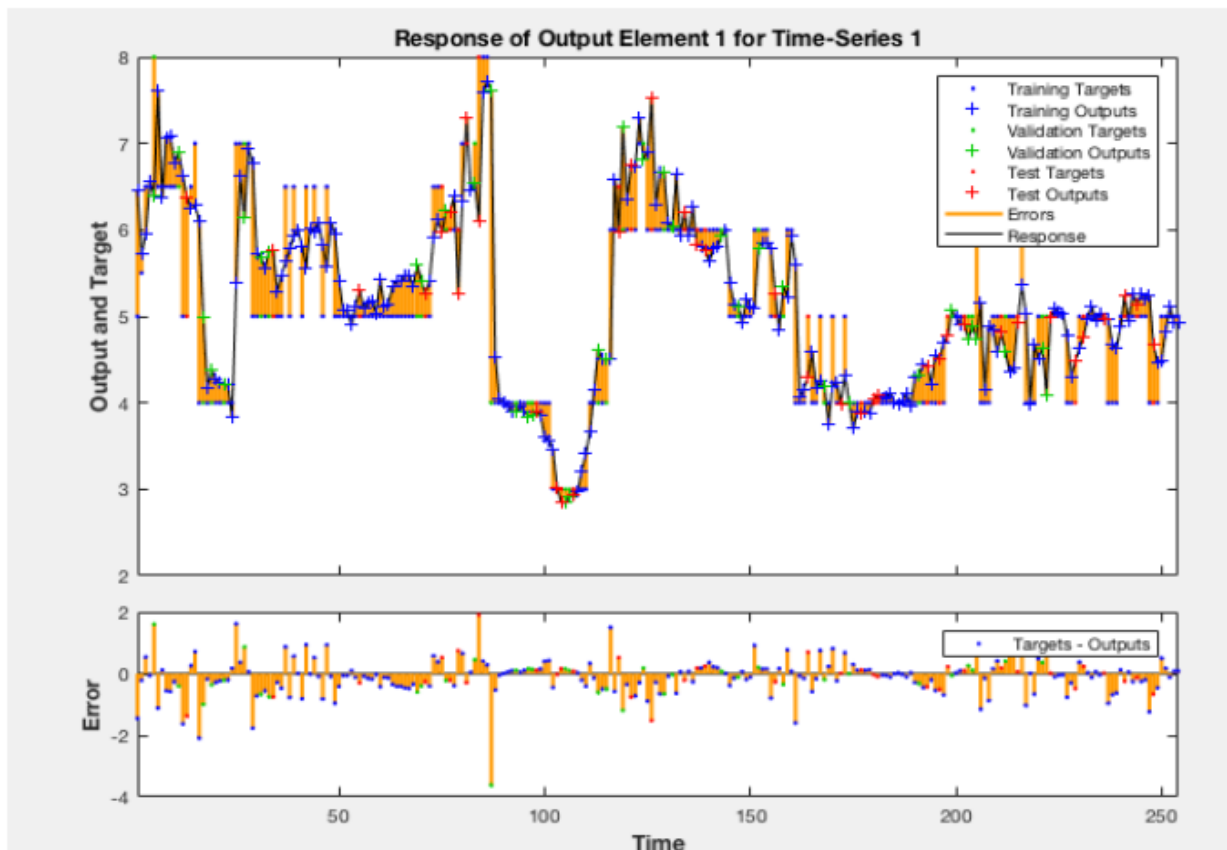


Fig. 6.8. Réponse de l'élément de sortie 1 pour la série temporelle 1

En outre, les figures 6.9 et 6.10 montrent comment les erreurs sont corrélées avec la séquence d'entrées. Un modèle de prédiction parfait est caractérisé par le fait que toutes les corrélations doivent se situer dans les limites de confiance définies par MATLAB autour de zéro.

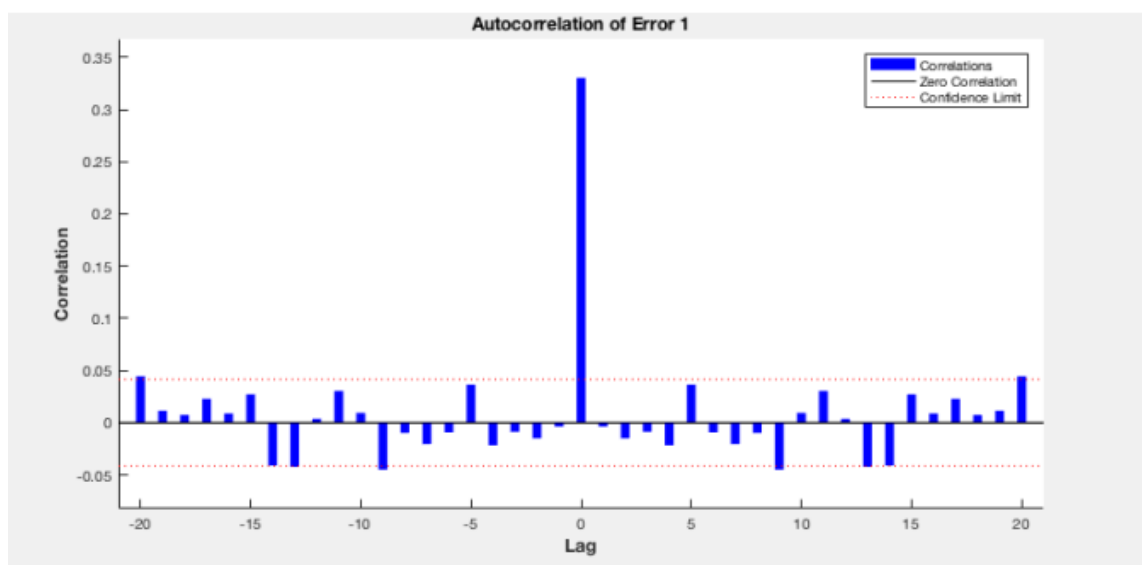


Fig. 6.9. Autocorrélation et analyse des performances de prédiction du modèle NARX.

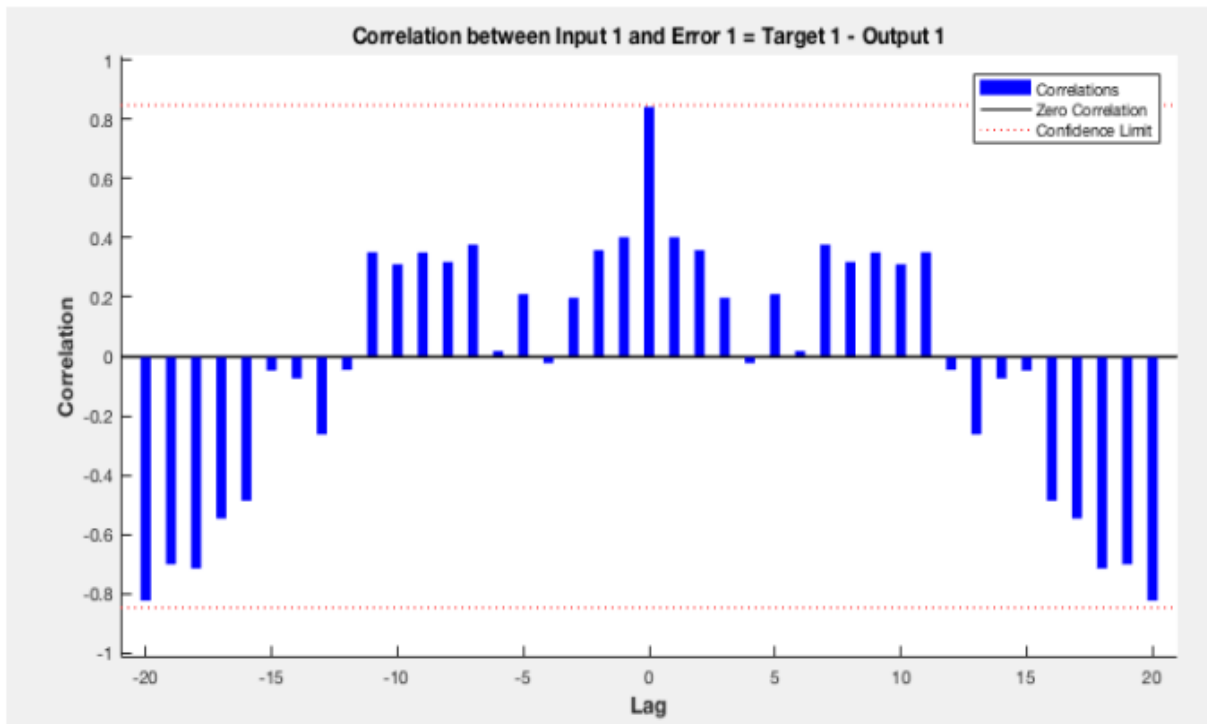


Fig. 6.10. Analyse des performances de prédiction du modèle NARX

Dans notre modèle, toutes les corrélations se situent légèrement dans l'intervalle de confiance. Cette remarque propose que le NARX du RNA formé avec l'algorithme de formation «Levenberg-Marquardt» est efficace pour prédire les pourcentages de poussière en fonction des conditions météorologiques.

3. Prédiction de modèle

Après avoir analysé les performances d'entraînement et les performances de prédiction de la machine du réseau neuronal artificiel. Nous avons tracé les données d'entrée cibles et les données prédites afin de pouvoir extraire les prédictions et en même temps voir si les prédictions sont proches des valeurs réelles.

La figure suivante montre que les données cibles d'entrée sont légèrement proches des prédictions générées par le code MATLAB.

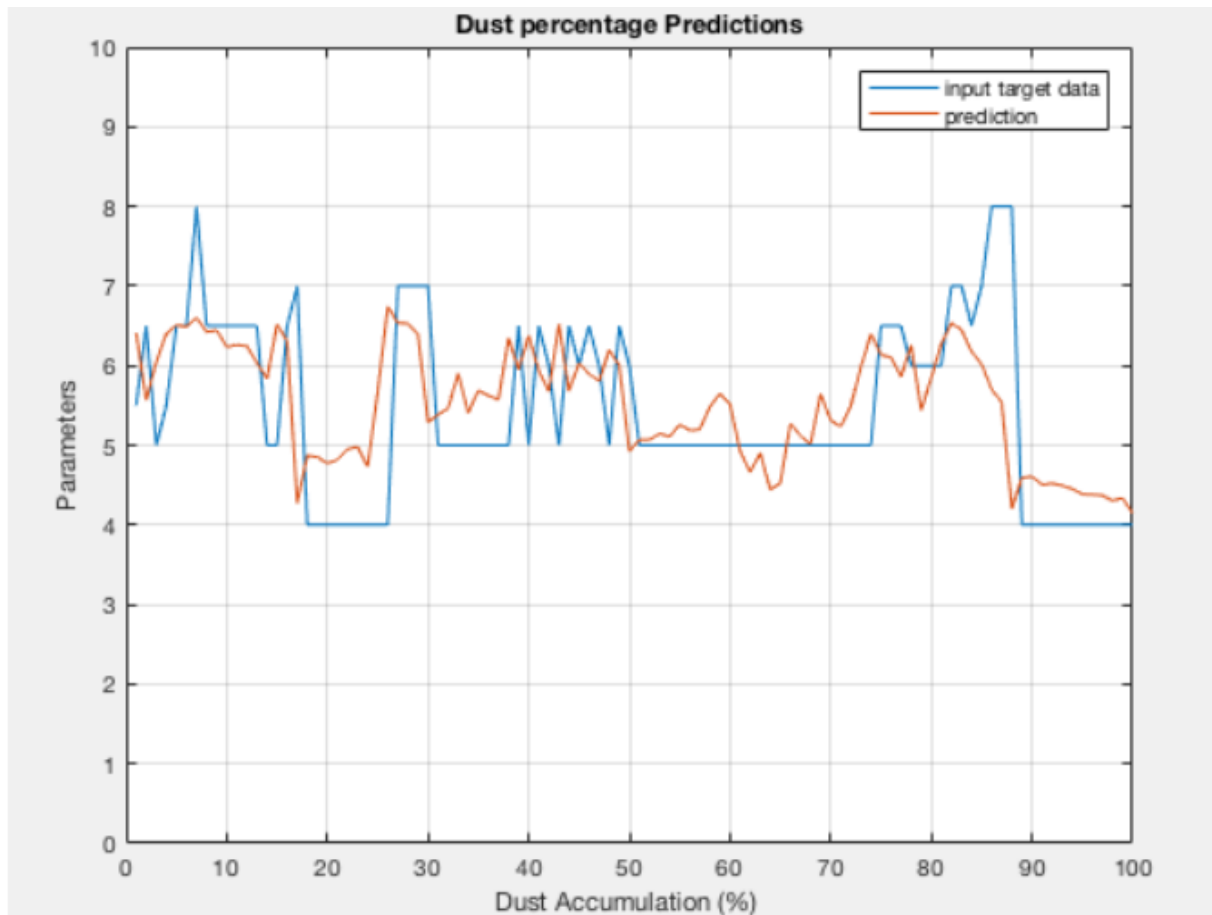


Fig. 6.11. *Prédictions de l'accumulation de poussière*

Par conséquent, nous pouvons conclure que le modèle RNA était assez précis et performant de manière à prédire l'accumulation de poussière en fonction des conditions des paramètres météorologiques.

Conclusion

Le Maroc a lancé des centrales solaires sophistiquées. Cependant, l'efficacité, la durée de vie et le rendement des technologies CSC et PV doivent être maintenus. Dans cette partie de la thèse, en collaboration avec le DLR Center en Espagne; nous menons des recherches sur la façon de prédire les valeurs futures des pourcentages de poussière accumulés à la surface des centrales CSC et PV afin de pouvoir concevoir des outils et des méthodes de nettoyage de manière appropriée. Sur la base de la microscopie des salissures en extérieur MSE pour prendre des images des surfaces et du logiciel ImageJ, le taux de poussière des échantillons solaires a été mesuré et l'MSE a mesuré le dépôt et l'élimination des particules de poussière de plus de 10 micromètres en temps réel. Les résultats ont été corrélés avec les paramètres des conditions météorologiques. Ensuite, un modèle RNA a été développé dans MATLAB pour prédire les

valeurs futures des pourcentages de poussière compte tenu des conditions météorologiques de certaines régions potentielles des centrales solaires. Les performances de notre modèle ont été testées à l'aide de l'algorithme NARX Levenberg Marquardt pour identifier le lien entre les données d'entrée et de sortie et ainsi prédire avec précision les pourcentages de poussière sur les surfaces. Par conséquent, nous concluons dans cette partie que l'RNA a montrée de bons résultats pour la prédiction du pourcentage de poussière (Fig. 6.11).

Références

- [1] K. K. Ilse, B. W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, and J. Bagdahn, “Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, pp. 239–254, 2018.
- [2] A. Juaidi, “Solar Reflector Materials Degradation Due to the Sand Deposited on the Backside Protective Paints,” *Energies*, vol. 11, no. 808, pp. 1–20, 2018.
- [3] A. EL Baraka, H. Ennaceri, A. Ennaoui, A. Ghennioui, A. Jorio, and A. Khaldoun, “A novel approach to evaluate soiling adhesion on the surface of CSP reflectors via extended DLVO theory,” *Appl. Phys. A*, vol. 125, pp. 1–8, 2019.
- [4] R. Cantoni and K. Rignall, “Energy Research & Social Science Kingdom of the Sun : a critical, multiscalar analysis of Morocco’s solar energy strategy,” *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 51, pp. 20–31, 2019.
- [5] Y. N. Chanchangi, A. Ghosh, S. Sundaram, and T. K. Mallick, “Dust and PV Performance in Nigeria : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 121, p. 109704, 2020.
- [6] Z. Ahmed, H. A. Kazem, K. Sopian, M. A. Al-goul, and H. Alawadhi, “Effect of dust pollutant type on photovoltaic performance,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 735–744, 2015.
- [7] S. Guo *et al.*, “A novel approach for prediction of vitamin D status using support vector regression,” *PLoS One*, vol. 8, no. 11, 2013.
- [8] Y. Khaledian and B. A. Miller, “Selecting appropriate machine learning methods for digital soil mapping,” *Appl. Math. Model.*, vol. 81, pp. 401–418, 2020.
- [9] B. Figgis, A. Ennaoui, B. Guo, W. Javed, and E. Chen, “Outdoor soiling microscope for measuring particle deposition and resuspension,” *Sol. Energy*, vol. 137, pp. 158–164, 2016.
- [10] R. Lind, “Open source software for image processing and analysis: picture this with ImageJ,” in *Open Source Software in Life Science Research*, Woodhead Publishing Limited, pp. 131–149, 2012.
- [11] J. Zou, Y. Han, and S. So, “Overview of Artificial Neural Networks,” in *Humana Press*, vol. 458, pp. 15–23, 2008.
- [12] L. Vanneschi, M. Castelli, N. Ims, and U. N. De Lisboa, “Multilayer Perceptrons,” in *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology*, pp. 612–620, 2018.
- [13] A. H. Elsheikh, S. W. Sharshir, M. Abd, and A. E. Kabeel, “Modeling of solar energy systems using artificial neural network : A comprehensive review,” vol. 180, pp. 622–639, 2019.
- [14] S. Al-dahidi, O. Ayadi, M. Alrbai, and J. Adeeb, “Ensemble Approach of Optimized Artificial Neural Networks for Solar Photovoltaic Power Prediction,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 81741–81758, 2019.

- [15] G. Newman *et al.*, “Using the land transformation model to forecast vacant land Using the land transformation model to forecast vacant land,” *J. Land Use Sci.*, vol. 4248, pp. 1–26, 2016.

Conclusions & Recommendations

L'encrassement des surfaces des miroirs réflecteurs est un défi majeur pour la durabilité et l'efficacité des centrales solaires à concentration. En outre, dans les régions désertiques, l'environnement approprié pour l'installation des centrales solaires à concentration, une diminution de la réflectance spéculaire des miroirs peut sérieusement affecter l'efficacité des miroirs réflecteurs. Dans ce travail, nos recherches se concentrent sur la compréhension du mécanisme d'adhérence de la poussière sur les surfaces des miroirs réflecteurs, puis sur la recherche de nouvelles solutions pouvant être mises en œuvre dans les centrales solaires à concentration pour diminuer la consommation d'eau lors du lavage des miroirs réflecteurs. Pour conclure, les principales contributions de notre recherche sont les suivantes: la première contribution de ce travail est d'évaluer l'adhérence de la poussière à la surface des miroirs sur la base de la théorie DLVO étendue. Dans ce contexte, les approches suivies aux recherches précédentes pour évaluation de l'adhérence des poussières sur les surfaces solaires sont superficielles, peu efficaces et prennent du temps, dans notre contribution, l'adhérence de la poussière a été évaluée expérimentalement par le calcul de l'énergie libre de surface (ELS) des particules de poussière et aussi l'ELS des miroirs réflecteurs. Les types de minéraux argileux formant les particules de poussière ont également été étudiés pour connaître les types d'argiles gonflantes affectées à la surface des miroirs. Deuxièmement, nous évaluons les forces d'adhérence entre les particules de poussière et les miroirs commerciaux disponibles implémentés dans la centrale solaire NOOR à Ouarzazate. Dans cette partie, une bonne relation a été établie entre les compositions de particules de poussière et les conditions météorologiques des régions avec les types de forces d'adhérence, soit des forces de van Der Waals (VDW), soit des forces capillaires. Dans ce contexte, Nous avons conclu que dans les régions sèches, les forces VDW sont dominantes pour le miroir hydrophobe; et les forces capillaires seront dominantes pour les miroirs hydrophiles/superhydrophiles; et par conséquent faire le meilleur choix pour une sélection des types de miroirs réflecteurs avec antisalissure (Hydrophobe ou hydrophiles/superhydrophiles) en fonction des types de régions; conditions sèches ou d'humidité élevée. Troisièmement, suivant la théorie DLVO étendue pour trois phases (eau,

Conclusions & Recommendations

additifs et échantillon de miroir solaire), de nouveaux additifs sont suggérés pour diminuer l'énergie libre de surface et par conséquent, augmenter l'étalement et la mouillabilité de l'eau au contact du miroir réflecteur, comme l'alcool polyvinylique (PVOH), l'acétate de cellulose (CA), le sulfate de dodécyle de sodium (SDS), le bromure de Cétyltriméthylammonium (CTAB) et le Ghassoul naturel. Dans cette partie, le Ghassoul naturel, il est fortement recommandé de le mélanger avec de l'eau. Quatrièmement, suite à l'évaluation de l'adhérence de la poussière et au calcul des forces d'adhérence sur les surfaces des miroirs à réflecteur; et afin d'élargir nos recherches en temps réel et de mettre en corrélation nos résultats avec les paramètres météorologiques; une microscopie de sol en extérieur a été implantée pour collecter les données d'images des échantillons souillés et corrélés le résultat avec les paramètres météorologiques. Par la suite, sur la base de la microscopie des salissures extérieures (MSE) corrélée avec le réseau neuronal artificiel (RNA), le dépôt de poussière et la remise en suspension ont été prédits en ne fournissant que les conditions météorologiques des régions sélectionnées, puis les performances de ce modèle ont été testées à l'aide du Algorithme NARX Levenberg Marquardt pour identifier le lien entre les données d'entrée et de sortie et ainsi prédire avec précision les pourcentages de poussière sur les surfaces. Sur la base de ces résultats, les recommandations suivantes sont formulées pour l'atténuation de l'adhérence de la poussière sur les centrales solaires à concentration, puis pour les recherches futures:

- Les centrales solaires à concentration construites dans les régions désertiques à irradiations normales directes élevées. Cependant, l'identification des types d'argiles présentées dans les régions potentielles pour l'installation des centrales solaires à concentration peut aider les chercheurs à connaître les argiles gonflantes affectées à la surface des miroirs réflecteurs. Ensuite, utiliser la théorie DLVO étendue pour calculer l'adhérence réelle peut aider les chercheurs à évaluer l'adhérence de la poussière et à augmenter l'efficacité et les performances des centrales solaires.
- Utilisation de la théorie DLVO étendue pour l'identification et la caractérisation de nouvelles tensioactives à haute teneur. Premièrement, pour augmenter l'étalement et la mouillabilité des liquides mélangés à l'eau en contact avec des miroirs réfléchissants ou des panneaux solaires. Deuxièmement, minimise la consommation d'eau pendant le processus de nettoyage.
- Identification et caractérisation des types d'argile présentées dans d'autres régions potentielles des centrales solaires telles que Boujdour (Puissance installée : 20 MW), Laâyoune (Puissance installée : 85 MW) et Ain Beni Mathar (Puissance installée : 20

Conclusions & Recommendations

MW). Ensuite, l'utilisation de la théorie DLVO pour calculer l'adhérence des poussières, et par suite la connaissance des types d'argiles gonflantes affectées à la surface des panneaux solaires.

- Développement et utilisation du réseau de neurones artificiels pour la prédiction du dépôt réel de poussières sur les miroirs solaires ou sur les surfaces des panneaux photovoltaïques dans les régions potentielles d'installation des centrales solaires, et par conséquent une bonne stratégie de la maintenance en temps réel.