UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

ÉCOLE DOCTORALE : PHYSIQUE CHIMIE, SCIENCES DE LA TERRE, DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR (PCSTUI)

Année : 2020 N^o d'ordre : 156

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité: Électronique, Systèmes et Télécommunications

Présenté par

Dialo DIOP

Caractérisation et impact du dépôt sec de poussières Sahariennes sur les performances des panneaux Photovoltaïques au Sahel

---

Soutenue le 12 Novembre 2020 devant le Jury composé de :

Aboubaker Chédikh BEYE	Professeur, UCAD, Dakar	Président
Bruno CAILLIER	Professeur, INUC, Albi,	Rapporteur
Banda NDOYE	Professeur, EPT, Thiès	Rapporteur
Kharouna TALLA	Professeur Assimilé, UCAD, Dakar	Rapporteur
David MALEC	Professeur, UPS, Toulouse	Examinateur
Dominique MARY	Maître de Conférences, UPS, Toulouse	Examinateur
Mamadou Simina DRAME	Maître Assistant, UCAD, Dakar	Examinateur
Moussa DIALLO	Maître de Conférences, ESP, UCAD, Dakar	Directeur de thèse

DEDICACES

Je dédie ce travail :

A titre posthume à mon défunt père, que la terre de Patar lui soit légère.

A ma chère mère à qui je souhaite longue vie.

A mes frères et sœurs.

A mes amis.

A ma femme et mes enfants que j'aime énormément.

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à **DIEU, le tout Puissant et le Miséricordieux** de m'avoir permis de terminer ce travail qui a débuté il y a trois ans.

Je souhaite tout d'abord, adresser mes remerciements les plus sincères au professeur **Moussa DIALLO**, mon directeur de thèse. Je tiens à lui exprimer ici toute ma gratitude pour m'avoir fait confiance et m'avoir encadré pendant ces belles années à **l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar**. Tes qualités scientifiques et humaines m'ont permis de m'épanouir et de mener à bien ces travaux.

Je remercie sincèrement le **Dr Mamadou Simina DRAME**, co-directeur de cette thèse, d'avoir participé activement à ces travaux de thèse. Vos conseils, encouragements et apports financiers ont été précieux le long de cette thèse. En effet, je n'ai pas les mots pour vous remercier, du début jusqu'ici vous avez été à mes cotés. Que le tout Puissant vous accompagne dans vos projets.

Je remercie le professeur **Aboubaker Chédikh BEYE** de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse, mais aussi pour son accueil au sein du laboratoire URANIE.
Je remercie également les professeurs **Banda NDOYE**, **Bruno CAILLIER** et **Kharouna TALLA** d'avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse.
Et je remercie les professeurs **David MALEC** et **Dominique MARY** d'avoir accepté d'être les examinateurs de cette thèses.
J'adresse mes remerciements à l'ensemble du jury pour leurs remarques et conseils qui ont amélioré ce document.

Je n'oublie pas **David MALEC**, professeur en génie électrique de **l'Université Paul Sabatier** de Toulouse en France et **Dominique MARY**, de m'avoir accueillir au sein du laboratoire Laplace (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie). Je leurs remercie, ainsi que, le professeur **Philippe GUILLOT** de l'Institut National Universitaire Champollion d'Albi de Toulouse pour leur aide et soutient. Les échanges expérimentateurs/modélisateurs que nous avons eu durant mon séjours au Laplace de Toulouse m'ont été d'un apport conséquent.
Je renouvelle mes remerciements à **Marie-Laure LOCATELLI**, chargée de recherche au CNRS et responsable du groupe Matériaux Diélectriques dans la Conversion de l'Energie (MDCE) du Laplace de m'avoir accueilli au seins de son groupe de recherche.

J'adresse mes remerciements les plus sincères à toute l'équipe du MDCE qui contribue à la formation et à la réussite des étudiants qu'elle accueille en l'occurence de **Benoît LANTIN**, **Benoit SCHELGEL** et **Pierre HERNANDEZ** qui sont les techniciens du laboratoire Laplace de Toulouse. Je remercie aussi **Mokhamed HOUSSAT, Zhou TIANBO, Fathur RAHMAN, Daya Sagar DHUNGANA, Sofia BARRANCO, Abel** et le professeur **Moustapha MUDUD** pour leurs apports respectifs à ce travail. Je garde en mémoire les savoirs et techniques que j'ai acquis à vos côtés, ainsi que les bons moments passés avec vous en France.

Un grand merci également à tous les professeurs du groupe GPSSM, surtout le **Pr. Balla Diop NGOM** et le **Dr Allé DIOUM** d'avoir menés avec nous ce travail.

J'adresse mes plus sincères remerciements aux professeurs du **Département Physique de la FST de l'UCAD**, pour leur aide précieuse lors mon parcours universitaire. Je me souviendrai longtemps du très bon accueil qui nous était réservé depuis le premier jour à l'UCAD. Je remercie également tous les étudiants en master, docteurs et doctorants du laboratoire URANIE, pour les échanges et suggestions tout au long de cette thèse. Je passe une dédicace spéciale à mes amis et frères en l'ocurrence les docteurs **Abel SAMBOU** et **Pascal Djicoly BASSENE**. Merci pour les échanges scientifiques et surtout pour les bons moments passés au bâtiment URANIE.

Je souhaite remercier le **Dr Moulaye DIAGNE**, pour notre collaboration sur la modélisation des paramètres électriques. Et je n'oublie pas le **Dr Mountaga LAM** enseignant chercheur au Département Mathématique et Informatique de la FST de l'UCAD pour ses conseils et encouragements durant ces trois années. De même, je remercie aussi le **Dr Sidy NDAO** de l'Universite de Nebraska pour avoir contribuer dans cette thèse.

Je tiens à remercier également tous mes amis et collègues du Groupe de Physique du Solide et des Sciences des Matériaux (GPSSM) de l'URANIE en l'occurrence des docteurs **Moustapha THIAM, El hadji Omar GUEYE, Giovani MALOMAR, Bachir GUEYE, madame Ndéye Soukeyna SY, Ndéye Maty NDIAYE, Nogoye MBAYE, Abdoulaye Ndiaye DIONE, Alioune Aidara DIOUF, Cheikh Birahim NDAO, Mamadou Seck GUEYE**, **Omar Ngor THIAM**, **Ousmane RILINGUAR, Mahamat Bichara ABDERAMAN, Haroun Ali ADANNOU et Saka GONI** pour leurs soutiens, conseils et aides ainsi que pour leurs contributions à l'aboutissement de cette thèse.

Je remercie aussi tous les étudiants des masters PMC, SGM, EST et mes promotionnaires et les futures docteurs en l'occurence, **Mamadou NDIAYE, Dibor FAYE, Nango FAYE, Baba DIENG, Samba SARR, Adama FALL, Famara DIEME, Bissenthy GOMIS, Abdoulaye BA, Momar Talla DIENG** et tout le monde.

Je salue et remercie tout particulièrement mes amis **Cheikhouna SAMB, Badara DIOP, Sanou FAYE, Ablaye GUEYE, Pape SAGNE et Ablaye GNINGUE** pour avoir toujours été là à me pousser à persévérer.

Je remercie sincèrement **Mr Mohamed BA**, **Ndeye Coumba DIOUF** sa femme et ses enfants, de m'avoir accueilli en France et de m'avoir donné les moyens de travailler dans les meilleures conditions. J'adresse mes remerciements les plus sincères à **Mr Cheikh Hamalah DIABY** pour son soutien, ses encouragement et ses conseils durant les premiers jours en France. Franchement, j'ai pas les mots pour remercier **Mr DIABY**. Il m'a aidé durant les moments les plus difficiles.

Je dois beaucoup à **Pape Moussa GUEYE**, **Adama KANE** et **Moustapha THIAM** du Mali de m'avoir aidé en France durant les premiers jours. Je remercie aussi **Assane FAYE** pour ces conseils et encouragements durant mon voyage en France.

Je passe ensuite une dédicace spéciale à **Saliou BAKHOUM** mon papa, ami et frère qui a tout fait pour moi depuis mon arrivé à Dakar. Sans oublier ces prières matin et soir. J'ai pas les mots pour lui remercier. Je remercie aussi mes parents feu **Dèthie FAYE, Ndane SENE, Yasine DIENG, Ousmane DIOP, Birame SENE et Aly DIENG** qui sont tous disparu durant cette année. Je prie pour le repos de leurs âmes. Je remercie aussi mes amis de **Patar**, **Niakhar** et de **Diourbel** en l'occurence, **Fatou NDOUR, Saliou SENE, Junior, Germaine SENE, Fatou NDIAYE, Diass NDIAYE et Ibrahima KONE** pour leurs soutiens durant mon cursus scolaire. Un grand merci à **Monsieur et madame SECK**, ses enfants pour leurs accueils à Dakar, plus particulièrement à Sacré Cœur 3 pour leur aide technique et de m'avoir ouvert leurs portes. Je remercie chaleureusement **Modibo CAMARA, Ricca DIATTA, Fany NUNEZ**, **Penda GUEYE** et mes amis de **l'Imprimerie Horizon**, ils m'ont toujours aidé durant les moments difficiles à Dakar.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit des doctorants de l'Ecole Polytechnique de Dakar (ESP), je veux nommer **Mr Abdoulaye KAMA**, **Bassirou NGOM** et **Madoune Robert SEYE** pour leur soutien de la mise en place de mon dispositif technique mais aussi avec qui j'ai pu passer de très bons moments au gré de leurs passages dans les bureaux de l'URANIE.

Enfin, je souhaite remercier **mes proches, mes parents, mes frères et sœurs** pour m'avoir toujours poussé et accompagné dans mes projets. Mes vifs remerciements **à ma femme et à mes enfants** de m'avoir soutenu, aidé et supporté pendant ces trois années.

Résumé

Les travaux développés dans cette thèse, portent sur l'évaluation de l'impact du dépôt sec de poussière sur les performances des panneaux photovoltaïques (PV) à Dakar, au Sénégal. Ce travail s'est appuyé sur l'analyse d'un ensemble d'outils adaptés comme les techniques de caractérisations au laboratoire, les observations atmosphériques et les modèles. La première partie consistait, à utiliser le modèle climatique global ALADIN développé à Météo-France pour évaluer les flux saisonniers de dépôts secs entre 2006 et 2010 au Sahel. Ces simulations révèlent que, les maxima en flux de dépôts secs sont enregistrés pendant la saison sèche, de Novembre à Juin dans tout le Sahel. Par exemple, sur la station de Dakar, les valeurs du dépôt sec varient, de 18 g/m^2/mois en saison sèche à 2 g/m^2/mois pendant la saison humide. La deuxième partie de cette thèse, est consacrée à l'analyse par des techniques de caractérisation des échantillons de poussières prélevés sur la surface des panneaux PV à Dakar. Les résultats par analyse EDS et XRF indiquent que, les échantillons de poussières sont dominés par des éléments cristallins tels que Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Mn et Fe. De plus, d'autres éléments comme, le P, S, Zn, Sr, Zr et Cr très minoritaires ou sous forme de traces ont été identifiés. Et enfin, l'analyse moléculaire par DRX montre que cette poussière, est un mélange de différents composés chimiques, avec une phase prédominante constituée du quartz de type SiO_2 (environ 73,8% du total) et la seconde phase est de type calcite $CaCO_3$, représentant 13,6% de la poussière collectée à Dakar. Le reste, qui est estimé à 12,6% est un mélange d'oxychlorure de fer (FeOCl), de mantienneite ($Al_2FeH_{33}K_{0,5}Mg_3O_{34}P_4Ti$) et de kaersutite ($Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$). Et enfin, le dernier volet utilise, deux modèles pour évaluer les pertes en propriétés, optiques du rayonnement et électriques des panneaux PV. Les simulations avec les deux modèles, ont montré que, la présence de poussière sur la surface des panneaux PV entraînait une réduction considérable de la transmittance du rayonnement et du rendement des cellules PV. En effet, pour un dépôt de poussière de l'ordre 3,3 g/m^2, le spectre de transmittance du rayonnement solaire, diminue de moitié. De plus, pour une même quantité de dépôt, la densité de courant de court-circuit du panneau solaire diminue aussi de prés de la moitie (51%).

Mots-clés : Dépôt-Poussières-Panneaux PV-ALADIN-Sahel-Rendement-Nettoyage-Diffraction aux rayons X

Abstract

In this PhD study, we investigated the deposition effect of the dry dust deposits on the photovoltaic panels in Dakar, Senegal. Different characterization techniques and atmospheric observations as well as models were used in this work. The first part consisted to adopt the global climate model ALADIN which is developed at Meteo-France to assess the seasonal flows of dry deposits. It was established between 2006 and 2010 in the Sahel, Senegal. The developed simulations in the Sahel displayed that the maximum fluxes of dry deposits are recorded during the dry season (November to June: 6 months). For example in Dakar station, the values for the dry season are 18 g/m^2/month and for the wet season to 2 g/m^2/month. From characterization techniques, the EDS and X-ray fluorescence XRF analysis of the dust deposits collected in Dakar present different elements including O (oxygen), Na (sodium), Mg (magnesium), Al (aluminum), Si (silicon), Cl (chlorine), K (potassium), Ca (calcium), Ti (titanium), Mn (manganese) and Fe (iron), P (phosphorus), S (sulfur), Zn (zinc), Sr (strontium), Zr (zirconium) and Cr (chromium). A considerable percentage of Ca (calcium) and (Si) were observed in all the materials. The crystal structure of all the dust deposits collected in Dakar was investigated using the X-ray diffraction (XRD) analysis. The XRD analysis of the samples revealed a mixture of two different structures of materials with a predominant phase of quartz of the SiO_2 type (73.8%), the calcite $CaCO_3$ (13.6 %). Other mixtures (12.6%) are observed in the materials which such as iron oxide chloride (FeOCl), mantienneite ($Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$) and kaersutite ($Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$). The optical and electrical properties of the dust deposits were also investigated to assess the loss in radiation and photovoltaic panel, respectively. Both properties exhibited that the presence of dust on the surfaces of the solar modules resulted in a considerable reduction in the transmittance of incoming radiation and the efficiency of the solar panels. In fact, for a dust deposit of 3.3 g/m^2, the transmittance spectrum of the solar radiation decreases by half. Additionally, for the same amount of deposit, the short circuit current density of the panel decreases to about half as well (51%).

Keywords : Dusts-Deposition-PV Panels-ALADIN-Sahel- Efficiency-Cleaning-X-Ray Diffraction

Acronymes

AERONET : AErosol RObotic NETwork

AI : Aerosol Index

ALADIN : Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational

AM : Air Mass

AOD : Aerosol Optical Depht

ARPEGE : Action de Recherche Petit Echelle Grande Echelle

CE : CErtification

CEPMMT : Centre Européen de Prévision Météorologiques à Moyen Terme

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique

DJF : Décembre-Janvier-Février

DRX : Diffraction des Rayons X

EDS : Energy-Dispersive X-Ray Spectroscopy

EPT : Ecole Polytechnique de Thiès

ESP : Ecole Supérieure Polytechnique

FST : Faculté des Sciences et Techniques

GEOS : Geostationary Operational Environmental Satellites

GES : Gaz à Effet de Serre

GMAO : Global Modeling and Assimilation Office

GOCART : Goddard Global Ozone Chemimistry Aerosol Radiation and Transport

GPSSM : Groupe de Physique du Solide et des Sciences Matériaux

ICCD : International Centre for Diffraction Data

i.e. : c'est à dire

IEC : International Electrotechnical Commission

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change

INUC : Institut National Universitaire Champollion

IRENA: International Renewable Energy Agency

Ithemba LABS : Ithemba Laboratory for Accelerator Based Sciences

JJA : Juin-Juillet-Août

Laplace : Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie

MAM : Mars-Avril-Mai

MDCE : Matériaux Diélectriques dans la Conversion de l'Energie

MEB : Microscopie électronique à balayage

MERRA-2 : Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications Version

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA : National Aeronautics and Space Administration

ORILAM : Organic Inorganic Lognormal Aerosol Model

PCSTUI : ED : Physique Chimie, Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Ingénieur

PDF : Powder Diffraction File

PIR : Proche-Infra Rouge

PMC : Physique de la matiere Condensée

PPM : Point de Puissance Maximale

PSM : Poste de Sécurité Microbiologique

PV : Photovoltaïque

RegCM : Regional Climatic Model

SAL : Saharan Air Layer

SGM : Sciences et Génie des Matériaux

SON : Septembre-Octobre-Novembre

Sol-gel : Solution-gélification

SRD : Spectroscopie en Réflectance Diffuse

SRM : Standard Reference Materials

SSA : Single-Scattering Albedo

UCAD : Université Cheikh Anta Diop

UPS : Université Paul Sabatier

USA : United States of America

UV : Ultra-Violet

WDS : Wavelength-Dispersive X-Ray Spectroscopy

WDXRF : Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence

XRD : X-Ray Diffraction

XRF : X-Ray Fluorescence

ZCE : Zone de Charge d'Espace

ZCIT : Zone de Convergence Inter Tropical

Table des Matières

Remerciements **i**

Resumé **v**

Abstract **vii**

Aconymes **ix**

Table des matières **xiii**

1 Introduction générale **1**
1.1 Contexte général 2
1.2 Généralités 3
1.2.1 Les poussières Sahariennes 3
1.2.1.1 Définition et cycle des poussières 3
1.2.1.2 Impact des poussières désertiques 5
1.2.2 Les panneaux solaires à base de silicium 7
1.3 Objectifs et plan du manuscrit de thèse 9
1.3.1 Objectifs 9
1.3.2 Plan du manuscrit de thèse 10

2 Données et Méthodes **11**
2.1 Préambule 12
2.2 Présentation du site d'étude et des données 12
2.2.1 Présentation du site d'étude et des échantillons prélevés 12
2.2.2 Présentation des données AERONET 13
2.3 Présentation des techniques de caractérisation 14
2.3.1 Introduction 14
2.3.2 Diffraction des Rayons X (DRX) 15
2.3.3 La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) 15
2.3.4 Fluorescence des Rayons X (XRF) et Analyse Dispersive en Énergie (EDS) 16
2.3.4.1 Fluorescence des rayons X, analyse XRF 16
2.3.4.2 La Spectroscopie à rayon X à dispersion d'énergie (EDS) . 17

2.3.5 Synthèse des couches minces et la spectrophotométrie 17
2.3.5.1 Synthèse des couches minces 17
2.3.5.2 Poste de Sécurité Microbiologique (PSM) 18
2.3.5.3 Technique sol-gel 19
2.3.6 La spectrophotométrie UV-Visible et Réflectance diffuse 20
2.3.6.1 La spectrophotométrie UV-Visible (HP 8452A Diode-tableau) 20
2.3.6.2 La Réflectance diffuse (spectrophotomètre modèle Cary 2300) 21
2.3.7 L'éllipsométrie (éllipsométre spectroscopique Sopra GES-5E) 22
2.3.8 Microscope optique numérique Kéyence 23
2.4 Présentation des modèles climatiques de dépôt de poussière 24
2.4.1 ALADIN 24
2.4.2 MERRA-2 26
2.5 Modélisation des pertes des propriétés électriques et optiques en présence de poussières sur la surface des modules PV 27
2.5.1 Modélisation des pertes des propriétés optiques 27
2.5.2 Modélisation des pertes des propriétés électriques des cellules solaires 30
2.5.2.1 Équation de continuité 32
2.5.2.2 Densité des porteurs minoritaires excédentaires dans la cellule sous éclairement monochromatique: 33
2.5.2.3 Calcul de la densité du Photocourant 35
2.5.2.4 Courant de court-circuit (I_{cc}) 36
2.5.2.5 Tension de circuit ouvert(V_{c0}) 36
2.5.2.6 Puissance maximale (P_m) 36
2.5.2.7 Le facteur de forme (FF) 37
2.5.2.8 Le Rendement de conversion (η) 37
2.6 Conclusion 37

3 Utilisation du modèle ALADIN et de la réanalyse MERRA-2 pour caractériser les flux de dépôt sec de poussières entre 2006 et 2010 au Sénégal et en Afrique de l'Ouest 39
3.1 Contexte et objectifs 40
3.2 Validation des épaisseurs optiques simulées par les deux modèles entre 2006 et 2010 à Mbour 42
3.3 Caractérisation et validation des flux de dépôt sec à Mbour entre 2007 et 2009 44
3.3.1 Présentation de la campagne de mesure effectuée à Mbour 45
3.3.2 Distribution en taille des particules à Mbour pendant la campagne de mesure 45
3.3.3 Validation de l'AOD à Mbour pendant la campagne de mesure . . . 46
3.3.4 Validation des flux de dépôts secs par les mesures effectuées pendant la campagne 48
3.4 Simulation à long terme des dépôts secs de poussière avec le modèle ALADIN 50
3.4.1 Distribution mensuelle des flux de dépôts secs de poussières en Afrique de l'Ouest 50

3.4.2 Distribution mensuelle des flux de dépôts secs de poussières au Sénégal 53
3.4.3 Distribution mensuelle des flux de dépôts secs de poussières à Mbour 55
3.5 Conclusion 56

4 Propriétés structurelles et physico-chimiques de la poussière collectée sur la surface des panneaux photovoltaïques à Dakar, au Sénégal 57
4.1 Introduction 58
4.2 Analyse des poussières collectées sur les surfaces des panneaux PV 59
4.2.1 Propriétés optiques de la poussière collectée 59
4.2.1.1 Validation des indices de réfractions des poussières collectées 59
4.2.1.2 Autres propriétés optiques de la poussière collectée 60
4.2.2 Taille et forme des particules 61
4.2.2.1 Taille des particules suspendues dans l'atmosphère de Dakar 61
4.2.2.2 Forme et morphologie des poussières collectées : Analyse par MEB et EDS 62
4.3 Identification des éléments chimiques composants la poussière avec plusieurs techniques de caractérisation 65
4.3.1 Résultats obtenus par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS) 65
4.3.2 Identification des éléments chimiques par fluorescence aux rayons X (XRF) des échantillons de poussières 67
4.4 Caractérisation de la composition moléculaire par diffraction des rayons X 70
4.5 Conclusion 75

5 Modélisation des pertes en propriétés optiques et électriques dues aux dépôts secs de poussières sur les cellules photovoltaïques 77
5.1 Introduction 78
5.2 Quelques mesures de l'impact du dépôt de poussières sur le rayonnement au laboratoire 79
5.2.1 Préambule 79
5.2.2 Évaluation de l'impact de la poussière sur le rayonnement par réflectance diffuse 79
5.2.3 Mesure de la transmittance par le spectrophotomètre 80
5.3 Modélisation des pertes en propriétés optiques 81
5.3.1 Validation de la transmittance simulée 81
5.3.2 Perte en transmittance du rayonnement solaire en présence de la poussière 83
5.3.3 Perte en réflectance et en transmittance du rayonnement solaire en présence de la poussière 84
5.4 Modélisation des pertes en propriétés électriques dues aux dépôts de poussières sur les cellules PV 87
5.4.1 Évolution du courant de court-circuit de la cellule solaire en présence de la poussière 87

5.4.2 Réduction de la puissance produite de la cellule PV en fonction du dépôt de poussière 88
5.4.3 Caractéristiques courant-tension de la cellule PV en présence de la poussière 89
5.4.4 Variation du rendement de conversion de la cellule à base de silicium en fonction du dépôt 90
5.4.5 Facteur de forme de la cellule photovoltaïque à base de silicium . . 91
5.5 Conclusion 92

6 Conclusion et Perspectives 93

Liste des publications 99

Table des figures

1.1 Illustration des principales trajectoires de transport des panaches d'aérosols désertiques depuis l'Afrique, au nord de l'Équateur inspirée de l'étude de Middleton (1986) 5

2.1 (a) Panneaux photovoltaïques à l'Université de Dakar , (b) échantillons de poussières collectés. 13

2.2 Poste de Sécurité Microbiologique (Laboratoire Laplace). 19

2.3 Couche de poussière déposée sur un substrat de verre de surface 8,64 cm^2.Vitesse de 20 tr/s pendant une durée de 30 s avec un recuit de 5 min 60°C sur une plaque chauffante. 20

2.4 Principe du spectrophotomètre. 21

2.5 Microscope optique numérique. 23

2.6 Réflexion de la lumière sur une couche mince de poussière déposée sur un substrat de verre. 28

2.7 Dispositif d'empilement des couches pour évaluer les pertes électriques. . . 31

2.8 Dimensions d'une cellule PV à base de silicium Si(N)/Si(P) (Bencherif, 2015). 31

3.1 Moyenne du flux de dépôt en g/m^2/mois pour la période 1987–1990 simulée par Tegen et al. (2002). 41

3.2 Distribution mensuelle de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) pour AERONET (courbe noir), MERRA-2 (courbe bleu) et ALADIN (courbe rouge) entre 2006 et 2010 à Mbour (Sénégal). 43

3.3 Corrélation entre la réanalyse MERRA-2 (a) et le modèle ALADIN (b) comparée avec la mesure in situ (AERONET) entre 2006 et 2010 à Mbour. 44

3.4 Distribution saisonnière de la taille des aérosols obtenue par le photomètre (AERONET) de la station de Dakar de 2007 à 2009. 46

3.5 Comparaison de l'AOD saisonnière entre la mesure in situ (noire) et les deux modèles que sont ALADIN (bleu) et MERRA-2 (rouge) pendant la période (2007-2009) de la campagne de mesure des dépôts secs à Mbour. 47

3.6 Droites de régressions entre l'AOD mesurée et simulée par les deux modèles à Mbour. 48

3.7 Comparaison entre les flux de dépôts secs saisonniers de poussières mesurés (histogramme noire) et simulés (ALADIN et MERRA-2) en g/m^2/mois pendant la campagne de mesure entre 2007 et 2009. 49
3.8 Droites de régressions entre le dépôt mesuré et celui simulé par les modèles que sont ALADIN (bleu) et MERRA-2 (rouge) à Mbour entre 2007 et 2009. 50
3.9 Climatologie mensuelle des dépôts secs de poussières (g/m^2) en Afrique de l'Ouest simulée avec le modèle ALADIN entre 2006 et 2010. La ville de Mbour est indiquée par la croix rouge. 52
3.10 Distribution des dépôts mensuels moyens de poussières (g/m^2) au Sénégal selon le modèle ALADIN entre 2006 et 2010. La ville de Mbour est indiquée par la croix rouge. 54
3.11 Climatologie mensuelle des flux de dépôts secs en poussières (g/m^2) à Mbour entre 2006 et 2010 simulés par le modèle ALADIN 55

4.1 Validation des indices de réfractions de l'éllipsomètre (courbes noires) par les données atmosphériques issues du photomètre AERONET (points bleus). Comparaison entre les indices réels à gauche et les indices imaginaires à droite. 60
4.2 Moyenne de la distribution en taille AERONET des particules entre Octobre 2016 et Juin 2017 à Dakar. 62
4.3 (a – d) Image des particules de poussière collectées directement sur les surfaces des panneaux photovoltaïques obtenues par le (MEB) avec un grossissement de 10 (a) ; 1 (b); 0,2 (c); et 0,1 μm (d) situés à l'Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal). 63
4.4 Image Électron. 64
4.5 Distribution fréquentielle des tailles des particules dans l'échantillon de poussières collecté à Dakar. 64
4.6 Spectres dispersifs d'énergie des particules de poussière (a) et (b) Analyse élémentaire (% de contenu atomique) réalisée au laboratoire. 66
4.7 Analyse élémentaire (% de contenu atomique) par spectromètre Rigaku Supermini 200 WDXRF réalisée à Nebraska. 67
4.8 Composition des éléments chimiques détectés dans la poussière de Dakar par XRF. 68
4.9 Pourcentage en masse et éléments détectés dans la poussière collectée à Dakar. 68
4.10 Comparaison entre la poussière collectée (en noir) et deux échantillons de sables de références standardisés et certifiés nommés, SRM-2709a et SRM-2710 respectivement de San Joaquin (en bleu) et de Montana (en rouge) aux USA. 70
4.11 Identification des pics du spectre de diffraction des rayons X des particules de poussière à Dakar, Sénégal, en Afrique de l'Ouest par le logiciel X'Pert High Score Plus. 71

4.12 Diffractogramme de rayons X des poussières sahariennes du programme PDF-4. 73

5.1 Spectres de réflexion (réflectance diffuse, spectrophotomètre UV-Vis-NIR) d'un échantillon de poussière collecté à Dakar en Juin 2017. 79
5.2 Transmittance mesurée par le spectrophotomètre (en noir) pour une couche de poussière d'épaisseur de 35 μm déposée sur un substrat de verre. La courbe en couleur cyan représente la transmittance du verre propre. 81
5.3 Comparaison entre la transmittance mesurée par le spectrophotomètre (en noir) et simulée par le modèle (en rouge) pour une couche de poussière d'épaisseur de 35 μm. La courbe en couleur cyan représente la transmittance du verre propre 82
5.4 Simulation des transmittances du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde pour différentes couches de poussières d'épaisseurs de 30, 45, 55 et de 70 μm. 83
5.5 Simulation des réflectances du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde pour différentes couches de poussières d'épaisseurs de 30, 45, 55 et de 70 μm. 85
5.6 Simulation des pertes en transmittances pour des épaisseurs de poussière variant de 0 à 70 μm 86
5.7 Caractéristiques courant-tension de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière. 87
5.8 Caractéristiques puissance-tension de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière (simulation). 89
5.9 Variation du Point de Puissance Maximale (MPP). Caractéristique courant-tension pour une cellule PV propre (épaisseur de couche de poussière 0 μm) et une cellule PV salle (épaisseur de couche de poussière 70 μm) (courbes noires); Caractéristique puissance-tension pour une cellule propre (épaisseur de couche de poussière 0 μm) et une cellule salle (épaisseur de couche de poussière 70 μm) (courbes bleues). 90
5.10 Rendement de conversion de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière 91
5.11 Facteur de forme de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière 92

6.1 Photos du dispositif déployé à l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar. . 96

Liste des tableaux

4.1 Observations mensuelles moyennes du réseau de robots aérosols (AERONET) à Dakar d'octobre 2016 à juin 2017. Les paramètres sont l'épaisseur optique totale des aérosols, le coefficient d'angström ($\alpha_{440-870}$), l'albédo à diffusion simple et le facteur asymétrie 60
4.2 Synthèse des principaux composés chimiques de l'échantillon de poussières identifiés par diffraction des rayons X 72
4.3 Compositions des structures possibles des particules de poussière identifiées par le programme ICDD à partir de l'analyse XRD. 74

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Contexte général

Avec la raréfaction des énergies fossiles et aussi leur rôle prédominant dans le réchauffement de la planète, les ressources renouvelables constituent, une alternative majeure pour notre planète. Une de ces dernières, les plus réparties sur terre, est sans aucun doute le solaire. Chaque jour, la terre reçoit plus de 15 000 fois d'énergie que l'humanité n'en consomme (Hua et al., 2003). L'Afrique constitue, un des plus importants gisements solaires au monde et c'est pour cela que, plusieurs projets d'exploitation de cette ressource (Sahara et Sahel) sont entrain d'être élaborés dans ce continent. En effet, ce dernier dispose de plus de 2000 KWh/m^2/an, ce qui en fait l'une des régions les plus irradiées du monde (Dajuma et al., 2016). Bien que cette ressource soit presque inépuisable, l'Afrique est le moins bien doté en termes de capacité photovoltaïque (PV). Globalement, la capacité mondiale installée de centrale solaire s'est régulièrement développée ces dernières années. En 2 ans, la capacité a quadruplé en Afrique, par exemple elle était d'environ 1330 MW en 2014 et est passée à 2100 MW à la fin de 2015 (IRENA, 2016). L'Afrique a le potentiel pour atteindre plus de 70 GW d'énergie de capacité photovoltaïque d'ici 2030. Néanmoins, ces modules et panneaux solaires sont installés à l'air libre, ce qui les rend vulnérables par rapport à certains phénomènes naturels. Ainsi, les fientes d'oiseaux, les embruns, les pollens et surtout la poussière sont des éléments naturels externes qui peuvent se déposer progressivement sur la surface des panneaux PV et impacter leurs rendements.
Plusieurs études ont montré l'impact négatif des dépôts de poussière sur l'efficacité des panneaux PV dans les régions arides et semi-arides d'Asie (Mani et al., 2010; Yilbas et al., 2015; Sulaiman et al., 2015; Aïssa et al., 2016; Kazem et al., 2013, 2020a). D'autres études menées par Mazumder et al. (2017) en collaboration avec la NASA ont montré qu'une couche de poussière de 4 mm d'épaisseur par mètre carré diminue la conversion d'énergie solaire de 40 % (Dajuma et al., 2016; Sulaiman et al., 2015). En plus de la baisse du rendement, cette couche peut provoquer un phénomène de hot spot (Sánchez-Friera et al., 2011). Ces Hot spots sont des parties des panneaux solaires qui produisent de la chaleur au lieu d'électricité. Ce phénomène donne lieu à une chauffe excessive des panneaux solaires réduisant ainsi fortement leurs durées de vie (Ndiaye et al., 2013). En somme, les dépôts sur les panneaux solaires diminuent non seulement leurs performances de manière considérable mais en plus réduisent fortement leurs durées de vie (Jiang et al., 2016; Tripathi et al., 2017; Al Baloushi et al., 2018). Des travaux similaires initiés en Afrique (Sahel et Sahara) et en Asie ont reconnu l'importance de la prise en compte du dépôt de poussière dans l'efficacité des panneaux solaires (Dajuma et al., 2016; Ndiaye et al., 2013; Kazem et al., 2020b). Les études au Sénégal ont montré que la dégradation de la puissance des modules photovoltaïques en silicium cristallin due aux dépôts de poussière pouvait aller jusqu'à 78% (Ndiaye et al., 2013).

De plus, le continent Africain est aussi reconnu comme la plus grande source de poussière minérale atmosphérique à l'échelle globale (Prospero et al., 1981; Marticorena et al., 2011). Environ 50 %, des 4000 Mt de poussiere émises sur le globe, sont d'origines sahariennes (Marticorena et al., 2017; Shao et al., 2011; Grini et al., 2005; Engelstaedter et al., 2007). Le cycle de l'aérosol désertique s'achève par le dépôt des particules au niveau des continents ou des surfaces océaniques, en conditions d'atmosphère sèche par sédimentation ou humide par la convection humide. Les plus grosses particules, de diamètre supérieur à 20 μm, se déposent rapidement après leur émission par sédimentation, à proximité des zones sources. Cependant, les plus petites se transportent souvent très loin de leur zone d'émission avant de se déposer. Ainsi, on les retrouve jusqu'en Floride et dans les Caraïbes (Prospero et al., 1981; Walsh et al., 2001). Les Antilles Françaises et l'Amazonie sont aussi touchées pendant l'été (Petit et al., 2005).

Selon Shao (2001), 75% des poussières sahariennes sont déposées sur les continents et 25 % sur les océans. Plusieurs travaux ont montré une prédominance du dépôt sec par rapport au dépôt humide (Tegen et al., 2002). Au Sénégal par exemple, 92 % du dépôt total annuel sont sous forme de dépôt sec (sédimentation) (Marticorena et al., 2017). Malgré la complexité des processus de dépôt, quelques mesures in situ disponibles ont permis d'informer sur les flux de dépôts secs de poussière sur ce continent (Gac et al., 1991; Skonieczny et al., 2013; Marticorena et al., 2017; Redelsperger et al., 2006). Ainsi, les maximums de dépôts secs de poussières sont enregistrés au début de l'année, c'est-à-dire de (Janvier à Juin), tandis que les minima sont notés durant la saison des pluies en Afrique de l'Ouest (Gac et al., 1991). Les flux de dépôts secs sont estimés à 200 g/m^2/an (correspondant à un dépôt quotidien d'environ 0,5 g/m^2/jour) à Dakar, capitale du Sénégal, Afrique de l'Ouest ; alors que dans la région de Guinée, 240 g/m^2/an (Gac et al., 1991). Avec des flux de dépôt important, les modules solaires installés dans la bande Sahélienne sont soumis aux effets négatifs de cette poussière. En effet, comme expliqué précédemment, l'accumulation de la poussière sur la surface des panneaux solaires diminue de manière importante le rendement de ces derniers.

1.2 Généralités

1.2.1 Les poussières Sahariennes

1.2.1.1 Définition et cycle des poussières

Les aérosols minéraux font partie de la famille des espèces présentes dans l'atmosphère sous forme particulaire communément appelées aérosols. Ces poussières désertiques sont

qualifiées de primaires, au même titre que les embruns marins, car elles sont émises directement sous forme particulaire dans l'atmosphère sous l'action du vent. Même si leur diamètre est compris entre quelques dixièmes et plusieurs dizaines de micromètres (d'Almeida et al., 1983), les aérosols désertiques sont en majorité, des particules grossières contribuant principalement au mode micronique des aérosols atmosphériques. Ils représentent la première source en masse d'aérosols naturels présents dans l'atmosphère. Ainsi, selon des estimations réalisées à l'échelle globale (d'Almeida, 1986; Tegen et al., 1994, 2004; Duce, 1995; Mahowald et al., 1999), la quantité d'aérosols désertiques émise dans l'atmosphère serait comprise entre 1000 et 3000 Tg/an, ce qui correspond à environ 40% des émissions annuelles totales des aérosols (Andreae, 1995; Smithson, 2002; Ramanathan et al., 2001). Cependant, il existe encore aujourd'hui de grandes incertitudes sur ces estimations. Les principales estimations des émissions moyennes annuelles globales depuis l'Afrique au Nord de l'Équateur sont comprises entre 500 et 1000 Tg/an. Elles sont basées sur la somme des émissions de régions sources individuelles évaluées par différentes approches (concentration moyenne et temps de résidence, flux de dépôt, ou modélisation). Les aérosols désertiques obéissent à un cycle qui comporte trois phases au cours desquelles, ils sont en interaction avec leur environnement et qui sont, l'émission depuis certaines surfaces continentales, le transport dans l'atmosphère et le dépôt. Les trois principales sources des poussières Sahariennes se situent respectivement à l'Ouest du Tchad (dépression de Bodélé); à la frontière entre le Mali-Niger-Algérie et au centre de la Mauritanie (Drame et al., 2011).
Le transport des panaches d'aérosols depuis l'Afrique au nord de l'Equateur présente trois trajectoires principales (figure 1.1). D'abord, il y a le transport transatlantique vers les Etats-Unis, les caraïbes et l'Amérique du Sud (Swap et al., 1992; Perry et al., 1997; Prospero et al., 2003). Ensuite, nous avons le transport vers la Méditerranée et l'Europe (Borbély-Kiss et al., 2004). Et enfin, un dernier transport qui s'effectue vers le proche et le moyen Orient (Israelevich et al., 2003). Par ailleurs, des études récentes ont même suggéré un transport transcontinental des panaches d'aérosols depuis l'Afrique du Nord jusqu'au Japon à travers le Moyen Orient et l'Asie du Sud (Tanaka et al., 2005). Globalement, selon d'Almeida (1986), 60% des poussières sahariennes sont transportées vers le golfe de Guinée, 28% vers l'Atlantique et 12% vers l'Europe.

Figure 1.1: Illustration des principales trajectoires de transport des panaches d'aérosols désertiques depuis l'Afrique, au nord de l'Équateur inspirée de l'étude de Middleton (1986)

En outre, les poussières minérales Africaines se déposent en grande quantité autour des régions sources mais, peuvent se transporter à des milliers de kilomètres de leurs zones d'émission. Des travaux récents ont confirmé la présence de ce cycle annuel et saisonnier très marqué des poussières désertiques en Afrique (Engelstaedter et al., 2006; Rushingabigwi et al., 2020). Selon cette étude, la plupart des sources Africaines présentent un minimum dans les AI (Aerosol Index) de TOMS en Octobre/Novembre et un maximum entre Avril et Août. Cependant la dépression de Bodélé, qui d'après ces observations semble maintenir une activité élevée en quasi-continu tout au long de l'année, présente un maximum d'émission entre Janvier et Mars comme le montre une étude basée sur les données du satellite MODIS (Washington et al., 2005).

1.2.1.2 Impact des poussières désertiques

Les poussières désertiques ont des impacts non négligeables sur l'environnement naturel et humain. Tout au long de leur cycle (i.e. transport et dépôt), ces aérosols agissent sur leur environnement direct.

Une fois dans l'atmosphère, ces particules agissent sur le climat par plusieurs effets complexes. D'abord, elles peuvent diffuser ou absorber le rayonnement solaire et donc provoquer un forçage (i.e. changement du bilan radiatif), c'est l'effet direct d'après (Charlson et al., 1992). La diffusion par les aérosols augmente l'albédo planétaire, ce qui entraîne un refroidissement.
Ensuite, l'absorption du rayonnement change le taux de chauffage atmosphérique. Cela provoque des changements de la structure verticale de l'atmosphère en créant un gradient de température entre la couche d'aérosols et la surface (Ackerman et al., 2004). Ces modifications du bilan radiatif impactent la circulation atmosphérique générale et donc du climat de la région concernée. De plus, leur présence dans l'atmosphère peut influencer la formation des nuages en servant de noyaux de condensation, on parle alors d'effet indirect. Une hausse de la concentration en particules peut se traduire par une multiplication des gouttelettes (diminution de leur taille) et donc une augmentation de l'albédo des nuages. Un albédo important s'accompagne d'une couverture nuageuse conséquente, ce qui entraîne de nouveau un refroidissement (premier effet indirect) (Twomey, 2007). La réduction de la taille des gouttelettes entraîne une prolongation de la durée de vie des nuages et peut provoquer une diminution des précipitations (deuxième effet indirect) (Albrecht, 1989; Ackerman et al., 2004). A l'état actuel des connaissances scientifiques, les effets directs et indirects sont difficilement estimables. Par exemple en Afrique de l'Ouest, une étude menée par (Dunion et al., 2004), a montré que les aérosols désertiques présents dans la couche limite saharienne (SAL) empêchent l'amplification des ondes d'Est Africaines et affaiblissent l'activité des cyclones tropicaux.

L'impact des aérosols sur la santé se traduit par une augmentation des cas de maladies respiratoires (Kacenelenbogen-Tilot, 2008). Les aérosols dont le diamètre est inférieur à 2,5 μm (PM 2,5) affectent souvent les voies respiratoires supérieures (nez, gorge et cavité nasale) (He et al., 2017). Les particules les plus fines pénètrent dans les poumons et peuvent atteindre les alvéoles par diffusion (Klaassen et al., 1986; Cheng et al., 2008). L'exposition à une forte concentration de ces dernières peut produire de nombreux effets sur la santé, causant une inflammation pulmonaire jusqu'à une aggravation entraînant une thrombose vasculaire qui peut être mortelle (Nemmar et al., 2003).

Et dans leur processus de dépôt, les poussières sont également impliquées dans les échanges biogéochimiques. D'une part, elles peuvent altérer l'activité photosynthétique de la végétation. Cela se caractérise notamment par une perte de rendement pour les cultures (Steiner et al., 2005; Chameides et al., 1999). Cependant, dans des régions de dépôts, la retombée des aérosols désertiques peut être une source très importante d'approvisionnement en éléments clé, comme le fer ou le phosphore (Laurent, 2005). C'est le cas de la forêt amazonienne (Swap et al., 1992), des eaux de surface méditerranéennes (Bergametti et al., 1992), mais aussi d'écosystèmes marins (i.e l'océan Atlantique) où les apports de fer biodisponible via les aérosols désertiques permettent le développement du

phytoplancton (Talbot et al., 1986; Jickells et al., 2005). Et enfin, des études ont montré l'effet du dépôt de poussière sur la productivité des panneaux photovoltaïques (Adinoyi et al., 2013; Saidan et al., 2016; Beattie et al., 2012; Styszko et al., 2019; Said et al., 2018).

1.2.2 Les panneaux solaires à base de silicium

Le silicium cristallin (Si) est le principal matériau utilisé parmi les semi-conducteurs pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Les cellules solaires à base de silicium convertissent directement le rayonnement électromagnétique (quatum de photon) provenant du soleil (ou autre) en électricité. Elles couvrent près 99% du marché, laissant 1% à des matériaux semi-conducteurs comme le GaAs, le GaN et d'autres composants des colonnes III-V (Ludwig, 1996; Aboujja, 2000). En outre, cette conversion se fait suivant un phénomène photovoltaïque. Et pour cela, ce dernier se décompose en trois catégories tels que, l'absorption de la lumière dans le matériau, le transfert d'énergie des photons aux charges électriques et la collecte des charges (Mambrini, 2014). Le rayonnement électromagnétique ou celui du solaire, est composé de particules énergétiques appelées photons. Et le photon, de longueur d'onde λ possède une énergie E qui s'écrit :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \tag{1.1}$$

h : constante de Plank (m^2kgs^{-1} ou Js)
c : célérité de la lumière (ms^{-1})
λ : longueur d'onde (m).

Quand la lumière rencontre le matériau, une partie du spectre lumineux est transmise, ou réfléchie et une autre partie pourrait être absorbé par le matériau. L'absorption de la lumière dépend de l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction du matériau (appelé gap). Cette bande de valence est entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction vide (King, 1997). Les photons absorbés transfèrent leur énergie aux électrons périphériques des atomes. Quand, l'énergie apportée par le photon est supérieure à celle du gap, les électrons périphériques seront libérés de l'attraction de l'atome. Ceci donnera un électron libre et d'un trou (paire électron-trou). Lorsqu'une charge sera branchée, il y aura la circulation des électrons dans un sens et des trous dans l'autre. Enfin, ce processus forme un courant électrique (Ricaud et al., 1997). Ce processus est d'ailleurs le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. Ainsi, pour réaliser les panneaux solaires, on associe un ensemble de ces cellules en parallèles ou en série pour augmenter le courant ou la tension des panneaux photovoltaïque. Sur le marché, il existe plusieurs cellules à base de silicium qui sont plus utilisées à causes de leur meilleur rendement. Ce sont les panneaux solaires monocristallins qui sont plus utilisés car ayant un meilleur rendement de l'ordre de 16-24 % (Madogni et al.,

2016).

- **Les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin**
  Elles sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elles sont faites du silicium fondu qui se solidifie. Lorsqu'il refroidit, il ne forme qu'un seul cristal découpé en fines tranches (Notton et al., 2010). Lors de cette étape, le silicium fondu se solidifie et forme un seul cristal de grande dimension (Zerga et al., 1998). Enfin, le cristal est découpé en fines portions qui donneront les cellules. Avec cette technologie, la production des panneaux solaires est optimale. En effet, les cellules monocristallines offrent le meilleur rendement (jusqu'à 20 %) et une bonne durée de vie (jusqu'à 30 ans). Dans le commerce, elles offrent un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire (Dubois, 2007; Papet, 2007; Abbad, 2019).

- **Les cellules photovoltaïques au silicium polycristallin**
  Elles sont formées à partir de silicium refroidi mais qui, au lieu de ne former qu'un seul bloc, se transforme en une multitude de cristaux (Zaidi et al., 2011). Avec cette technologie, le rendement est excellent et le coût moins élevé. En général, leur rendement est compris entre 12 et 14%. Elles sont plus simples à fabriquer et moins chères que les cellules au silicium monocristallin (Nouet et al., 1987; Hamzaoui, 2018).

- **Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe**
  Il s'agit de cellules en silicium souples et robustes permettant une pose sur des surfaces et des toitures courts. Leur rendement de conversion est de l'ordre de 10% (Keshner et al., 2008). C'est certes beaucoup moins élevé par rapport aux cristallines (Posthuma et al., 2005). Néanmoins, les avantages sont leur résistance aux températures élevées et leur fonctionnement avec un éclairage faible (Avagliano et al., 1999; Deneuville et al., 1980).

- **Les cellules photovoltaïques en couche mince de tellurure de cadmium (CdTe)**
  Elles ne sont pas fabriquées à partir de silicium. Ainsi leur composant de base est le tellurure de cadmium (McCandless et al., 2011). Par conséquent, le tellurure de cadmium est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre (Bonnet et al., 1998). Cette technologie augmente le rendement des panneaux solaires de 10-11% (Swanson, 2005), tout en diminuant leur coût, grâce à une meilleure capacité d'absorption de la lumière et à un coefficient thermique bas (Cyrs et al., 2014; Chen et al., 2017).

- **La cellule photovoltaïque multi-jonction**
  Elle se compose de différentes couches de matériaux semi-conducteurs qui convertissent chaque rayon solaire, quelle que soit l'exposition. Les couches sont empilées, formant la cellule photovoltaïque multi-jonction (Das et al., 2015). Ces cellules peuvent fournir un rendement de conversion de 13,3 % (Oh et al., 2020).

- **Les cellules solaires organiques**
  Elles sont composées de matériaux semi-conducteurs de synthèse. Elles sont appelées souvent cellules à colorants, cellules à polymères ou encore cellules à pérovskites (Hou et al., 2018). Elles sont élaborées à partir de fines couches organiques déposées dans une solution liquide placée entre deux électrodes. Le faible coût de la fabrication et la non-toxicité des matériaux renouvelables utilisés en font une solution d'avenir très intéressante (Chen et al., 2017). En plus, elles peuvent donner un haut rendement de l'ordre 16,64 % (Zhou et al., 2020)

1.3 Objectifs et plan du manuscrit de thèse

1.3.1 Objectifs

Dans le but d'exploiter l'important gisement solaire du Sahel, la prise en compte de l'aspect poussière déposée sur la surface des modules solaires est impérative. Pour cela, une connaissance complète de la poussière Saharienne est indispensable. Cela va de la caractérisation saisonnière des flux de dépôt en passant par les propriétés physico-chimiques des particules jusqu'à l'impact du dépôt de poussière sur les paramètres optiques et électriques des panneaux solaires. Tout cela dans un but future de mettre en place des outils adaptés pour le nettoyage des panneaux PV. Ainsi, cette thèse permettra de répondre à un certain nombre de questions scientifiques que sont:

- Le cycle saisonnier, mensuel et annuel du dépôt sec de la poussière dans notre région ?

- L'impact du dépôt de la poussière sur la production des panneaux solaires ?

- Les caractéristiques physiques des particules se déposant sur les installations solaires ?

- Évaluation des pertes optiques et électriques dues au dépôt de poussière sur la surface des panneaux PV?

L'ultime étape de cette thèse est de rendre les panneaux solaires intelligents, c'est-à-dire d'en faire des objets connectés. L'idée originale est de recueillir un certain nombre d'informations dans l'environnement dans lequel, les panneaux sont installés (ensoleillement, puissance produite en fonction de la puissance nominale des panneaux, les besoins en énergie, le dépôt sec de poussière, la quantité de particule dans l'air, ...) et d'en déduire, grâce à un système décisionnel, une métrique qui permet de connaître avec suffisamment de précision le niveau critique. Le gain en puissance qu'on peut atteindre en nettoyant les panneaux solaires de façon optimale permettrait de bien améliorer la performance des panneaux PV. Un système d'alerte permettra ainsi de savoir en temps réel qu'un nettoyage est nécessaire ou pas.

1.3.2 Plan du manuscrit de thèse

Le plan de cette thèse suit une séparation en trois parties. La première partie est constituée des chapitres **I** et **II**. Le chapitre **I** décrit le contexte et l'objectif général de notre étude. Le chapitre **II** présente les techniques de caractérisations des échantillons de poussières sahariennes collectés sur les surfaces des panneaux PV, les modèles et données atmosphériques utilisés durant toute la thèse.
La deuxième partie est constituée de trois chapitres (**III**, **IV** et **V**). Elle présente les résultats obtenus durant cette étude. D'abord, le chapitre **III** présente les résultats issus de la caractérisation saisonnière du dépôt sec de la poussière désertique en Afrique de l'Ouest et au Sénégal. Ensuite, le chapitre **IV** analyse les échantillons prélevés sur les surfaces des panneaux solaires installés à Dakar. Il présente la composition, la taille et la morphologie des poussières collectées sur les surfaces des panneaux solaires. Après, le chapitre **V** étudie d'une part les pertes en propriétés optiques tels que, la réflectance et la transmittance du rayonnement solaire. Pour terminer cette partie des résultats de la thèse, ce chapitre **V** évalue d'autre part, les pertes dues aux dépôts secs de poussière des paramètres électriques comme le courant de court-circuit, le rendement de conversion et la puissance produite sur les cellules photovoltaïques de siliciums.
Enfin, la troisième partie est le chapitre **VI** qui est divisé en deux volets : Le premier volet est une conclusion générale de la thèse. Cette partie rappelle la problématique du dépôt de poussière sur les surfaces des panneaux solaires en milieu urbain. Aussi, elle présente la méthode utilisée et les conclusions qui doivent en être tirées. Le second volet regroupe les perspectives issues des résultats acquis dans cette étude.

Chapitre 2

Données et Méthodes

2.1 Préambule

Ce chapitre pose les fondamentaux techniques de cette thèse. En effet, les données, la modélisation et la méthodologie constituent entre autres la matière première des travaux de recherche. D'abord, nous présentons le site expérimental qui est constitué des panneaux solaires installés à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar et les données utilisées dans cette thèse. En effet, les données sont constituées de mesures in situ issues du photomètre de la station AERONET (AERosol RObotic NETwork) de Dakar. Il s'agit entre autres, des données d'épaisseur optiques des aérosols (i.e. quantité de poussière), de l'indice de réfraction de la poussière et de la distribution en taille des aérosols. Ensuite, à l'aide de modèles climatiques, une caractérisation des flux de dépôt des poussières a été effectuée. Après, des échantillons de poussières ont été collectés sur la surface des panneaux solaires pour une caractérisation physico-chimiques complète de cette poussière. Ainsi, toutes les techniques de caractérisation en sciences des matériaux utilisées pour caractériser la poussière prélevée seront présentées dans cette partie. Et enfin, nous présentons les codes que nous avons développés pour évaluer les pertes optiques et électriques dues à la présence de la poussière sur la surface des modules PV à Dakar.

2.2 Présentation du site d'étude et des données

2.2.1 Présentation du site d'étude et des échantillons prélevés

L'objectif principal de cette thèse est d'évaluer l'impact du dépôt de poussière sur la production des panneaux solaires à Dakar. Pour cela, le site expérimental situé à l'Université de Dakar (16,95°W-14,40°N) comportant plusieurs panneaux solaires a été choisi comme terrain d'étude pour mener á bien notre travail.

Nous avons laissé la poussière se déposer et s'accumuler sur la surface de ces panneaux pendant plus d'une année entre Octobre 2016 et Juin 2017 comme le montre la figure 2.1-**a**. La figure 2.1-**b** montre les échantillons collectés sur la surface de ces panneaux pour la caractérisation complète de cette poussière.

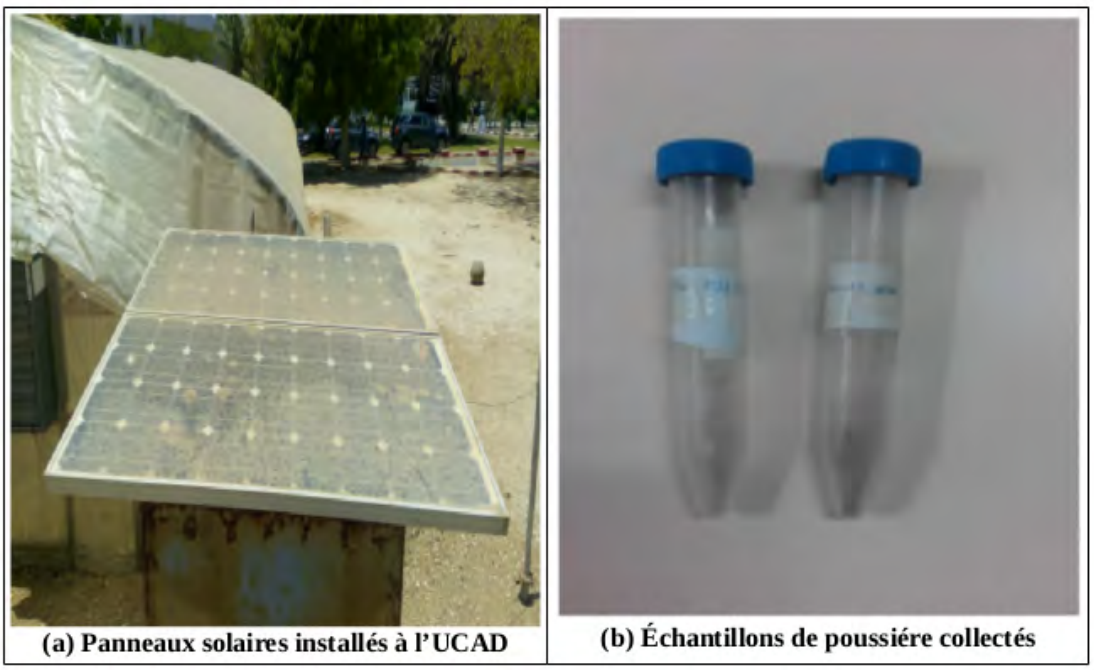

Figure 2.1: (a) Panneaux photovoltaïques à l'Université de Dakar , (b) échantillons de poussières collectés.

2.2.2 Présentation des données AERONET

Pour quantifier la poussière contenue dans l'atmosphérique de Dakar (poussière avant le dépôt), les données issues du photomètre AERONET de Dakar ont été utilisées. En effet, le projet AERONET, est un réseau constitué de photomètres automatisés distribués globalement sur plus de 200 sites du monde (Holben et al., 1998). Ainsi, AERONET archive de manière opérationnelle les mesures d'atténuation d'irradiation solaire et de brillance du ciel effectués par les photomètres. Ce réseau fournit une base de donnée robuste en épaisseurs optiques des aérosols. Ces données peuvent être utilisées comme référence pour la validation des modèles numériques et des inversions satellites. On peut les télécharger gratuitement sur le lien `http://aeronet.gsfc.nasa.gov/` (Holben et al., 1998).

Dans ce travail nous utilisons l'épaisseur optique, les indices de réfraction (réel et imaginaire) et la distribution en taille mesurés par le photomètre solaire installé à Dakar. En effet, l'épaisseur optique (AOD) est une grandeur sans unité. Elle est liée à la quantité d'aérosols dans l'atmosphère. Plus l'épaisseur optique est grande, moins la lumière traverse le matériau (Chin et al., 2002). Elle caractérise la transparence de l'atmosphère. Cette transparence de l'atmosphère peut être altérée par plusieurs facteurs comme la présence de nuages, d'aérosols mais aussi par les molécules de l'atmosphère elles-mêmes. L'épaisseur optique d'aérosols décrit plus spécifiquement à quel point les aérosols affectent le passage de la lumière à travers l'atmosphère, pour une longueur d'onde donnée (Nakajima et al., 1990). Dans cette thèse, nous avons utilisé l'AOD d'AERONET pour valider celles fournies par les modèles Merra-2 et Aladin. Cette validation de l'AOD de ces deux modèles a permis de caractériser le dépôt sec de la poussière en Afrique de l'Ouest et au Sénégal. Ces mesures in situ issues du photomètre d'AERONET fournissent également les indices de réfraction (reél et imaginaire) des poussières pour quatre longueurs d'onde. Ces indices de réfractions permettront de valider ceux mesurés par l'ellipsomètre, lesquels serviront à leur tour de paramètres d'entrée des modèles optiques et électriques utilisés dans cette thèse. En effet, ces modèles étudient d'une part les pertes en réflectance et en transmittance du rayonnement solaire arrivant sur les surfaces des panneaux solaires et d'autre part, permettent d'évaluer les pertes des paramètres électriques des cellules photovoltaïque à base de silicium dues au dépôt de poussière. Et enfin, la distribution en taille des particules de poussière présentes dans l'atmosphère, fournie par le photomètre permet d'avoir une idée sur la taille des particules .

2.3 Présentation des techniques de caractérisation

2.3.1 Introduction

Trois échantillons de poussières ont été collectés puis envoyés à trois endroits différents pour diversifier les techniques de caractérisation. Il s'agit du laboratoire Ithemba Lab (Afrique du Sud), du laboratoire de l'Université de Nebraska (USA) et du Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (Laplace) de Toulouse (France). Ces études ont permis d'effectuer une caractérisation complète des propriétés structurelles, physico-chimiques et radiatives de la poussière collectée sur les surfaces des panneaux photovoltaïques à Dakar. Pour cela, plusieurs techniques de caractérisation en sciences des matériaux ont été utilisées. Il s'agit entre autres de la diffraction des rayons X (DRX), de la Microscopie Électronique à Balayage (MEB), de la Spectroscopie à Rayon X (EDS), de la Fluorescente des rayons X (XRF), des techniques de synthèse des couches minces, de l'Ellipsométrie, de la Microscopie optique numérique, de la Spectrophotométrie UV-visible et de la réflectance diffuse.

2.3.2 Diffraction des Rayons X (DRX)

Pour obtenir des informations sur les structures cristallines, les substances minéralogiques, les phases et les molécules contenues dans les poussières collectées, nous avons utilisé la technique de l'analyse de la diffraction des rayons X. Cette technique permettra de connaître les distances entre les plans atomiques des substances cristallines de la poussière collectée. Puisque chaque substance cristalline possède une série de plans atomiques qui lui est propre, un spectre de DRX nous renseignera sur l'ensemble de ces plans et en permettra l'identification des molécules présentes dans l'échantillon (Courtney et al., 1997). La méthode générale de la DRX consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à analyser l'intensité des rayons X qui sont diffusés selon l'orientation dans l'espace (Piga et al., 2009; Xi et al., 2004). Ensuite, les rayons X diffusés interfèrent entre eux. Après, l'intensité présente des maxima dans certaines directions. On enregistre l'intensité détectée en fonction de l'angle de déviation 2θ du faisceau (Piga et al., 2009; Xi et al., 2004). En effet, cette technique d'analyse est applicable aux matériaux cristallisés tels que les minéraux, métaux, céramiques, produits organiques cristallisés.

2.3.3 La Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

Pour connaître la morphologie (forme, dimension, arrangement de particules de poussière ...) des particules collectées, une analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB) a été effectuée. Elle fournira aussi des informations sur la taille et la forme des grains élémentaires ou agglomérats selon le grossissement choisi. Ainsi, le principe de cette technique d'analyse repose sur l'interaction entre la lumière et la matière. Il est décrit ci-dessous et est basé sur l'analyse des électrons secondaires (McDonald et al., 2002).

- Elle se base sur la détection des électrons secondaires émergent de la surface sous l'impact d'un faisceau très fin d'électrons primaires. Ces derniers balaient la surface d'un échantillon où se produisent des interactions électrons-matière dans une zone appelée poire d'interaction (Todokoro et al., 1999; Lametschwandtner et al., 1984).

- Les électrons secondaires sont initialement liés à l'atome et éjectés par absorption d'une partie de l'énergie d'un électron incident. Ces électrons donnent en imagerie des informations topographiques de la surface de l'échantillon d'une profondeur de moins de 10 nm. Ils permettent aussi d'obtenir des images de la surface et sur la taille des grains et des agglomérats. En effet, ces images permettent aussi de repérer les défauts présents tels que, les porosités ou les fissures (Sahli, 2015). Cette zone est détectée par un capteur qui contrôle la brillance d'un oscilloscope cathodique dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons (Lametschwandtner et al.,

1984; Mariano et al., 2020). Dans ce cas, on distingue plusieurs types d'électrons réémis :

- Les électrons rétro-diffusés sont produits par interaction entre les électrons primaires et les noyaux des atomes. Ces électrons ont une énergie élevée et sont réémis dans une zone pouvant atteindre quelques micromètres de profondeur. Cette technique fait apparaître plus clairs les éléments les plus lourds et très sombre pour les plus légers. Cela permet de repérer la répartition des différentes phases dans les matériaux composites.

- Enfin, les photons X sont émis par désexcitation du cortège électronique des atomes dont un électron de cœur a été attaché sous l'impact électronique. Ce rayonnement X, donne des informations chimiques qualitatives et quantitatives de l'atome cible (Wang et al., 2012; Goldstein et al., 2017).

2.3.4 Fluorescence des Rayons X (XRF) et Analyse Dispersive en Énergie (EDS)

Dans ce travail, nous avons aussi effectué l'analyse de la fluorescence des rayons X (XRF) et celle dispersive en énergie (EDS) pour identifier les éléments chimiques présents dans les échantillons de poussière collectés sur les surfaces des panneaux PV de Dakar. Ces deux techniques sont complémentaires car chacune d'elle peut détecter des éléments que l'autre ne peut pas détecter. Par exemple la XRF ne détecte pas certains éléments légers comme l'Aluminium. Ainsi, pour obtenir une analyse complète nous avons jugé utile d'ajouter d'autres techniques comme EDS.

2.3.4.1 Fluorescence des rayons X, analyse XRF

Cette analyse nous a permis d'identifier une partie des éléments chimiques qui composent l'échantillon de poussière. Le principe consiste à placer l'échantillon à analyser sous un faisceau de rayons X. Ensuite, les atomes de l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité sous l'effet des rayons X. Comme l'état excité est instable, les atomes auront tendance à revenir à l'état fondamental tout en libérant de l'énergie, sous forme de photons X (Thirion-Merle, 2014). Ainsi, chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres (Jenkins, 1999). Ceci est appelé phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X

secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique (Beckhoff et al., 2007). Cette technique est bien détaillée par Shackley (2010). Cependant, elle détecte seulement les éléments lourds.

2.3.4.2 La Spectroscopie à rayon X à dispersion d'énergie (EDS)

Pour compléter l'analyse des éléments chimiques, nous avons effectué l'analyse dispersive en énergie EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometry). Cette analyse permet d'obtenir la composition élémentaire de la poussière mais aussi leur pourcentage en masse. Son principe consiste à envoyer un faisceau d'électron primaire. Ainsi, le faisceau d'électrons primaires générés au sein du canon du microscope interagit avec les atomes de l'échantillon sous forme de chocs de type inélastiques:

- Ensuite, ces atomes sont ionisés; ils passent de l'état fondamental à l'état excité par l'éjection d'un électron, en général de valence. Cet électron libéré est appelé électron secondaire. Les atomes excités retournent à leur état d'équilibre en réaménagent leur cortège électronique. Ce mécanisme produit des rayons X. En plaçant un détecteur dans la chambre du microscope, ce rayonnement peut être détecté et enregistré. Deux types de détecteurs peuvent être utilisés fonctionnant soit en dispersions d'énergie (EDS), soit en dispersion de longueur d'onde (WDS) (Despujols, 2000).

- Les détecteurs fonctionnant en dispersion d'énergie sont constitués par une partie active en silicium. Les photons X incidents créent des paires électrons-trous. Grâce à la polarisation du détecteur, les électrons migrent vers l'anode et un courant de fuite est enregistré. Ce courant est proportionnel à l'énergie du photon X incident. De la sorte, les transitions radiatives propres à chaque élément peuvent être identifiées par des pics sur le spectre. La surface de chacun des pics est corrélée à la teneur de l'élément dans le composé et à l'énergie du faisceau primaire.

2.3.5 Synthèse des couches minces et la spectrophotométrie

2.3.5.1 Synthèse des couches minces

Une couche mince est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. Ces revêtements modifient les propriétés du substrat sur lesquels ils sont déposés (Eberspacher et al., 1986).
Dans notre travail, nous avons réalisé des couches minces de poussières déposées sur des substrats de verre avec un spin coater au laboratoire Laplace de Toulouse durant notre

séjours de quatre mois. Ensuite, nous mesurons la transmittance du rayonnement solaire avec un spectrophotomètre traversant cette couche de poussière. Cette transmittance mesurée a permis de valider la transmittance simulée par notre modèle implémenté. Les couches minces sont principalement utilisées dans des domaines tels que, la fabrication de composants électroniques, des cellules photovoltaïque, des revêtements décoratifs ou anti-reflets (Maache, 2005). Dans cette thèse, nous avons utilisé la technique de sol-gel plus particulièrement l'enduction (spin-coating) pour l'élaboration des couches minces de poussières.

2.3.5.2 Poste de Sécurité Microbiologique (PSM)

La préparation de nos échantillons a été effectuée au poste de Sécurité Microbiologique (PSM) à extraction partielle et barrière de protection comme le montre la figure 2.2. Cet appareil nous a permis de faire la finition de l'échantillon de poussière dans un environnement sécurisé. Les PSM sont conçus pour protéger l'opérateur et l'environnement des contaminations cytotoxiques microbiennes. Ils disposent de l'air dépoussiéré et stérile qui sort du filtre principal de type très haute efficacité, assurent les conditions optimales de laminarité au dessus de la surface de travail grâce à la perforation de celle-ci et à la barrière d'air frontale. Les caractéristiques d'aspiration et de débit de la veine de garde évitent les échanges entre l'air intérieur, potentiellement contaminé et l'extérieur. Une documentation très large de l'appareil est décrite par Osborne et al. (1999). Les PSM de Type II permettent la manipulation d'agents biologiques à caractère pathogène reconnus pour l'homme ou l'animal. Ils assurent une protection en cas de présence d'une concentration importante de matériel biologique, présence d'agents susceptibles de causer des altérations génétiques ou des activités synergiques avec d'autres produits, manipulation de virus oncogènes. Ils sont utilisés dans plusieurs domaines tels que, la préparation et manipulation de cytotoxiques, de produits chimiothérapeutiques. En outre, les PSM répondent aux normes standards (EN 610101 et EN 61326) selon les directives européennes applicables quant à l'inscription de marque de certification (CE) (Kennedy et al., 2000).

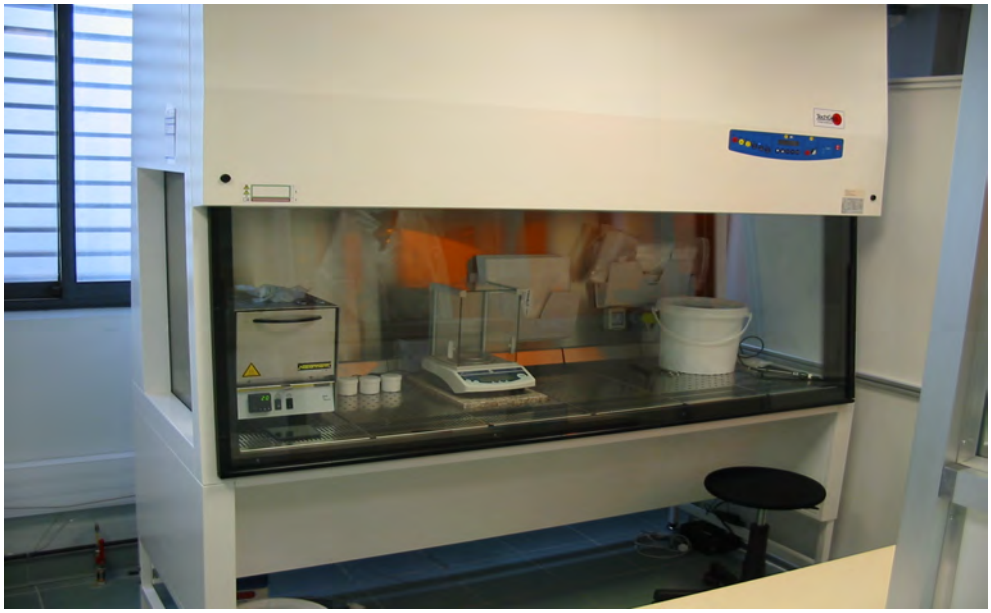

Figure 2.2: Poste de Sécurité Microbiologique (Laboratoire Laplace).

2.3.5.3 Technique sol-gel

Dans notre travail, nous avons utilisé cette technique afin de déposer des couches minces de poussière sur les substrats de verre avec un spin coater. Cette couche de poussière comme le montre la figure 2.3 sera utilisée pour déterminer les indices de réfraction des poussières collectées sur les surfaces des panneaux PV. Le principe de base du procédé de la solution-gélification (sol-gel) consiste à transformer une solution à base de précurseurs en phase liquide, en un solide par un ensemble de réactions chimiques de type polymérisation à température ambiante (Olvera et al., 2001). Les techniques de spin-coating et de dip-coating sont les plus utilisées.

- Pour le dip-coating, le revêtement de la couche sur le substrat s'effectue par tirage lent (quelques cm/mn) d'un substrat immergé préalablement dans le sol (Brinker et al., 1991).
- Le procédé de spin-coating consiste à étaler le sol par centrifugation sur un substrat tournant à vitesse élevée (plusieurs milliers de tours par minute). Généralement, ce procédé est décrit par quatre étapes. Tout d'abord, un excès de sol est déposé sur le substrat immobile. Puis, le substrat est mis en rotation et le liquide s'étale. L'excès de liquide déposé est évacué par la force centrifuge. Enfin, le solvant s'évapore et le gel se forme (Hall et al., 1998).

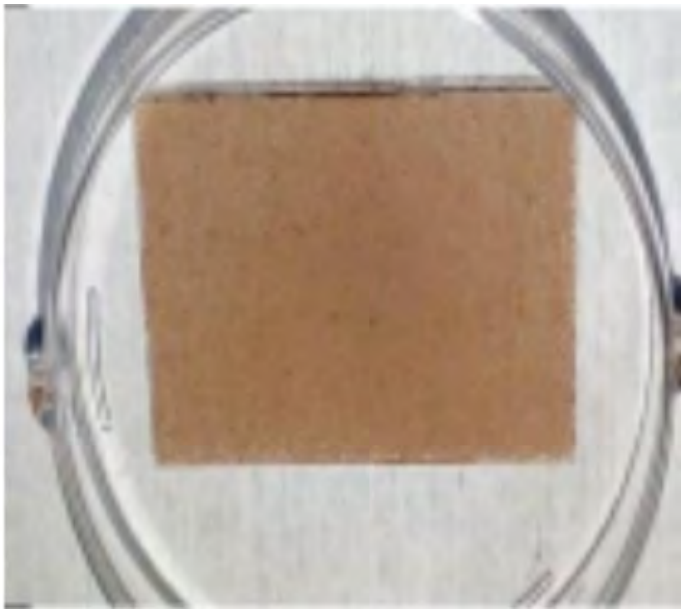

Figure 2.3: Couche de poussière déposée sur un substrat de verre de surface 8,64 cm^2.Vitesse de 20 tr/s pendant une durée de 30 s avec un recuit de 5 min 60°C sur une plaque chauffante.

2.3.6 La spectrophotométrie UV-Visible et Réflectance diffuse

2.3.6.1 La spectrophotométrie UV-Visible (HP 8452A Diode-tableau)

Dans cette étude, le spectrophotomètre à faisceau unique commandé par un microprocesseur dans le Visible/UV sur la gamme de 190 à 820 nm avec une résolution de 2 nm est utilisé pour envoyer un rayonnent électromagnétique sur la couche mince de poussière décrit à la figure 2.3. Il mesure la transmittance de ce rayonnement et celle du verre propre de référence. Cette transmittance mesurée permettra de valider celle issue de la modélisation des pertes du rayonnement solaire atteignant les surfaces des cellules PV. La spectrophotométrie est une méthode analytique quantitative qui consiste à mesurer l'absorbance ou la transmittance d'une substance chimique. Cette technique consiste à émettre un faisceau de lumière à partir d'une source. Ce faisceau est décomposé par un monochromateur, de telle sorte qu'on obtienne un faisceau de lumière approximativement monochromatique (Girard et al., 1982). Le faisceau traverse alors une cuve. La cuve qui peut être en quartz, verre ou en plexiglas doit être à faces parallèles pour éviter des effets de lentille. Elle est de longueur utile (longueur optique) et renferme le produit absorbant, à la concentration (C). Cette longueur optique vaut couramment 1 cm, mais il est possible

d'utiliser des cuves de plusieurs cm. Le rayon lumineux ayant traversé la cuve, est ensuite focalisé sur un détecteur comme le montre la figure 2.4. Celui-ci convertit le flux énergétique lumineux reçu en un signal électrique (Jassim et al., 2013).

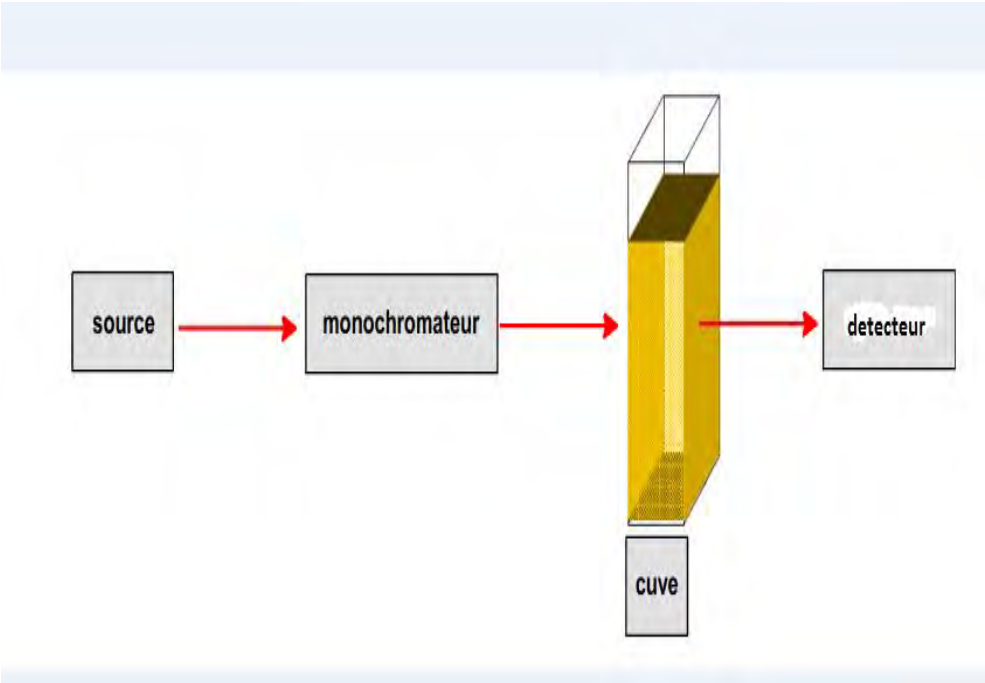

Figure 2.4: Principe du spectrophotomètre.

2.3.6.2 La Réflectance diffuse (spectrophotomètre modèle Cary 2300)

L'interaction entre la lumière et les particules de poussière sur la gamme de longueur d'onde 250-2500 nm a été étudiée grâce à l'analyse de Spectroscopie en Réflectance Diffuse (SRD). Pour les mesures de réflectance diffuse, on a utilisé un spectrophotomètre double faisceau UV-Visible-PIR (205-2500nm), modèle Cary 2300, équipé d'une sphère d'intégration de 10 cm de diamètre. L'intérieur de la sphère est recouverte de halo (polytétrafluoroéthylène). Le halon a la propriété de réfléchir environ 100% les radiations d'une grande partie de la région d'étude. On peut donc l'utiliser comme référence (Gugliermetti et al., 2004). Cette analyse permet de connaître la capacité diffusive des poussières en présence de lumière. La SRD est une technique utilisée avec un spectrophotomètre (ultra-violet-Proche-Infra Rouge) UV-PIR pour étudier les caractéristiques spectrales d'échantillons de différent types tels que, les solides opaques, poudres, cristaux, ... Elle est basée sur le principe de la réflexion spéculaire et celle diffuse. La réflexion diffuse est l'ensemble du rayonnement diffusé, soit directement par la surface soit après de multiple réflexions à l'intérieur du matériau. En effet, quand un rayon de lumière de longueur d'onde atteint

la surface d'un milieu dont l'épaisseur est importante par rapport à la longueur d'onde, il peut faire l'objet d'un phénomène de réfraction, réflexion, absorption ou diffusion, par exemple. Ce phénomène dépend de la composition du matériau, de sa structure interne et de l'état de sa surface (Roig, 2015). Ainsi, la spectrométrie de réflexion diffuse est basée sur l'interaction d'un faisceau lumineux avec un milieu pulvérulent. D'ailleurs, ces phénomènes contribuent à renvoyer de manière diffuse une partie de la radiation incidente dans l'hémisphère entourant l'échantillon. L'intensité de la lumière renvoyée dépend aussi des propriétés optiques de l'échantillon par exemple de l'indice de réfraction et d'absorption, taille, morphologie et état de surface des particules (Roig et al., 2016). Ainsi, pour mesurer le spectre de réflexion diffuse, on dilue l'analyte dans un milieu dispersif non absorbant et on utilise un spectre de référence. Cette dilution est indispensable pour minimiser certaines distorsions spectrales et éviter la saturation de certaines bandes d'absorption. Cette technique est détaillée dans les travaux de Ueda et al. (2005).

2.3.7 L'éllipsométrie (éllipsométre spectroscopique Sopra GES-5E)

Après avoir réalisé les couches minces de poussières déposées sur les substrats de verre, nous avons utilisé un éllipsométre spectroscopique Sopra GES-5E decrit par Desmarchelier (2014)pour déterminer les indices de réfractions (imaginaires et réels) des échantillons sur une très large gamme de longueur d'onde. Ces indices optiques ont été comparés à ceux mesurés par la station AERONET de Dakar. Ils seront considérés comme paramètres d'entrée de nos modèles pour une étude approfondie des pertes des propriétés optiques et électriques du rayonnement solaire en présence du dépôt sec de poussière sur les surfaces des panneaux PV. L'éllipsométrie est une technique de caractérisation des couches minces. Elle est utilisée dans plusieurs domaines (Tompkins et al., 2005). Cette technique offre des capacités inégalées pour la métrologie des couches minces. Elle est sensible à la présence de surface et d'interface. L'ellipsométrie permet de caractériser les épaisseurs des couches avec une résolution à l'angström (Shim et al., 2004; Azzam et al., 1977). Le principe de la technique repose sur la mesure du changement de l'état de polarisation d'un faisceau lumineux après réflexion sur une surface. Il mesure physiquement deux paramètres tels que, l'état de polarisation de la lumière et l'intensité du rayonnement réfléchi (Fujiwara, 2007). Les paramètres physiques de l'échantillon analysé sont issus de modèles des interactions onde-matière. La technique permet d'obtenir des informations sur la surface d'un échantillon massif, sur le volume d'un film mince ou encore sur les interfaces (Richter et al., 2005).

Elle présente plusieurs avantages (Tompkins et al., 1999). Elle est très simple, rapide à mettre en œuvre, non destructif, permet des suivis in-situ en temps réel et elle est applicable à une très large gamme d'échantillons (Richter et al., 2005).

2.3.8 Microscope optique numérique Kéyence

Le microscope optique numérique de type VHX-1000 (Kéyence) du laboratoire Laplace nous a permis de mesurer l'épaisseur des couches minces de poussière déposées sur les plaques de verre. De plus, le Kéyence servira à visualiser la morphologie des poussières avec des images de haute qualité. Le VHX-1000 est un outil polyvalent qui permet d'effectuer des observations nettes d'objets en trois dimensions (3D) grâce à une profondeur de champ 20 fois supérieure à celle d'un microscope optique conventionnel comme représenté à la figure 2.5. Il dispose d'un jeu d'optique très complet (20x-200x, 100x-1000x, 500x-5000x) et un système d'observation orientable soit avec un éclairage par réflexion inclinable ou avec un éclairage par transmission. Il permet de faire des images de grande qualité sur des échantillons très variés tels que, des lames minces, des sections polies et des échantillons macroscopiques (Adeyemi et al., 2009).

Figure 2.5: Microscope optique numérique.

Les applications de ce type d'instrument sont diverses. On peut citer entre autres : l'imagerie á deux dimensions (2D) et la cartographie haute résolution de lames minces. Il permet aussi de faire l'acquisition d'image optique á trois dimensions (3D) rapide (images tridimensionnelles) de haute-résolution pour toutes les applications industrielles et dans le domaine des sciences du vivant. C'est un instrument, flexible grâce à ses configurations pratiques dont un support motorisé, inclinable qui est équipé d'objectifs hautes performances en amenant le grandissement jusqu'à x5000 fois comme le montre la figure 2.5. La platine motorisée en X-Y et Z permet la reconstitution d'images 3D (Zhang et al., 2006).

2.4 Présentation des modèles climatiques de dépôt de poussière

Le cycle des poussières est composé de trois phases qui sont : l'émission, le transport et le dépôt. Le processus de dépôt qui est notre sujet d'étude est assez complexe et difficile à mesurer, car il dépend de plusieurs paramètres atmosphériques (vitesse et direction du vent, température, humidité, ...) et il existe de faible d'instrument de mesures in situ. Ainsi, pour déterminer les flux de dépôt des poussières à Dakar, nous avons eu recours à des modèles climatiques intégrant des modules de dépôt de poussières. Dans ce travail, nous avons utilisé deux modèles climatiques intégrant le dépôt sec de poussières que sont ALADIN et MERRA-2. Grâce aux simulations de ces modèles nous avons caractérisé les épaisseurs optiques et les flux de dépôt de poussière en Afrique de l'Ouest et plus particulièrement au Sénégal. Ainsi, nous allons valider les résultats des simulations des épaisseurs optiques des modèles par les AOD mesurées à la station AERONET de Dakar et celles du dépôt, par des poussières collectées durant des campagnes dans la zone par Skonieczny et al. (2013). Cette validation nous permettra ensuite d'étendre nos simulation dans tout le Sahel.

2.4.1 ALADIN

Premièrement, nous avons utilisé ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational) pour simuler les flux de dépôts de poussière en Afrique de l'Ouest et au Sénégal durant la période 2006-2010. Nous avons effectué des simulations mensuelles et journalières pour la période comprise entre le 1er janvier 2006 et le 31 décembre 2010. Les intégrations numériques sont effectuées sur un domaine assez large (4°S-40°N, 40°W-50°E) incluant toutes les sources d'émission de poussières dans le Sahara et celles de la partie occidentale du désert d'Arabie. Ce choix réduit les erreurs de prédiction des concentrations de poussières dues au couplage latéral, car aucune modélisation de la poussière n'est incluse dans le modèle global de couplage. D'ailleurs, nous avons pris soin de nous assurer

qu'aucune zone d'émission de poussière n'était présente à l'extérieur et à proximité du domaine de la zone limitée. Le domaine de post-traitement a été volontairement diminué afin de faciliter l'exploitation des résultats; il s'étend de 2°N à 38°N et de 39°W à 45°E. La résolution horizontale est de 20 x 20 km avec 60 niveaux verticaux; de la surface à 67 km et avec un pas de temps de 600 secondes (Farda et al., 2010). ALADIN est un modèle, bi-spectral à aire limitée, développé par la Météo-France (Horányi et al., 1996). En plus, ce modèle est un résultat de la collaboration entre cette dernière et le Centre Européen de Prévision Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) (Nabat et al., 2020; Daniel et al., 2019). Historiquement, il a été développé depuis le début des années 1990 au sein d'un large consortium regroupant des centres météorologiques en Europe et en Afrique du nord (Csima and Horányi, 2008). C'est un modèle de prédiction numérique atmosphérique spectral d'équations primitives utilisant un schéma d'intégration semi-implicite, semi-lagrangien à deux niveaux et une initialisation de filtre numérique (Bubnová et al., 1995; Radnóti, 1995). Il est muni d'une table d'interpolation permettant de simuler les propriétés optiques des aérosols désertiques (Farda et al., 2010). Il est conçu pour tourner jusqu'à une résolution de 7 à 10 km, ce qui en fait un outil de prévision numérique fondamental sur des zones géographiques du globe où les modèles globaux ont une résolution plus grossière. ALADIN peut également être utilisé dans un système de descente d'échelle entre des modèles globaux et des modèles à aire limitée à très haute résolution, comme un outil de couplage intermédiaire. Toutes les étapes des variables pronostiques atmosphériques, processus aérosol, radiatif atmosphérique (gazeux, nuages, et aérosols), convection profonde et orographie dans le modèle ALADIN sont bien documentées dans les travaux de (Mokhtari et al., 2015; Farda et al., 2010; Mallet et al., 2019). Avec ce modèle, le transport de la poussière et les propriétés optiques sont calculés par le modèle d'aérosol log-normal inorganique organique à trois moments (ORILAM) développé par (Tulet et al., 2005). Ce modèle Log-normal étudie l'évolution de la composition de l'aérosol, le rayon moyen et des informations sur la distribution des aérosols (Binkowski et al., 2003). Le dépôt sec est calculé en utilisant le concept de résistance décrit par plusieurs travaux tels que, (Seinfeld et al., 2016; Cruz et al., 1997; Roupsard et al., 2013). La sédimentation des aérosols est déterminée par la vélocité gravitationnelle (Tulet et al., 2005; Nabat et al., 2015) et l'élimination par voie humide des aérosols de poussière est calculée à l'aide du sous-modèle SCAVenging (Tost et al., 2006; Tulet et al., 2010). Le dépôt sec et la sédimentation sont déterminés par la diffusivité brownienne (Tulet et al., 2005; Morcrette, 1989).
ALADIN est couplé au modèle global ARPEGE (Action de Recherche Petit Echelle Grande Echelle) (Courtier et al., 1991; Déqué et al., 1994). ARPEGE est un modèle de prévision numérique et planétaire qui fournit les conditions initiales et limites toutes les trois heures, c'est un élément fondamental pour la prévision opérationnelle du temps à Météo-France.

ARPEGE est aussi un modèle à équations primitives avec une troncature spectrale triangulaire sur l'horizontale, une résolution horizontale variable, une représentation en éléments finis sur la verticale et une coordonnée verticale hybride (Cassou and Terray, 2001). Il utilise un schéma temporel semi-lagrangien à deux niveaux, semi-implicite. La résolution horizontale du modèle ARPEGE est de 7,5 km environ sur la France et de 37 km aux antipodes. Sa résolution verticale est de 105 niveaux, avec un premier niveau à 10 mètres au dessus de la surface et un niveau supérieur à 70 km environ. Le pas de temps de ce modèle est de 360 secondes (Piazza et al., 2016).

2.4.2 MERRA-2

Le modèle de réanalyse rétrospective de l'ère moderne pour la recherche et les applications de la version 2 (MERRA-2) sera également utilisé pour simuler les dépôts de poussière au Sénégal durant la période 2006-2010. Il utilise le modèle du système et d'observation de la terre de la version 5 (GEOS-5) et assimile les types d'observation non disponibles avec son prédécesseur MERRA-1. Il inclut des mises à jour des modèles MERRA-1 et GEOS afin de fournir une analyse climatique complète au-delà du MERRA-1. Il permet une étape de développement pour une future analyse intégrée du système terrestre (Gelaro et al., 2017). MERRA-2 est un projet intermédiaire entre les anciennes données de MERRA-1 et la prochaine génération d'analyse du système terrestre envisagée pour la future réanalyse couplée (Rienecker et al., 2011). Il donne notamment des informations sur les champs d'aérosols en ligne qui interagissent avec les champs de rayonnement des modèles (aérosols directs et semi-directs) (Randles et al., 2017). Afin de mieux comprendre le rôle des aérosols dans le système climatique et leurs impacts sur la qualité de l'air, des efforts importants ont été déployés pour augmenter considérablement les observations spatiales et terrestres des aérosols (Kinne et al., 2005). Avec MERRA-2, les aérosols sont simulés avec une version couplée radiativement du modèle de chimie, d'aérosol, de rayonnement et de transport de Goddard (GOCART) développé par Chin et al. (2002); Colarco et al. (2010). Ainsi, la poussière et le sel de mer ont des émissions dépendantes de la vitesse du vent. Notez qu'ils utilisent une climatologie moyenne mensuelle des champs d'oxydants dans GOCART (Textor et al., 2007).
Les processus d'élimination de l'atmosphère des aérosols comprennent le dépôt sec (y compris la sédimentation gravitationnelle), l'enlèvement par voie humide à grande échelle et le piégeage par convection. Le dépôt d'aérosol induit par les précipitations ne dépend pas des champs de précipitations générés par le modèle. Toutes les étapes du processus de dépôt atmosphérique et de poussière dans le modèle MERRA-2 sont bien documentées dans plusieurs travaux tels que, ceux de (Randles et al., 2017; Buchard et al., 2017; Reichle et al., 2017).

2.5 Modélisation des pertes des propriétés électriques et optiques en présence de poussières sur la surface des modules PV

2.5.1 Modélisation des pertes des propriétés optiques

Pour évaluer les pertes de transmittances et réflectances du rayonnement solaire en fonction du dépôt de poussière sur les surfaces des cellules PV, nous avons mis en place un modèle basé sur les équations physiques de Maxwell. Ce modèle géométrique permettra de déterminer l'impact de la poussière sur les propriétés optiques du rayonnement solaire, mais aussi de donner une idée sur les pertes de performances des panneaux PV au Sénégal.
Lorsqu'un faisceau lumineux arrive sur la surface plane de la couche de poussière déposée sur un panneau PV avec un angle oblique, son état de polarisation est modifié. Le champ électrique $\vec{E}$ caractérisant l'onde incidente est représenté par deux composantes orthogonales, notées E_p^i et E_s^i. Ces deux composantes correspondent respectivement aux composantes du champ électrique parallèles et perpendiculaires au plan d'incidence défini par le rayon incident et la normale à la surface. Les composantes du vecteur champ électrique de la lumière réfléchie sont notées E_p^r et E_s^r.
Dans notre étude, nous considérons une couche mince de poussière (milieu 1) d'épaisseur d_1 et d'indice de réfraction complexe n_1 contenu entre un milieu d'air (milieu 0) ambiant semi-infini d'indice de réfraction n_0 et un substrat de verre (milieu 2) d'indice de réfraction n_2. La figure 2.6 représente le dispositif modélisé avec ces différentes parties. Un rayon incident est partiellement réfléchi, absorbé ou transmis à chaque interface entre ces différents milieux et donne naissance à une infinité de rayons émergents. On note θ_0 l'angle d'incidence, θ_1 et θ_2 les angles de réfraction dans la couche de poussière et le substrat de verre. Le principe du modèle consiste à déterminer les coefficients de réflexion et transmission de Fresnel aux différentes interfaces afin de trouver la transmittance et la réflectance globale du système multicouche (figure 2.6). Toutes les équations utilisées dans cette partie sont documentées dans les travaux de (Azzam and Bashara, 1974; Born et al., 2013; Mishchenko et al., 1997; Gilliot and Christophe, 2006).

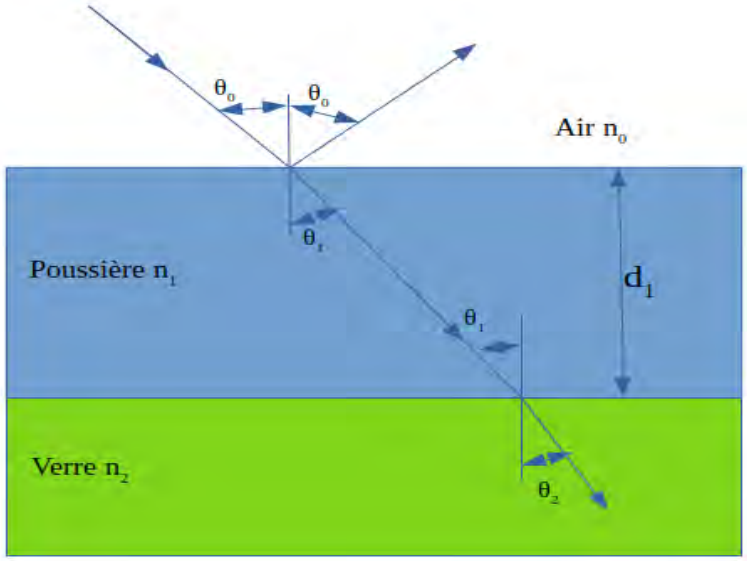

Figure 2.6: Réflexion de la lumière sur une couche mince de poussière déposée sur un substrat de verre.

La poussière est caractérisée par son indice de réfraction complexe qui varie en fonction de la longueur d'onde. Les formules des équations (2.1) représentent ces indices.

$$n_1(\lambda) = n(\lambda) - ik(\lambda) \qquad \text{a);} \quad k \ = \frac{\lambda}{4\pi}.\alpha(\lambda) \qquad \text{b)} \tag{2.1}$$

Avec :
n : partie réelle (indice de réfraction) et k partie imaginaire (coefficient d'extinction).
α : coefficient d'absorption de la couche de poussière et λ, longueur d'onde. A partir de ces indices, nous calculons les coefficients de réflexion et de transmission de Fresnel aux interfaces par application de la conservation des champs électriques et magnétiques détaillées dans plusieurs travaux (Mahdjoub et al., 2015; Born et al., 2013; Macleod, 2017). A partir des ces coefficients, nous calculons la transmittance, la réflectance et l'absorbance globale du système. Avec les systèmes multicouches, il est plus simple de déterminer ces coefficients par application de la théorie matricielle développée par (Berthier et al., 1981; Habell, 1968; Jacobsson, 1966).

Pour chaque couche du dispositif, les équations optiques spécifiques sont appliquées en fonction des indices de réfractions du milieu. Ainsi, pour chaque interface les équations sont déclinées comme suit :

- **Interface Couche Air/Poussière**

  Les coefficients r_{01p}, r_{01s}, t_{01p} et t_{01s} sont les coefficients de réflexion et de transmission de Fresnel à cet interface selon une polarisation P ou S. Ils ont été obtenus dans plusieurs travaux (Azzam and Bashara, 1974; Gilliot and Christophe, 2006).

$$n_0 sin\theta_0 = n_1 sin\theta_1 \tag{2.2}$$

$$r_{01p} = \frac{n_1 cos\theta_0 - n_0 cos\theta_1}{n_1 cos\theta_0 + n_0 cos\theta_1} \quad \text{a);} \qquad r_{01s} = \frac{n_0 cos\theta_0 - n_1 cos\theta_1}{n_0 cos\theta_0 + n_1 cos\theta_1} \quad \text{b)} \tag{2.3}$$

$$t_{01p} = \frac{2n_0 cos\theta_0}{n_1 cos\theta_0 + n_0 cos\theta_1} \quad \text{a);} \qquad t_{01s} = \frac{2n_0 cos\theta_0}{n_0 cos\theta_0 + n_1 cos\theta_1} \quad \text{b)} \tag{2.4}$$

- **Interface Couche Poussière/Verre**

  Les coefficients r_{12p}, r_{12s}, t_{12s} et t_{12p} sont les coefficients de réflexion et de transmission de Fresnel à cet interface selon une polarisation P ou S.

$$n_1 sin\theta_1 = n_2 sin\theta_2 \tag{2.5}$$

$$r_{12p} = \frac{n_2 cos\theta_1 - n_1 cos\theta_2}{n_2 cos\theta_1 + n_1 cos\theta_2} \quad \text{a);} \qquad r_{12s} = \frac{n_1 cos\theta_1 - n_2 cos\theta_2}{n_1 cos\theta_1 + n_2 cos\theta_2} \quad \text{b)} \tag{2.6}$$

$$t_{12p} = \frac{2n_1 cos\theta_1}{n_2 cos\theta_1 + n_1 cos\theta_2} \quad \text{a)} \qquad t_{12s} = \frac{2n_1 cos\theta_1}{n_1 cos\theta_1 + n_2 cos\theta_2} \quad \text{b);} \tag{2.7}$$

$$\beta = 2\pi . n_1 cos\theta_1 \frac{d_1}{\lambda} \tag{2.8}$$

β : différence de phase introduite par la réflexion d_1: épaisseur de la couche de poussière.

Les coefficients de réflexion et de transmission globaux du système s'écrivent (Sopori and Pryor, 1983):

$$r_p = \frac{r_{01p} + r_{12p}.\exp^{(-2i\beta)}}{1 + r_{01p}.r_{12p}.\exp^{(-2i\beta)}} \quad \text{a);} \qquad r_s = \frac{r_{01s} + r_{12s}.\exp^{(-2i\beta)}}{1 + r_{01s}.r_{12s}.\exp^{(-2i\beta)}} \quad \text{b)} \tag{2.9}$$

$$t_p = \frac{t_{01p}.t_{12p}.\exp^{(-i\beta)}}{1 + r_{01p}.r_{12p}.\exp^{(-i\beta)}} \quad \text{a);} \qquad t_s = \frac{t_{01s}.t_{12s}.\exp^{(-i\beta)}}{1 + r_{01s}.r_{12s}.\exp^{(-i\beta)}} \quad \text{b)} \tag{2.10}$$

Les transmittances et réflectances globales du système s'écrivent :

$$T_p = |t_p\overline{t_p}|.\frac{n_2 cos\theta_2}{n_0 cos\theta_0} \quad \text{a);} \qquad T_s = |t_s\overline{t_s}|.\frac{n_2 cos\theta_2}{n_0 cos\theta_0} \quad \text{b)} \tag{2.11}$$

$$R_p = |r_p\overline{r_p}| \quad \text{a);} \qquad R_s = |r_s\overline{r_s}| \quad \text{b)} \tag{2.12}$$

Les réflectances, transmittances et absorbances moyenne du système s'écrivent :

$$T = \frac{T_p + T_s}{2} \quad \text{a);} \qquad R = \frac{R_p + R_s}{2} \quad \text{b);} \qquad A = 100 - (R + T) \quad \text{c)} \tag{2.13}$$

2.5.2 Modélisation des pertes des propriétés électriques des cellules solaires

Après, les pertes optiques, nous avons aussi jugé utile d'évaluer les pertes électriques des panneaux solaires en présence de poussière sur leur surfaces. Ainsi, on modélise la cellule de silicium monocristallin installée dans un environnement poussiéreux comme étant un empilement de couches minces (poussière-verre-silicium) comme le montre la figure 2.7. Ensuite, nous utilisons le modèle proposée par Mahfoud (2018) pour évaluer les caractéristiques électriques de la cellule PV à structure PN.

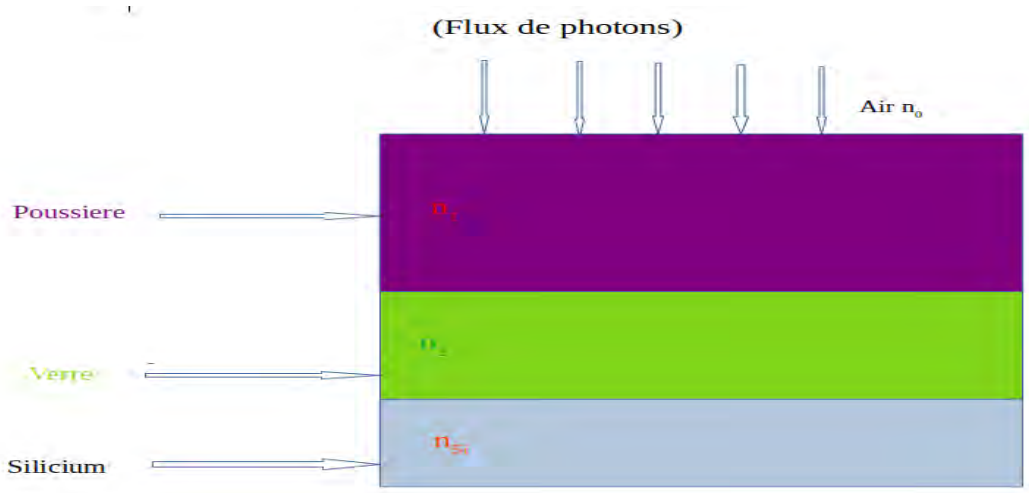

Figure 2.7: Dispositif d'empilement des couches pour évaluer les pertes électriques.

Pour étudier l'influence de la poussière sur la production énergétique de la cellule solaire à base de Silicium, on considère la couche de silicium comme étant une structure de jonction N-P comme représentée à la figure 2.8.

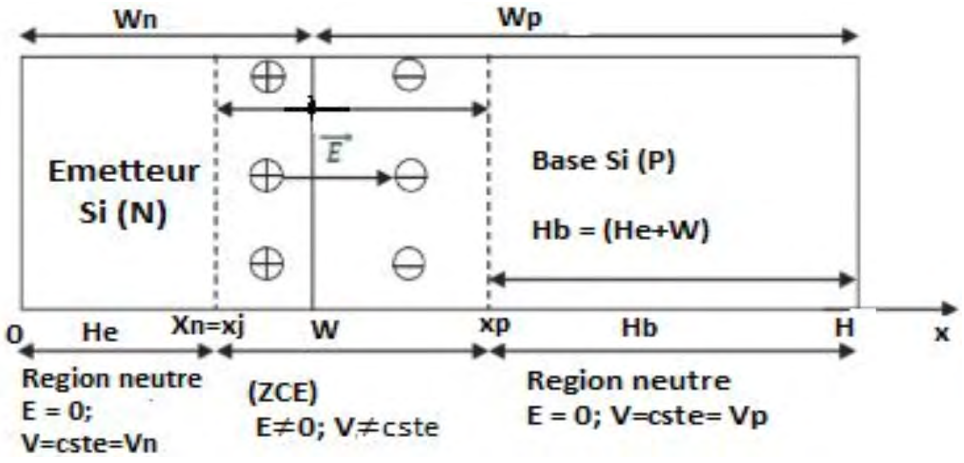

Figure 2.8: Dimensions d'une cellule PV à base de silicium Si(N)/Si(P) (Bencherif, 2015).

La modélisation permet de déterminer les densités de courant dans toutes les zones N, P et la zone de charge d'espace (ZCE) de la cellule solaire. La connaissance de la densité de courant totale permet aussi de déterminer les différentes caractéristiques de la cellule

tels que, le courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, la puissance produite, le rendement et le facteur de forme de la cellule photovoltaïque en présence du dépôt de poussière sur la surface de la cellule PV. Ce travail a permis de caractériser les pertes des paramètres électriques en présence du dépôt de poussière sur la surface de la cellule photovoltaïque. Lorsque la surface de la cellule est éclairée par un flux de lumière, la cellule crée des porteurs de charges comme des électrons et des trous. Les paires électron-trou qui sont crées dans la zone de charge d'espace de la jonction P-N sont immédiatement séparées par le champ électrique qui règne dans cette région et entraînées dans les zones neutres de chaque côté de la jonction (Bencherif, 2015). Si le dispositif est isolé, il apparaît une différence de potentiel aux bornes de la jonction et s'il est connecté à une charge électrique extérieure, les électrons libres doivent traverser la charge pour se recombiner avec des trous positifs; c'est ainsi que le courant peut être produit à partir des cellules sous éclairage (Mathieu et al., 2001).
Dans cette étude, nous négligeons le transport des porteurs minoritaires en surface et par conséquent le courant de surface.

2.5.2.1 Équation de continuité

Les équations de continuité permettent de déterminer, en tout point et à chaque instant, la concentration des porteurs dans un semi-conducteur. Ainsi, lorsque la lumière éclaire la surface de l'émetteur avec une certaine longueur d'onde λ, il y a une génération de paire électron-trou dont le taux de génération est donné par l'équation (2.14). Toutes les équations des photopiles sont très détaillées dans les travaux de (Mathieu et al., 2001; Mahfoud, 2018; Orgeret, 1985) :

$$G(\lambda) = \alpha(\lambda).F(\lambda)[1 - R(\lambda)].\exp^{(-\alpha.x)} \tag{2.14}$$

F(λ) : flux spectral monochromatique de photons incidents;
$\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption monochromatique du matériau;
$R(\lambda)$: coefficient de réflexion monochromatique à la surface du matériau.
Cependant, une fois les paires de porteurs photogénérés, ils ne restent pas statiques. Ainsi, l'équation de continuité de ces porteurs s'écrit:

$$D.\frac{\partial^2\delta(x)}{\partial x^2} + G(\lambda) - \frac{\delta(x)}{\tau} = 0 \tag{2.15}$$

Avec :
D : coefficient de diffusion des porteurs minoritaires;
δ : densité des porteurs minoritaires excédentaires;
τ : durée de vie des porteurs minoritaires.

2.5.2.2 Densité des porteurs minoritaires excédentaires dans la cellule sous éclairement monochromatique:

- **Dans la base (zone neutre P silicium):**
Les porteurs de charge minoritaires générés (i.e. électrons) dans la base de type P de la cellule appelée photopile, sous l'effet d'éclairement en lumière monochromatique, sont des électrons de charge –q. La densité de ces porteurs générés dans la base est déterminée à partir de l'équation de continuité. Lorsqu'on considère les phénomènes de génération, de recombinaison et de diffusion des porteurs minoritaires en excès dans la base, cette équation s'écrit en régime statique (Sze et al., 2006):

$$D_n.\frac{d^2(n_p - n_{p0})}{dx^2} + G(\lambda) - \frac{(n_p - n_{p0})}{\tau_n} = 0 \tag{2.16}$$

$n_p - n_{po} = \tau$: densité des électrons générés dans la base;
n_{po} : densité des électrons générés à l'équilibre;
D_n : coefficient de diffusion des électrons dans la base;
n : désigne les électrons dans la base;
Cette équation de continuité est une équation différentielle du second ordre dont la solution générale se présente sous la forme suivante:

$$(n_p - n_{p0}) = A\cosh(\frac{x}{L_n}) + B\sinh(\frac{x}{L_n}) - \frac{\alpha.F(1-R).\tau_n}{(\alpha^2 L_n^2 - 1)}.\exp^{(-\alpha.x)} \tag{2.17}$$

Les constantes A et B sont déterminées à partir des conditions aux limites suivantes:

$$(n_p - n_{p0}) = 0 \quad \text{a);} \qquad x = H_e + w \quad \text{b)}$$
$$S_n.(n_p - n_{p0}) = -D_n.\frac{d(n_p - n_{p0})}{dx} \quad \text{c)} \tag{2.18}$$

L'utilisation de ces conditions aux limites permet de déterminer les constantes A et B afin d'établir la solution de l'équation de continuité c'est à dire la densité de porteurs minoritaires dans la base. Ainsi, la densité de porteurs minoritaires est la suivante (Mathieu et al., 2001) :

$$(n_p - n_{p0}) = \frac{\alpha.F(1-R).\tau_n}{(\alpha^2.L_n^2 - 1)}.\exp^{-\alpha.(H_e+W)} \times \left[\cosh\frac{x - H_e - W}{L_n} - \exp^{-\alpha(x-H_e-W)} - \frac{(\frac{S_n L_n}{D_n})(\cosh\frac{H_b}{L_n} - \exp^{-\alpha.H_b}) + \sinh\frac{H_b}{L_n} + \alpha.L_n.\exp^{-\alpha.H_b}}{(\frac{S_n L_n}{D_n})\sinh\frac{H_b}{L_n} + \cosh\frac{H_b}{L_n}} \times \sinh\frac{x - He - W}{L_n}\right] \tag{2.19}$$

τ_n : durée de vie des porteurs minoritaires excédentaires;
L_n : longueur de diffusion de porteurs minoritaires excédentaires;

W : largeur de la jonction PN;
H_e : largeur de l'émetteur (P);
H_b: largeur de la base
S_n : vitesse de recombinaison en surface arrière;
D_n : coefficient de diffusion des porteurs minoritaires excédentaires.
avec :

$$H_b = H - (H_e + W) \tag{2.20}$$

- **Dans l'émetteur (Zone neutre N silicium)**

Dans l'émetteur, les porteurs de charges obéissent à l'équation de continuité suivante :

$$D_p.\frac{d^2(p_n - p_{n0})}{dx^2} + G(\lambda) - \frac{(p_n - p_{n0})}{\tau_p} = 0 \tag{2.21}$$

$p_n - p_{no}$: désigne la densité des porteurs minoritaires excédentaires.
P_{no} : densité ou concentration des porteurs minoritaires excédentaires à l'équilibre thermodynamique.
τ_p : durée de vie des porteurs minoritaires excédentaires.

- **Utilisation des conditions aux limites**

En

$$x = 0$$
$$S_p.(p_n - p_{n0}) = D_p.\frac{d(p_n - p_{n0})}{dx} \tag{2.22}$$

Pour

$$x = H_e \qquad ; \qquad p_n - p_{n0} = 0 \tag{2.23}$$

La solution obtenue est :

$$(p_n - p_{n0}) = \frac{\alpha.F(1-R).\tau_p}{(\alpha^2.L_p^2 - 1)} \times \left(\frac{(\alpha.L_p + \frac{S_p.L_p}{D_p}) \times \sinh\frac{H_e - x}{L_p} + (\frac{x}{L_p}.\sinh\frac{S_p.L_p}{D_p} + \cosh\frac{x}{L_p}).\exp^{-\alpha.H_e}}{\frac{S_p.L_p}{D_p}.\sinh\frac{H_e}{L_p} + \cosh\frac{H_e}{L_p}} \right) - \exp^{-\alpha.x} \tag{2.24}$$

S_p : vitesse de recombinaison en surface avant ;
L_p : longueur de diffusion des trous ;
D : coefficient de diffusion des trous ;
τ_p: durée de vie des trous.

2.5.2.3 Calcul de la densité du Photocourant

- **Photocourant dans la base (silicium P)**
  Dans une cellule à jonction PN, le photocourant généré par les porteurs de charge (électrons) qui sont les électrons s'écrit:

$$I_{ph} = qA \frac{\partial(n_p - n_{p0})}{\partial x} |_{x=H_e+W} \tag{2.25}$$

  Avec :
  q : charge de l'électron
  A : surface éclairée de la cellule
  La densité de photocourants correspondante est:

$$J_{ph} = \frac{I_{ph}}{A} = qD_n \frac{\partial(n_p - n_{p0})}{\partial x} |_{x=H_e+W}. \tag{2.26}$$

  L'injection de l'équation (2.18) dans (2.23) nous donne le courant de court-circuit dans la base. Ainsi, la densité de photocourant est alors:

$$J_n = \frac{qF(1-R)\alpha.L_n}{(\alpha^2.L_n^2 - 1)}. \exp^{-\alpha.(H_e+W)} \tag{2.27}$$

- **Densité du Photocourant dans l'émetteur (silicium N) :**

  En utilisant la même relation

$$J_{ph} = \frac{I_{ph}}{A} = qD_p \frac{\partial(n_p - n_{p0})}{\partial x} |_{x=0} \tag{2.28}$$

  On obtient la densité de photocourant dans l'émetteur:

$$J_p = \frac{\alpha.L_p.q.F(1-R)}{(\alpha^2.L_p^2 - 1)} \times \left(\frac{\left(\alpha.Lp + \frac{S_pL_p}{D_p}\right) - \left(\frac{S_pL_p}{D_p}\cosh\frac{x}{L_p} + \sinh\frac{x}{L_p}\right).\exp^{-\alpha.H_e}}{\left(\frac{S_pL_p}{D_p}\right)\sinh\frac{x_j}{L_p} + \cosh\frac{H_e}{L_p}} - \alpha.L_p.\exp^{-\alpha.x} \right) \tag{2.29}$$

- **Photocourant dans la zone de charge d'espace (ZCE) :**

  Dans cette zone le densité de photocourant est donnée par l'équation ci-dessous:

$$J_{zce} = qF(1-R).\exp^{-\alpha.H_e}\left(1 - \exp^{-\alpha.W}\right) \tag{2.30}$$

Ainsi, la densité de photocourant est la somme des densités des photocourants des zones (P-N-ZCE) de la photopile. Elle s'écrit alors :

$$J_{ph} = J_n + J_p + J_{zce} \tag{2.31}$$

- **Densité de photo courant totale, J_{tot}**

La densité de photo courant totale J_{tot}, est obtenue en intégrant la densité de courant J_{ph}, sur toute la gamme du spectre solaire utilisée:

$$J_{tot} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} J_{ph}\,\mathrm{d}\lambda \tag{2.32}$$

2.5.2.4 Courant de court-circuit (I_{cc})

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Il dépend de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface active de la cellule et de la mobilité des porteurs. Il est linéairement dépendant de l'intensité lumineuse reçue (Sze et al., 2006).

2.5.2.5 Tension de circuit ouvert(V_{c0})

Elle représente la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Ainsi, elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend aussi de l'éclairement de la cellule (Helmaoui et al., 2007).

2.5.2.6 Puissance maximale (P_m)

La puissance débitée par une cellule solaire est maximale quand le produit (V.I) est maximum. Si V_{max} et I_{max} sont la tension et le courant pour lesquels on obtient ce maximum, la puissance maximale est :

$$P_m = V_{max} \times I_{max} \tag{2.33}$$

2.5.2.7 Le facteur de forme (FF)

Ce facteur évalue l'efficacité de la cellule solaire, c'est le rapport entre la puissance maximale débitée ($V_{max}.I_{max}$) et la puissance idéale ($V_{co}.I_{cc}$). Plus ce facteur est grand, plus la puissance exploitable augmente (Helmaoui et al., 2007; Träger, 2012):

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \times I_{cc}} \tag{2.34}$$

P_m: Puissance maximale et $V_{co} \times I_{cc}$: Puissance idéale

2.5.2.8 Le Rendement de conversion (η)

Le rendement (η), des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente (P_{in}).

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{P_{in}} \tag{2.35}$$

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le site expérimental de notre étude. La présentation de toute les techniques de caractérisation en science des matériaux, utilisée dans cette thèse est aussi détaillée. De mème, une présentation des modèles développés et utilisés est présentée. Enfin, les données atmosphériques du photomètre solaires utilisées au cours de ces travaux sont aussi rappelées.

Chapitre 3

Utilisation du modèle ALADIN et de la réanalyse MERRA-2 pour caractériser les flux de dépôt sec de poussières entre 2006 et 2010 au Sénégal et en Afrique de l'Ouest

3.1 Contexte et objectifs

Chaque année, d'énormes quantités d'aérosols minéraux (poussières désertiques) sont émis dans la région Sahélo-Saharienne. Environ deux milliard de tonnes de ces derniers sont transportés sur de longues distances chaque année (d'Almeida, 1986). Ces particules sont majoritairement composées d'argiles, de feldspaths et de quartz. Leur cycle est composé de trois phases qui sont: l'émission, le transport et le dépôt. Les processus d'émissions sont essentiellement contrôlés par les paramètres météorologiques (Brooks et al., 2000; Prospero, 1999) et les caractéristiques de la surface. Des analyses détaillées, ont montré que les lacs ou les rivières asséchés sont des zones dont le potentiel d'émission de poussières est très élevé (Israelevich et al., 2002; Prospero et al., 2003; Tegen et al., 2002; Zender et al., 2003). Une fois soulevés, ces particules se transportent majoritairement vers l'Atlantique sous l'effet des alizés. Deux types de transport de la poussière Saharienne au dessus de l'Atlantique Nord en passant par l'Afrique de l'Ouest ont été clairement identifiés en fonction de la circulation atmosphérique générale: le premier type de transport s'opère dans les basses couches entre 1,5 et 3 km. Il est dû aux alizés (Harmattan) pendant l'hiver boréal, de novembre au mois d'avril (Chiapello et al., 1995). Ces grandes tempêtes de poussières situées près de la surface sont souvent rencontrées en Afrique de l'Ouest et peuvent atteindre l'Atlantique Nord (Slingo et al., 2006; Tulet et al., 2008). Le second intervient dans les couches moyennes (5-6 Km) pendant l'été boréal. Cette masse d'air chaud et sec est appelée Couche d'Air Saharienne (SAL). Elle se traduit par un transport à très grandes distances avec des particules qui peuvent atteindre l'île de la Barbade (Caraïbes) (Prospero et al., 1972; Dunion et al., 2004; Karyampudi et al., 1999). La Couche d'Air Saharienne est une des caractéristiques dominantes de la météorologie orientale et occidentale de l'océan Atlantique (Prospero et al., 1972; Dunion et al., 2008). Et enfin, le cycle de l'aérosol désertique s'achève par le dépôt des particules au niveau des continents ou des surfaces océaniques, en conditions d'atmosphère sèche ou humide. Les processus de dépôt sec se réalisent sous l'action de la gravitation (sédimentation) ou par capture sur les reliefs et la végétation. Alors que, le dépôt humide apparaît quand les masses d'air poussiéreuses se mélangent par convection avec les masses d'air humides ou nuageuses. Selon leur taille, les particules comprise entre 0,1 et un micromètre ont les vitesses de dépôt par sédimentation les plus faibles, et elles seront donc majoritairement déposées par voie humide. Au-delà du micron, les vitesses de sédimentation deviennent importantes et constitue une voie importante de déposition par voie sèche. Les plus grosses particules, de diamètre supérieur à 20 μm se déposent rapidement après leur émission par sédimentation, à proximité des zones sources. Les puits de dépôt de particules minérales sont difficiles à cerner précisément, car le processus de dépôt intéresse une aire très vaste, si on tient compte du temps, de la distance et de la direction du transport, extrêmement variables. Cette variabilité est fonction des caractéristiques des particules (dimensions, nature physico-chimique), des conditions atmosphériques, de la situation météorologique et de l'environnement orographique.

Néanmoins, trois quart des quantités de poussières Saharienne soulevés se déposent au

dessus des continents (Shao, 2001). Cela est confirmé par la figure 3.1 qui montre les flux de dépôt des poussières désertique simulés par Tegen et al. (2002). On constate que les plus grands puits de dépôt sont situés dans le désert autour des sources de poussières. Ensuite l'Afrique de l'Ouest, cas de notre étude, est concerné par d'importante quantités de poussières déposés. Ainsi, les panneaux PV installés en Afrique de l'Ouest reçoivent de la poussière sur leur surface et cette dernière interagit avec le rayonnement solaire.

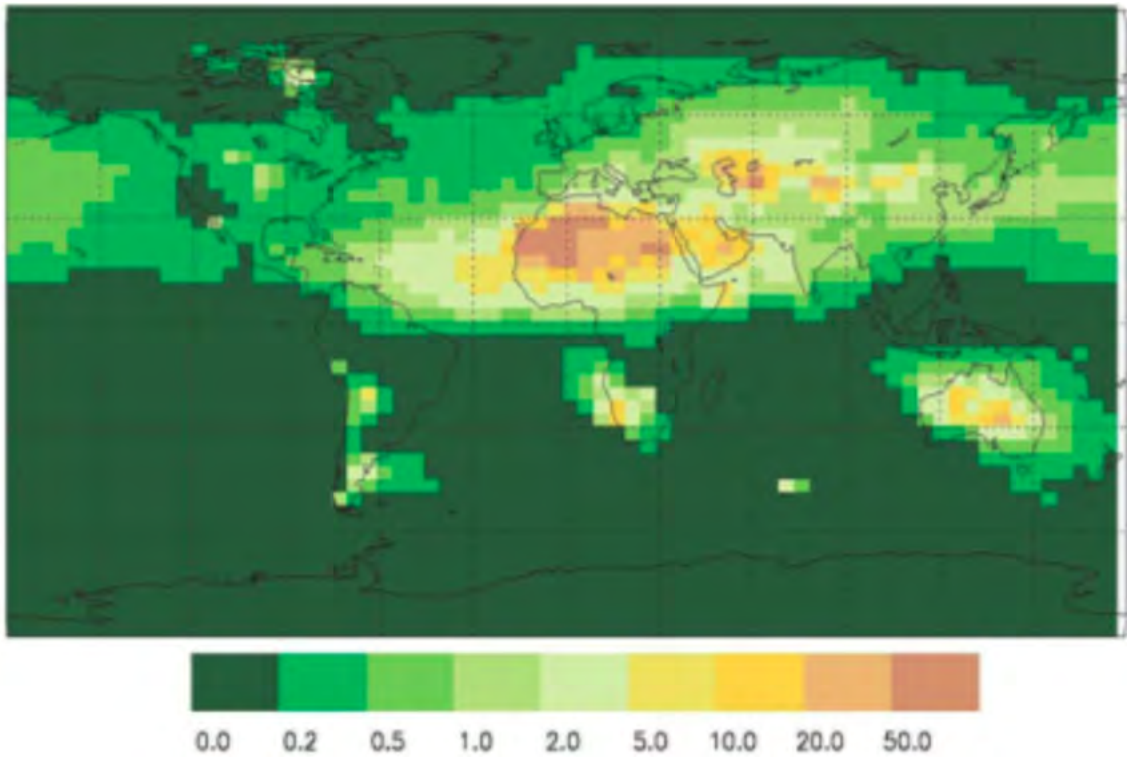

Figure 3.1: Moyenne du flux de dépôt en g/m^2/mois pour la période 1987–1990 simulée par Tegen et al. (2002).

Au fil du temps, cette accumulation de poussière sur la surface des panneaux PV donne naissance à une couche mince. La couche masque l'exposition au soleil ou absorbe une partie du rayonnement incident. Ce phénomène favorise une baisse importante d'environ 6 % par an de la performance des panneaux solaires (Sulaiman et al., 2015). Dans cette thèse nous cherchons à évaluer l'impact du dépôt de poussière sur la production des panneaux solaires au Sénégal. Cependant, avant d'évaluer l'impact du dépôt sur le rendement de ces panneaux PV, nous jugeons utile de caractériser d'abord les flux de dépôt sec. Il reste assez complexe de caractériser les flux de dépôt sec car il existe peu instruments, les Capteurs de mesure des dépôts de poussières (ADA-MASS; aloa-ADA) de la societe ALOATEC (Bourrier et al., 2007; Bardet et al., 2000) et les capteurs pyramidals pouvant mesurer les

dépôts de poussière. L'objectif de ce chapitre est d'effectuer une caractérisation du dépôt de poussière en Afrique de l'Ouest et particulièrement au Sénégal. Dans cette partie, nous évaluons les quantités de poussières susceptible de se déposer sur le continent et de surcroît sur les panneaux solaires en toute saison. Pour ce faire, nous faisons recours à deux modèles climatiques incluant le cycle complet des poussières que sont ALADIN développé à Météo-France (Mokhtari et al., 2015; Farda et al., 2010) et MERRA-2 (Rienecker et al., 2011) qui est une réanalyse de la NASA. Les flux de dépôt secs ont été simulés pour la période 2006-2010 dans la zone Afrique de l'Ouest incluant le Sénégal. Une attention particulière a été portée sur la station instrumentée de Mbour au Sénégal. En effet, cette station dispose d'instruments de mesure in-situ dédiés aux aérosols comme le photomètre AERONET et un lidar. De plus, une campagne de mesure des dépôts secs de poussière y a été mené entre 2007 et 2009. Les données issues de cette campagne serviront d'outils de validation des simulations des modèles Aladin et Merra-2. Une fois que le cycle saisonnier du dépôt sec sera connu dans cette zone du monde, nous penserons apporter des solutions de nettoyage des panneaux solaires en fonction des saisons de l'année au Sénégal et en Afrique de l'Ouest pour une meilleure efficacité des modules solaires.

3.2 Validation des épaisseurs optiques simulées par les deux modèles entre 2006 et 2010 à Mbour

Comme dit précédemment, le cycle des poussières est composé de trois phases. Une fois dans l'atmosphère (phase transport), l'épaisseur optique des aérosols (AOD) constitue un des paramètres les plus pertinents à notre disposition pour mesurer la quantité d'aérosols dans la colonne atmosphérique. De manière générale, cette grandeur sans unité décrit la quantité de lumière qui traverse un matériau. Plus l'épaisseur optique est grande, moins la lumière traverse le matériel. Elle caractérise en quelque sorte la transparence de l'atmosphère. C'est un indicateur indirect qui permet d'évaluer la quantité d'aérosol présente dans l'atmosphère en un lieu donné. Le photomètre solaire est un instrument qui sert à mesurer cette grandeur pendant la journée en présence du soleil. Un réseau mondial constitué de photomètre nommé AERONET (Holben et al., 1998) existe depuis les années 90 et permet d'obtenir une mesure continue sur plusieurs points su globe. Au Sénégal à Mbour (14° 25' 22" N, 16° 57' 55" W), ce type d'instrument existe depuis 1996.

Puisque, les flux de dépôts des poussières sont assez difficiles à mesurer, nous allons utiliser la simulation en se servant de modèles climatiques intégrant les processus de dépôt que sont le modèle ALADIN et la réanalyse MERRA-2. Avant toute simulation des flux dépôts, nous commençons par valider les épaisseurs optiques des poussières dans leurs phase de transport au dessus de Mbour au Sénégal.

Nous superposons sur la figure 3.2, la climatologie mensuelle de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) issue de la mesure in situ AERONET (en noire) avec celle obtenus par les modèles ALADIN (en rouge) et MERRA-2 (en bleu) entre 2006 et 2010 à Mbour, au Sénégal. On constate que, les deux modèles suivent une tendance similaire que la mesure in situ et cela pour toute les saisons. Les maximas sont partout notés entre Juin et Août (i.e. entre le printemps et en l'été) alors les minimas sont enregistrés en hivers d'Octobre à Février. De plus, la station Aeronet de Mbour et les modèles Aladin et Merra-2 détectent les maximas de poussières aux même endroits en Mars et Juin sur cette station. Cependant, on note que les modèles ont tendance à surestimer les quantités de poussières surtout pour ALADIN.

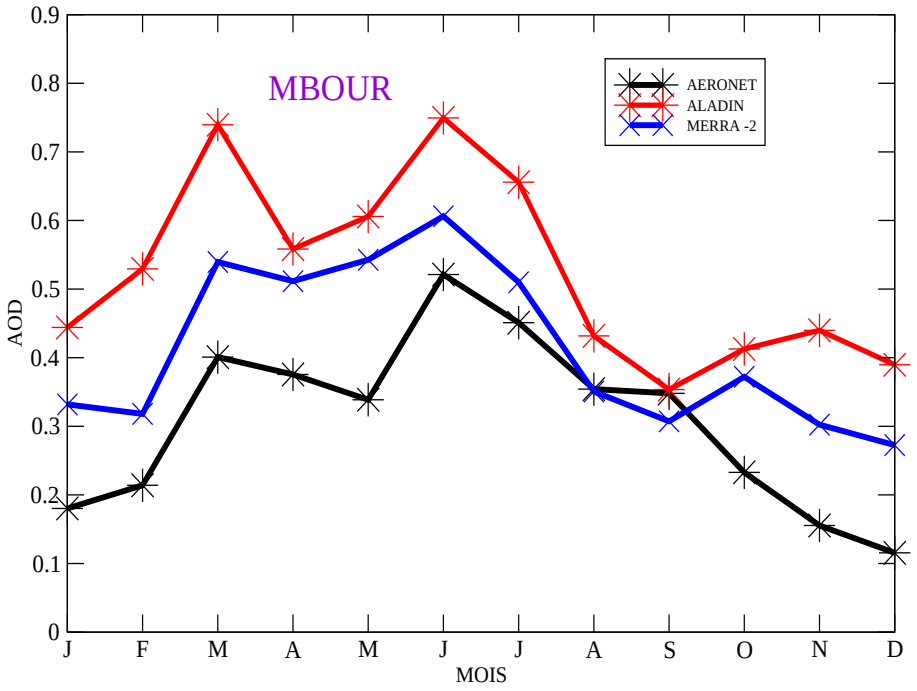

Figure 3.2: Distribution mensuelle de l'épaisseur optique des aérosols (AOD) pour AERONET (courbe noir), MERRA-2 (courbe bleu) et ALADIN (courbe rouge) entre 2006 et 2010 à Mbour (Sénégal).

Pour faire une bonne comparaison entre les AOD mesurés et simulés, nous représentons sur la figure 3.3 la corrélation entre ces épaisseurs optiques. Les nuages de points sont représentés avec comme référence la mesure in situ issue du photomètre AERONET. Ainsi, les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0,83 pour MERRA-2 et de 0,73 pour ALADIN.

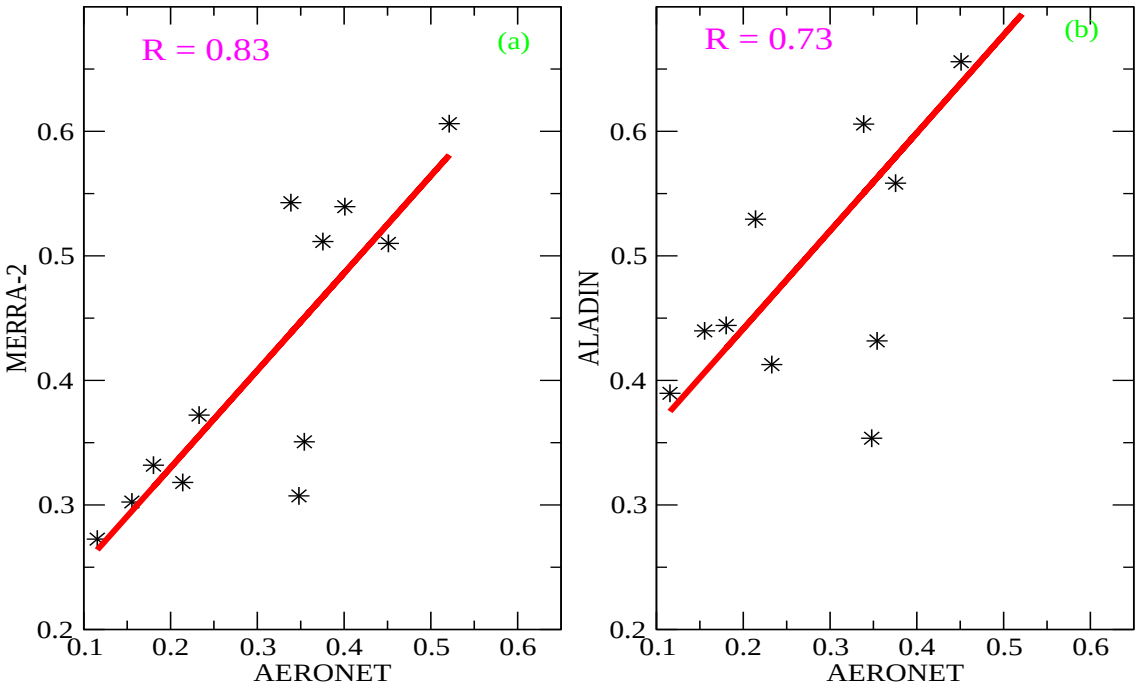

Figure 3.3: Corrélation entre la réanalyse MERRA-2 (a) et le modèle ALADIN (b) comparée avec la mesure in situ (AERONET) entre 2006 et 2010 à Mbour.

On peut dire que nos modèles représentent assez bien la dynamique temporelle et les quantités d'aérosols dans l'atmosphère à Mbour. Par conséquent , ces résultats nous permettent de valider ces modèles dans le but d'utiliser leurs sorties en terme de dépôt pour la suite de notre travail.

3.3 Caractérisation et validation des flux de dépôt sec à Mbour entre 2007 et 2009

Après avoir valider les sorties de modèles en terme d'épaisseurs optiques avec des coefficients de corrélation de plus 73%, nous envisageons de valider les flux de dépôt avec les quelques

rares mesures in situ effectuées dans la région. En effet, le manque de données in situ en dépôt est surtout du à la complexité pour mesurer ce paramètre (dépôt sec). Néanmoins, une campagne de mesure du dépôt sec a été menée entre 2007 et 2009 à Mbour.

3.3.1 Présentation de la campagne de mesure effectuée à Mbour

Entre 2007 et 2009, une campagne de mesure a été menée à Mbour pour évaluer les flux de dépôts secs et humides dans cette zone Sahélienne (Skonieczny et al., 2013). Les données à notre disposition sont sous forme saisonnières. Il s'agit de l'hiver (Décembre-Janvier-Février ou DJF), du printemps (Mars-Avril-Mai ou MAM), été (Juin-Juillet-Août ou JJA), l'Automne (Septembre-Octobre-Novembre ou SON) et la campagne s'est arrêtée pendant l'hiver en 2009. Les données saisonnières issues de mesure in situ seront utilisées comme outils de validation des flux de dépôts simulés pour nos deux modèles.

3.3.2 Distribution en taille des particules à Mbour pendant la campagne de mesure

Dans cette section nous étudions les types de particules présents dans l'atmosphère de Mbour pendant la période de la campagne de mesure du dépôt sec. La figure 3.4 illustre la distribution en taille saisonnière des aérosols mesurés par le photomètre de la station AERONET entre 2007 et 2009. Cette figure indique le nombre de particules par classe de taille qui se trouve dans l'atmosphère de cette station. On constate que les particules sont de grosses tailles, c'est à dire des poussières désertiques dont la taille est comprise entre 1 et 15 μm. La plupart de ces particules ont une taille centrée autour 2,5 μm. Les maxima en poussières désertiques sont enregistrés entre le printemps (MAM) et l'été (JJA) alors que les minima sont notés entre l'automne (SON) et l'hiver (DJF). Globalement, on note que l'année 2007 a été la plus productrice en poussière comparée à 2008.

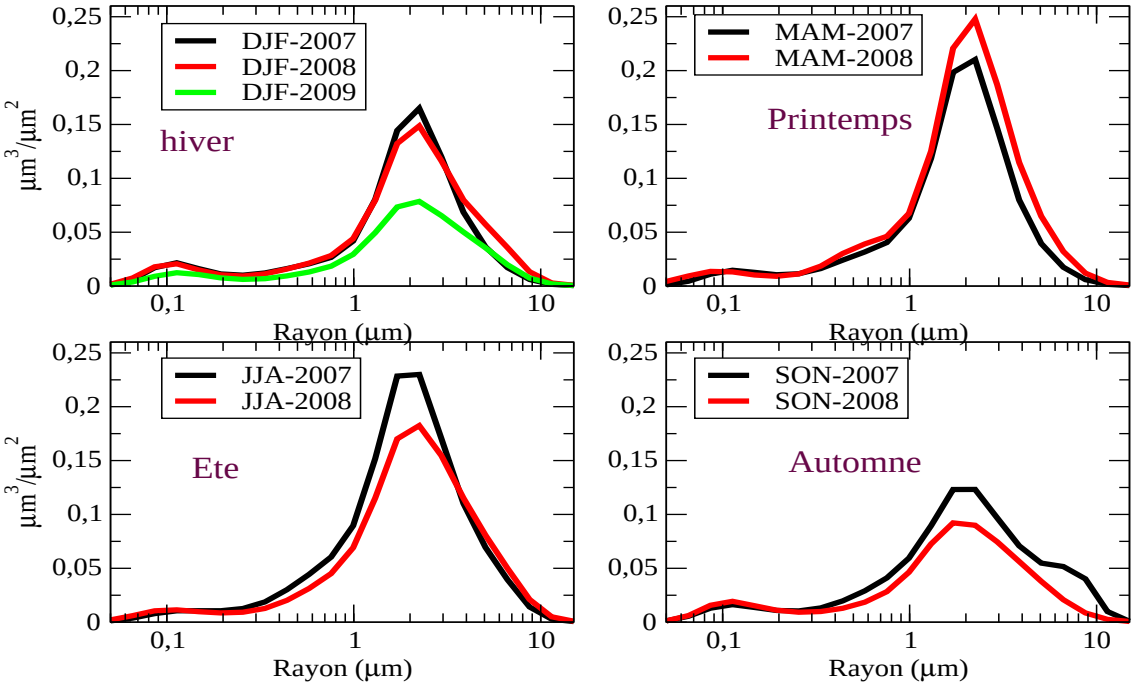

Figure 3.4: Distribution saisonnière de la taille des aérosols obtenue par le photomètre (AERONET) de la station de Dakar de 2007 à 2009.

3.3.3 Validation de l'AOD à Mbour pendant la campagne de mesure

La figure 3.5 est une comparaison saisonnière directe entre l'AOD mesurée par la station AERONET de Mbour avec les sorties des deux modèles durant la campagne de mesure des dépôts secs sur la dite station entre 2007 et 2009. Comme pour la climatologie, on constate que les deux modèles simulent bien la dynamique temporelle des quantités de poussières dans l'atmosphère de Mbour. Les maxima sont surtout notés en été (JJA) et au printemps (MAM) avec un pic plus prononcé pour ce dernier. Contrairement à MERRA-2 qui sous-estime, le modèle ALADIN a tendance à surestimer la mesure.

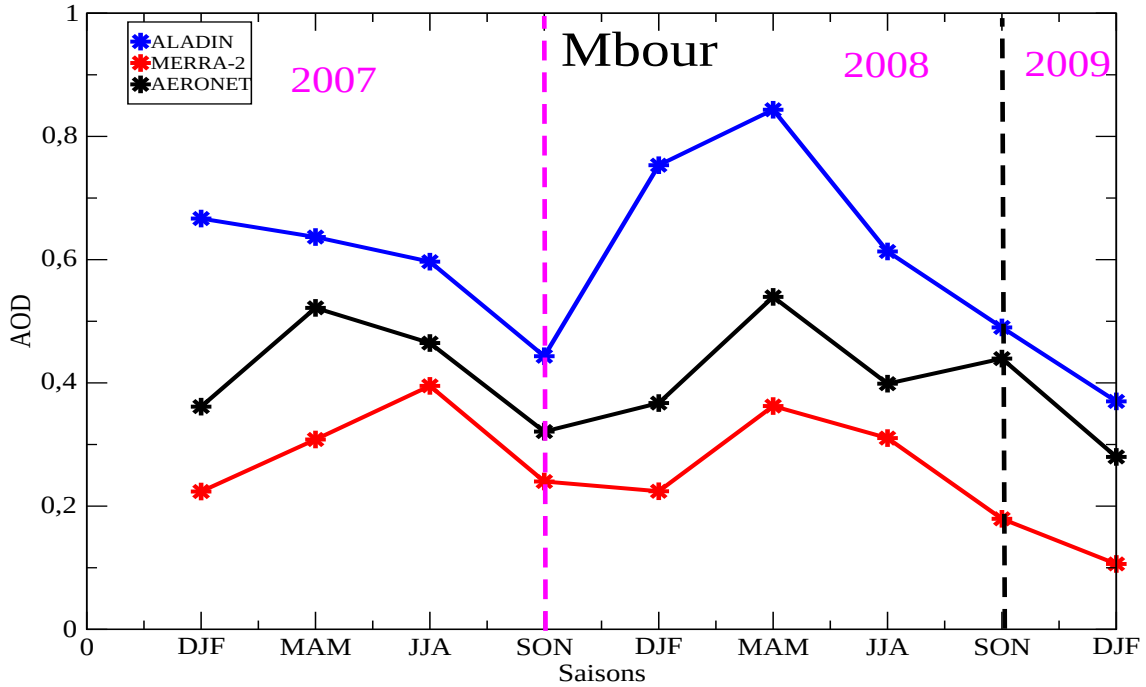

Figure 3.5: Comparaison de l'AOD saisonnière entre la mesure in situ (noire) et les deux modèles que sont ALADIN (bleu) et MERRA-2 (rouge) pendant la période (2007-2009) de la campagne de mesure des dépôts secs à Mbour.

La figure 3.6 représente les droites de régressions entre l'AOD mesurée et les simulations issues des deux modèles durant la campagne de mesure. La droite bleue illustre celle d'ALADIN et la rouge représente celle de MERRA-2.

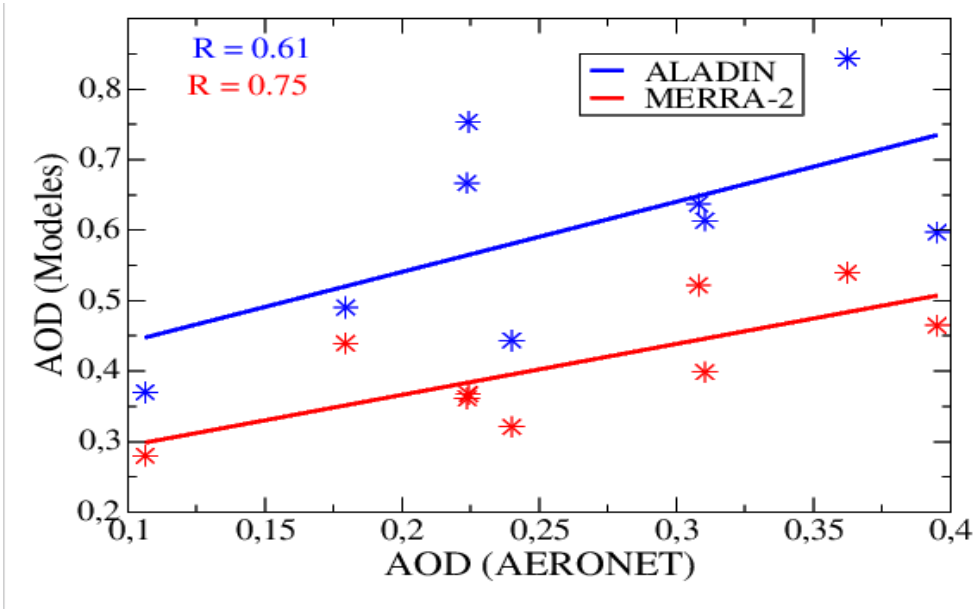

Figure 3.6: Droites de régressions entre l'AOD mesurée et simulée par les deux modèles à Mbour.

Cette figure montre que, les coefficients de corrélations sont moyen avec des valeurs de 61% et 75% respectivement pour ALADIN et MERRA-2. Par conséquent, on peut conclure que nos deux modèles montrent bien les quantités de poussières pendant la campagne de mesure, cela présage une confiance en ces modèles pour représenter le cycle complet des poussières à Mbour.

3.3.4 Validation des flux de dépôts secs par les mesures effectuées pendant la campagne

La figure 3.7 représente une comparaison entre les dépôts secs saisonniers mesurés et simulés par les deux modèles que sont MERRA-2 et ALADIN entre 2007 et 2009. Les dépôts humides (JJA) n'ont pas été pris en compte dans ce travail. Les maximums sont mesurés au printemps 2007 et 2008 avec des valeurs autour de 13 g/m^2/mois et les minimums sont enregistrés en Automne notamment en 2007 (environ 5 g/m^2/mois). MERRA-2 et ALADIN caractérisent bien les dépôts secs pour ces trois années avec des concordances pour le maximum et le minimum.

Cependant, le modèle ALADIN surestime la mesure alors que MERRA-2 sous-estime les flux de dépôts mesurés. Néanmoins, cette figure (3.7) montre bien que le modèle ALADIN représente mieux les maxima et les minima de dépôt sec de poussière à Mbour. Par conséquent, on utilisera le modèle ALADIN comme outil de simulation du dépôt sec dans la suite du travail.

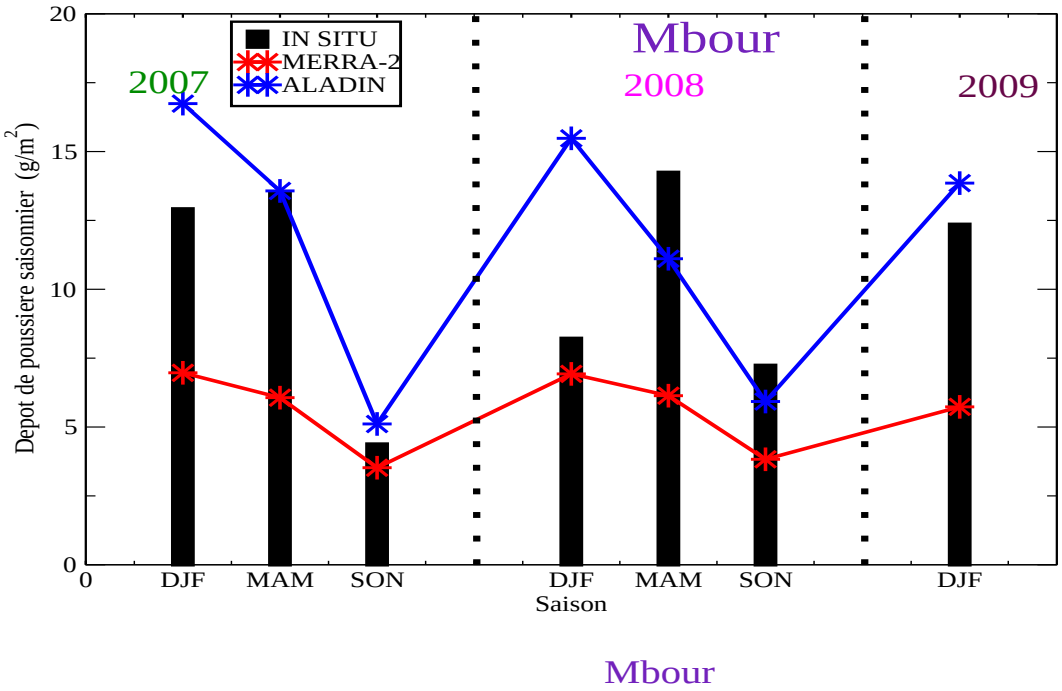

Figure 3.7: Comparaison entre les flux de dépôts secs saisonniers de poussières mesurés (histogramme noire) et simulés (ALADIN et MERRA-2) en g/m^2/mois pendant la campagne de mesure entre 2007 et 2009.

La figure 3.8 représente les droites de régressions entre le dépôt mesuré et celui simulé par le modèle que sont, ALADIN (bleu) et MERRA-2 (rouge) à Mbour entre 2007 et 2009. On remarque que ces deux modèles simulent assez moyennement le dépôt saisonnier de poussière avec des coefficients de corrélations de plus de 70%. Ce taux est légèrement plus important pour ALADIN.

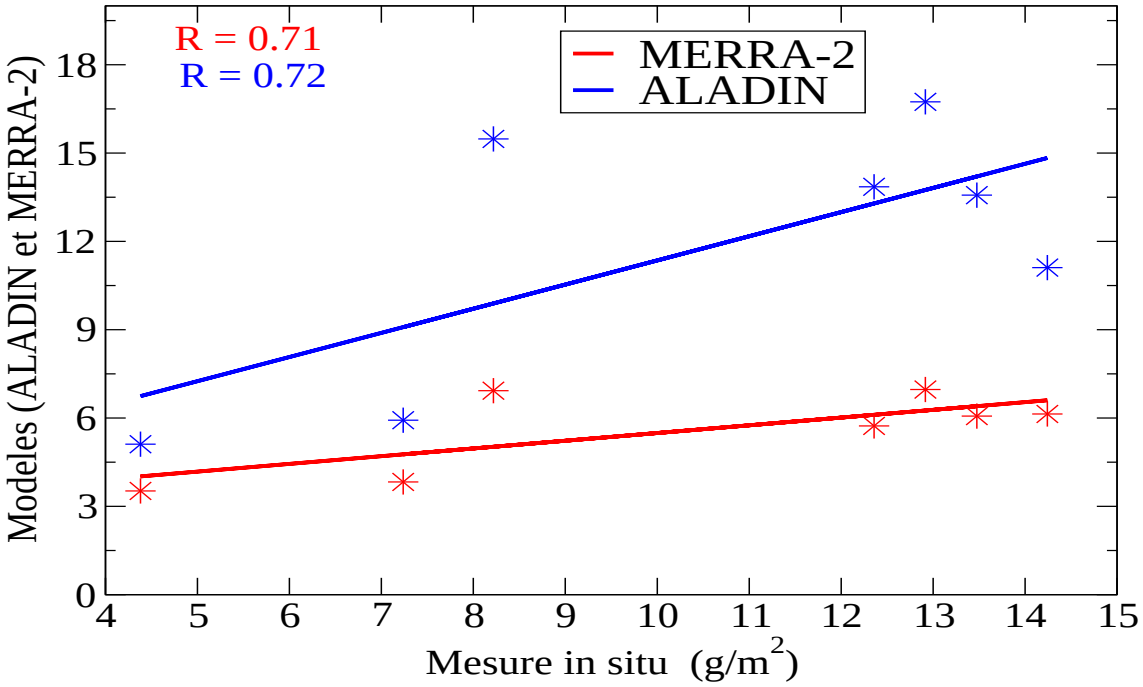

Figure 3.8: Droites de régressions entre le dépôt mesuré et celui simulé par les modèles que sont ALADIN (bleu) et MERRA-2 (rouge) à Mbour entre 2007 et 2009.

En résumé, on peut dire que ces modèles simulent moyen la dynamique et les quantités de dépôt sec saisonniers de poussières avec des coefficients importants. Cependant, le modèle ALADIN est plus proche de la réalité pour la détection des pics et même pour la corrélation absolue. Ainsi, pour la suite, ce modèle sera utilisé pour simuler les flux à long terme des dépôts de poussières au Sénégal et en Afrique de l'Ouest.

3.4 Simulation à long terme des dépôts secs de poussière avec le modèle ALADIN

3.4.1 Distribution mensuelle des flux de dépôts secs de poussières en Afrique de l'Ouest

Après avoir montré que, c'est le modèle ALADIN, (développé à Météo-France), qui simule mieux les maxima et les minima en dépôt sec, nous utilisons ce dernier pour les simulations

long terme du dépôt sec au Sénégal et en l'Afrique de l'Ouest. Par conséquent, nous étendons nos simulations dans notre zone d'étude en utilisant le modèle ALADIN. Ainsi, nous représentons sur la figure 3.9, la climatologie mensuelle de la distribution du dépôt sec de poussière sur l'Afrique de l'Ouest et le Sahara (0°N-40°N et -20°W-40°E) entre 2006 et 2010.

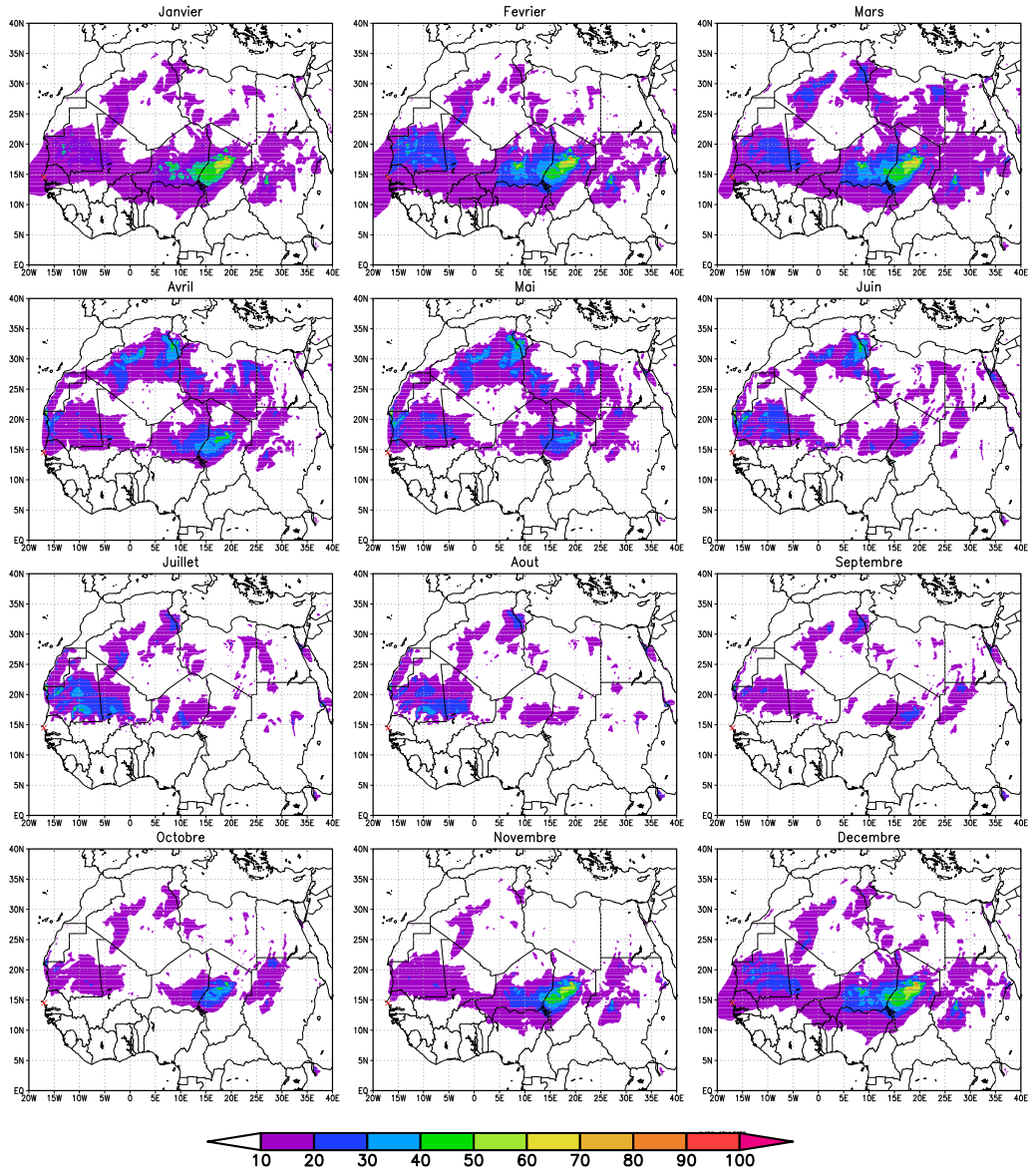

Figure 3.9: Climatologie mensuelle des dépôts secs de poussières (g/m^2) en Afrique de l'Ouest simulée avec le modèle ALADIN entre 2006 et 2010. La ville de Mbour est indiquée par la croix rouge.

On constate que les maxima en dépôt sec sont enregistrés autour des deux grandes sources de poussières sahariennes (entre 13°N et 20°N) et cela en toute saison. Ainsi, il s'agit de celle du centre Ouest de la Mauritanie (entre -15°W et -5°W) et la deuxième source est située dans la dépression de Bodélé à l'Ouest du Tchad (10°E et 20°E) vers la frontière avec le Niger. Du fait de l'importance de l'activité de la source de Bodélé, les zones autour de cette localité reçoivent plus de dépôt que celles autour de la source Mauritanienne. Les puits de dépôt autour de la source Mauritanienne reçoivent près de 20 g/m^2/mois en moyenne alors que celles autour de la plus grande source de poussière (Bodélé) reçoivent quant à elle, un dépôt mensuel de plus de 40 g/m^2/mois. La grande majorité des poussières soulevées se dépose dans la bande Sahélienne située entre 15°N et 30°N. On note un cycle saisonnier très marqué en terme de dépôt sec dans toute la région. Les maxima en dépôt sec sont enregistrés durant la fin de l'Automne (Novembre) jusqu'au début de la saison humide (Juin). Du point de vue Sahélien, cette période de Novembre à Juin correspond à la saison sèche. De l'Automne (Novembre) jusqu'à la fin de l'hiver (Mars), l'activité de dépôt sec est plus active autour de la source du Bodélé alors qu'au début du printemps (Mars) jusqu'au début de l'été (Juin), c'est surtout la source Mauritanienne qui reçoit plus de poussières déposée.

La bande de poussières déposées suit le déplacement de la ZCIT (zone de convergence intertropicale) avec une limite inférieure autour de 10°N. Pendant la saison, la ZCIT se situe dans les pays du golfe de Guinée, le dépôt concerne toute la zone du Sahara jusqu'aux pays du Golfe. Des que le système de mousson commence à se mettre en place, au mois d'Avril, avec une ZCIT qui migre vers le nord, la bande de dépôt se rétrécit repoussée par ce vent humide vers 15°N.

3.4.2 Distribution mensuelle des flux de dépôts secs de poussières au Sénégal

La figure 3.10 représente la climatologie mensuelle du dépôt sec de poussières sur le Sénégal entre 2006 et 2010. Il existe un cycle saisonnier marqué et un gradient fort nord-sud du dépôts sec de poussière. Le fort gradient nord-sud se traduit par le maximum de poussière déposée au nord du pays et les minima sont enregistrés au sud du pays. Les valeurs du dépôt sec de poussières varient de 0 à 30 g/m^2/mois en fonction des saisons et la zone considérée. Les maxima en dépôt sec sont enregistrés pendant la saison sèche entre Décembre et Mai. Durant cette saison, presque tout le pays est concerné par d'importantes quantités de poussières qui se déposent. Le dépôt sec varie de 8 à 10 g/m^2/mois au sud et de 14 à 25 g/m^2/mois au nord du pays pendant cette saison. La limite entre le nord et le sud en terme de dépôt sec est située à environ 14°N. Les minima en dépôt sont enregistrés sur tout le territoire pendant la saison humide avec des valeurs inférieures à 8 g/m^2. Enfin, on

constate que les pics en dépôt sec sont surtout notés entre Décembre et Avril au Sénégal. Par conséquent, durant ces mois, les panneaux solaires pourraient être plus vulnérables en terme de production. Ces résultats pourraient permettre aux décideurs d'entreprendre des méthodes de nettoyages des panneaux solaires qui reçoivent des quantités importantes de poussières sur leurs surfaces pendant la saison sèche.

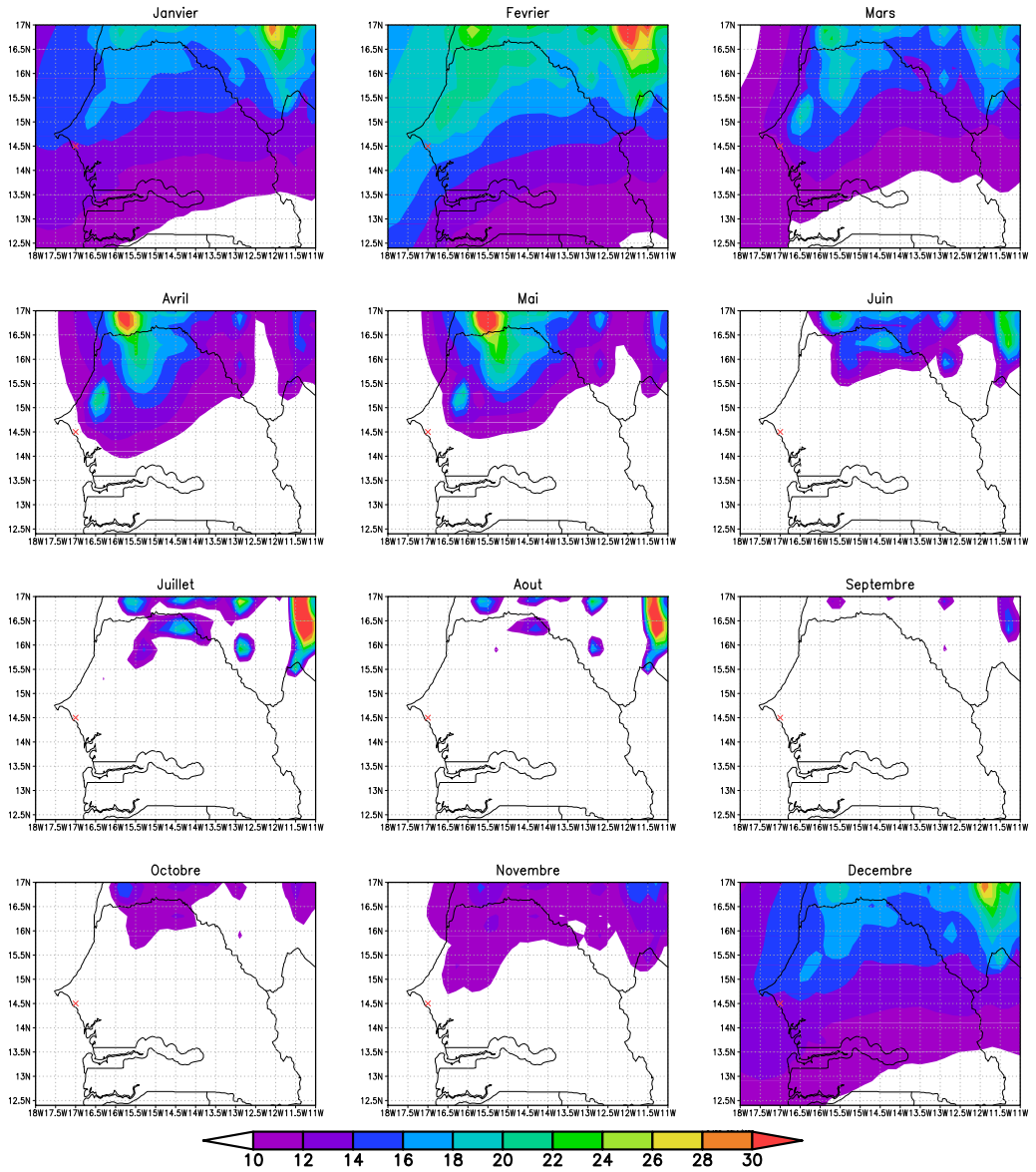

Figure 3.10: Distribution des dépôts mensuels moyens de poussières (g/m^2) au Sénégal selon le modèle ALADIN entre 2006 et 2010. La ville de Mbour est indiquée par la croix rouge.

3.4.3 Distribution mensuelle des flux de dépôts secs de poussières à Mbour

La figure 3.11 représente la climatologie mensuelle des flux de dépôts secs de poussières (g/m^2) à Mbour (14° 25' 22" N, 16° 57' 55" W) entre 2006 et 2010 simulée par le modèle ALADIN. On constate un cycle saisonnier très marqué avec des minima durant la saison des pluies et des maxima sont notés pendant la saison sèche. Du fait de la faiblesse du processus de dépôt durant la saison humide, on constate de très faible quantité de (2 g/m^2/mois) de poussières qui tombent en dépôt sec. Les pics en dépôt secs sont enregistrés en hiver entre Décembre et Mars. Durant ces mois, le dépôt sec varie de 12 à 18 g/m^2/mois. L'accumulation de ces quantités importantes de poussières pendant la saison sèche sur la surface des panneaux solaires installés en pleine air entraîne une réduction de la productivité de ces modules solaires. Ces résultats montrent qu'une attention particulière doit être portée à la saison sèche de Novembre à Mars quant à la proposition des systèmes de nettoyage adaptés pour les panneaux solaires.

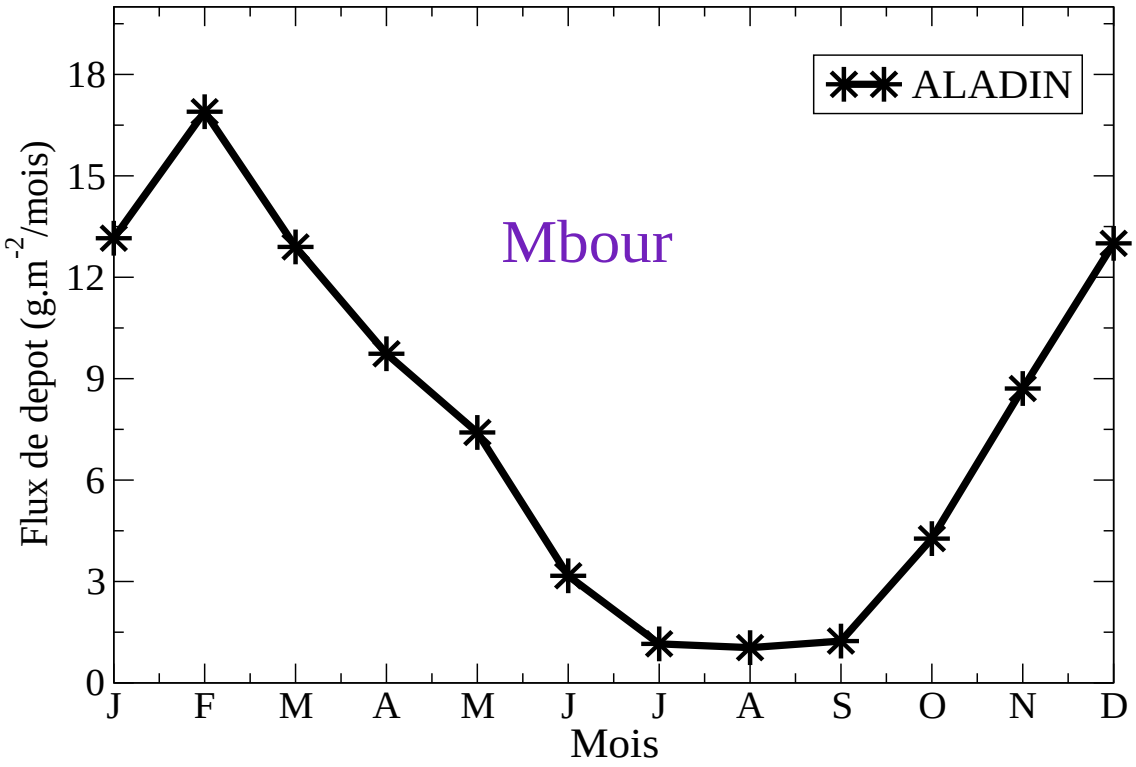

Figure 3.11: Climatologie mensuelle des flux de dépôts secs en poussières (g/m^2) à Mbour entre 2006 et 2010 simulés par le modèle ALADIN

3.5 Conclusion

Avant toute évaluation de l'impact du dépôt de poussière sur la production des panneaux solaires au Sénégal, il fallait un travail en amont qui consistait à quantifier les flux de dépôt sec au Sénégal et en Afrique de l'Ouest. Pour mesurer ces dépôts secs, nous avons eu recourt à deux modèles climatiques comportant des modules intégrant le cycle complet des poussières désertiques.
La validation de ces modèles a été effectuée, à deux niveaux, sur la station instrumenté de Mbour (station AERONET) comportant en son sein plusieurs instruments dédiés à la mesure des poussières désertiques comme le photomètre solaire. En utilisant l'épaisseur optique des aérosols (AOD) mesurée par le photomètre AERONET, nous avons validé ces deux modèles de quantités de poussières contenu dans l'atmosphère avec des coefficients de corrélation de plus 74% à Mbour. Ensuite, la campagne de mesure menée entre 2007 et 2009 a permis d'obtenir des flux de dépôt saisonnier sur cette même station de Mbour. Ainsi, ces mesures in situ de dépôt sec ont servi d'outils de validation des deux modèles considérés dans ce travail. La comparaison entre les flux de dépôt mesurés et simulés a montré des taux de corrélation de plus de 70% pour les deux modèles. Cependant, le modèle ALADIN arrive à mieux simuler les maxima et les minimum de dépôt sec que le modèle MERRA-2. Partant de ce constat, nous avons utilisé pour la suite le modèle ALADIN pour des simulations long terme des flux de dépôt au Sénégal et en Afrique de l'Ouest.
Les simulations avec ALADIN ont permis de localiser les principaux puits de dépôt sec autour des grandes sources de poussières que sont la source Mauritanienne et celle se trouvant au Tchad vers la dépression de Bodélé. Un cycle saisonnier assez marqué en terme de dépôt sec est noté avec des maxima pendant la saison sèche et des minima en saison humide. Les simulations sur le Sénégal ont relevé des tendances similaires avec un gradient nord-sud et un cycle saisonnier marqué. Et enfin ces résultats sont en concordance avec ceux de la station de Mbour. On y constate, un cycle saisonnier très marqué avec des minima durant la saison des pluies et les maxima sont notés pendant la saison sèche. Le dépôt sec de poussière varie de 2 à 18 g/m^2/mois à Mbour. Ce chapitre a permis de mettre en évidence les mois (i.e de Novembre à Juin) pour lesquelles des nettoyages des panneaux solaires doivent être mis en place pour un meilleur rendement de ces modules solaires.

Chapitre 4

Propriétés structurelles et physico-chimiques de la poussière collectée sur la surface des panneaux photovoltaïques à Dakar, au Sénégal

4.1 Introduction

L'Afrique est la plus grande source de poussière à l'échelle globale (Marticorena et al., 2011). Ce continent dispose aussi d'un potentiel d'énergie solaire énorme (Drame et al., 2012). Par ailleurs, le dépôt de la poussière sur la surface des modules solaires à tendance à réduire la production de ces derniers à l'échelle globale (Sulaiman et al., 2015). Ainsi, le dépôt de poussière constitue un frein pour le développement d'installation solaire à l'échelle de la région d'Afrique de l'Ouest. Des travaux récents ont montré que d'importantes quantités de poussières se déposent sur le continent chaque année avec une saisonnalité assez marquée (Diop et al., 2018). Quelques travaux ont commencé à étudier l'impact du dépôt de poussière sur la production des panneaux solaires en zone sahélienne (Al Shehri et al., 2016; Dajuma et al., 2016). Cependant, la composition minéralogique globale des aérosols sahariens rend compte de la diversité des provinces sédimentaires (sources) dont ils sont issus (Schütz et al., 1987; Paquet et al., 1984). Cette diversité des sources et la composition physico-chimique des poussières rendent complexe l'interaction entre ces particules et le rayonnement solaire. Ainsi, une caractérisation physico-chimique complète de la poussière déposée sur la surface des panneaux PV en fonction des saisons est impérative. En effet, le dépôt initial et les phénomènes radiatifs dépendent de plusieurs paramètres tels que, la taille de la particule et la surface sur laquelle elles se déposent (Mehmood et al., 2017).
Dans cette partie nous étudions la morphologie, la taille, la minéralogie et la composition moléculaires des échantillons de poussières collectées à Dakar. La plupart des techniques de caractérisation en sciences des matériaux est utilisée pour caractériser la poussière prélevée. En amont, des techniques de télédétection ont permis de caractériser les propriétés optiques de ces particules pendant leur processus de transport dans l'atmosphère de Dakar.
Ce chapitre est structuré en trois parties. D'abord nous étudions les propriétés optiques des poussières avant et après leur dépôt sur les surfaces des panneaux PV. Cela passe par une caractérisation des indices de réfraction, de la forme et de la taille des particules concernées. Ensuite, une analyse des éléments chimiques (atomiques) des échantillons est effectuée par plusieurs techniques de caractérisation des matériaux. Et enfin, les molécules composant ces échantillons sont identifiées et quantifiées selon leur teneur dans la poussière.

4.2 Analyse des poussières collectées sur les surfaces des panneaux PV

4.2.1 Propriétés optiques de la poussière collectée

4.2.1.1 Validation des indices de réfractions des poussières collectées

Les indices de réfraction (réels et imaginaires) des échantillons de poussières collectés à Dakar seront utilisés comme paramètres d'entrée des modèles utilisés dans cette thèse. Les particules collectées sur la surface des panneaux PV à Dakar sont analysés grâce à un ellipsomètre. Cet instrument dont le fonctionnement est décrit par Pristinski et al. (2006) permet de déterminer les indices de réfractions en fonction de la longueur d'onde. En plus des données de l'ellipsomètre, nous disposons les indices optiques mesurés par le photomètre de la station AERONET de Dakar (Holben et al., 1998) sur la même période. Le photomètre AERONET détermine les indices de réfraction des poussières en suspension dans l'atmosphère avant leur dépôt sur les panneaux solaires sur quatre longueurs d'onde. Pour valider les résultats de l'éllipsométre, nous les comparons à ceux mesurés par le photomètre. La figure 4.1 illustre bien cette comparaison entre les indices réels figure 4.1a et imaginaires figure 4.1b de la poussière. Elles sont obtenues grâce à l'éllipsomètre (courbe noire) et au photomètre solaire (points bleus). D'abord, elle révèle que ce sont les mêmes particules qui étaient suspendues dans l'atmosphère, qui se sont déposées sur la surface des panneaux solaires à Dakar. On note que la concordance est plus nette dans le visible entre 500 et 650 nm de longueur d'onde. Ces résultats montrent que, cette poudre est constituée de poussière (sable) en concordance (Schneider et al., 2016; Mackey et al., 2010). En résumé, on peut dire que ces figures permettent de valider les indices de réfraction de l'ellipsomètre surtout dans le visible où les courbes sont en très bon accord. Par conséquent, ces indices obtenus seront utilisés dans la suite de notre travail comme paramètres d'entrée des modèles qui simuleront les pertes en propriétés optiques et électriques en présence de poussières sur la surface des panneaux PV.

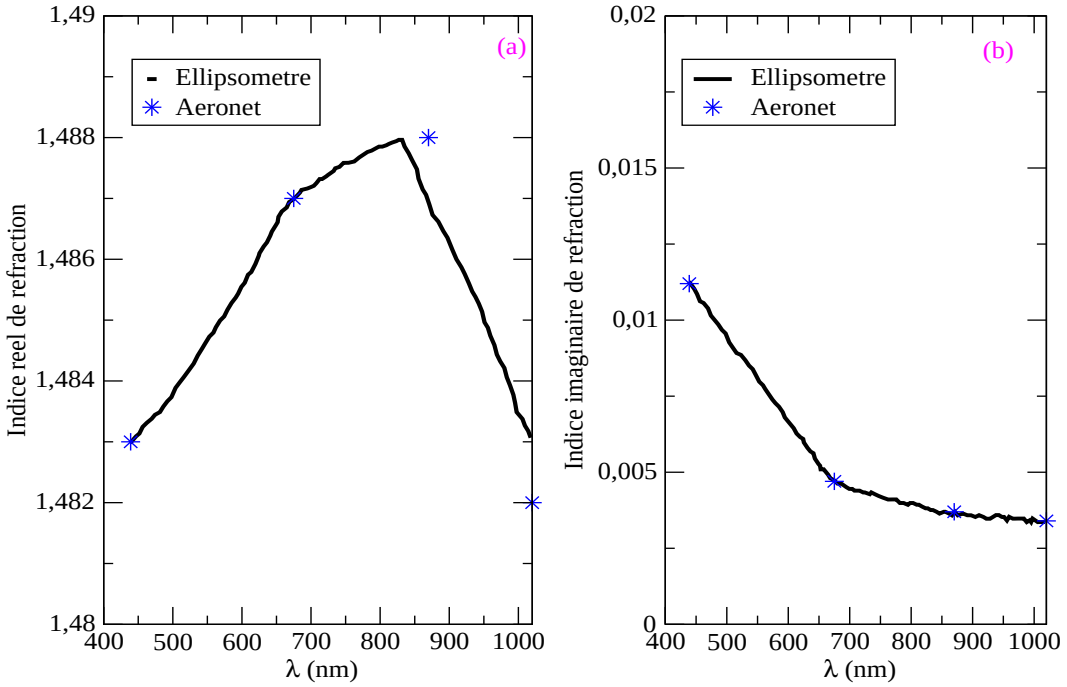

Figure 4.1: Validation des indices de réfractions de l'éllipsomètre (courbes noires) par les données atmosphériques issues du photomètre AERONET (points bleus). Comparaison entre les indices réels à gauche et les indices imaginaires à droite.

4.2.1.2 Autres propriétés optiques de la poussière collectée

L'étude des propriétés optiques des particules collectées comme les indices de réfractions a montré que ces aérosols sont constitués de poussières désertiques. Par conséquent, c'est la même poussière qui était suspendue dans l'atmosphère qui s'est déposée par sédimentation sur la surface des panneaux solaires à Dakar entre Octobre 2016 et Juin 2017. En plus de ces indices, le photomètre solaire permet d'obtenir d'autres propriétés optiques des aérosols atmosphériques. Sur le tableau 4.1, nous enregistrons les valeurs moyennes (entre Octobre 2016 et Juin 2017) de ces paramètres que sont, l'épaisseur optique des aérosols (AOD), le coefficient d'Angström (α), l'albédo de simple diffusion (SSA) et le facteur d'asymétrie (g).

AOD	$\alpha_{440-870}$	SSA	Facteur assymétrie(g)
0,41	0,27	0,96	0,72

Table 4.1: Observations mensuelles moyennes du réseau de robots aérosols (AERONET) à Dakar d'octobre 2016 à juin 2017. Les paramètres sont l'épaisseur optique totale des aérosols, le coefficient d'angström ($\alpha_{440-870}$), l'albédo à diffusion simple et le facteur asymétrie

En effet, l'AOD exprime la quantité d'aérosol présente dans l'atmosphère, le coefficient d'Angström (α) est un indicateur de la taille des particules, l'albédo de simple diffusion permet de mettre en évidence le caractère diffusif et/ou d'absorbance des particules et le facteur d'asymétrie détermine la direction préférentielle du rayonnement diffusé par une particule par rapport au rayonnement incident.
D'abord, on constate que l'AOD a une valeur autour de 0,41; ceci indique que l'atmosphère de Dakar est moyennement chargée en aérosol durant cette période. En effet, l'AOD d'une atmosphère claire avoisine la valeur 0 alors que celle d'une atmosphère poussiéreuse dépasse 0,6. Ensuite, l'albédo de simple diffusion (SSA) avec une valeur moyenne autour de 0,94 montre qu'on est en présence de particules exclusivement diffusant et de surcroît des poussières désertiques (Diarra and Ba, 2014). En effet, plus une particule est diffusant plus son albédo de simple diffusion tend vers 1. Notons que, les poussières (sable) sont connues pour être des particules purement diffusant avec un SSA de l'ordre de 1 (Houghton et al., 2001). Le coefficient d'Angström faible (0,27) révèle que la plupart des particules sont de taille grosse ce qui confirme leur nature désertique (poussières). Et enfin, le facteur d'asymétrie assez proche de 1 en l'occurrence 0,72 (72%), indique d'une part que ces aérosols ne sont pas de forme sphérique et d'autres part qu'ils ont tendance á diffuser le rayonnement solaire vers l'arrière (rétrodiffusion) (Ogunjobi et al., 2008). En effet, plusieurs études ont montré, qu'une valeur positive de ce facteur est synonyme d'une diffusion prépondérante dans la direction inverse de propagation du rayonnement incident (Mallet et al., 2008; Kiehl et al., 2000).

En résumé, les résultats du tableau 4.1 montrent clairement que l'atmosphère de Dakar est en grande partie constituée de poussières désertiques avec une capacité diffusive d'environ 72% vers l'arrière.

4.2.2 Taille et forme des particules

4.2.2.1 Taille des particules suspendues dans l'atmosphère de Dakar

La figure 4.2 représente la distribution en taille (AERONET) moyenne des particules suspendues dans l'atmosphère de Dakar entre Octobre 2016 et Juin 2017 à Dakar. Nous constatons que le rayon des particules sur le site de Dakar est compris entre 1 et 10 μm. Cependant, la majorité d'entre elles sont du mode grossier avec une taille centrée autour de 2,3 μm. Les résultats du tableau 4.1 et de la figure 4.2 montrent clairement qu'on est en présence de particules purement diffusant et de grosse taille ce qui s'avère être des poussières désertiques.

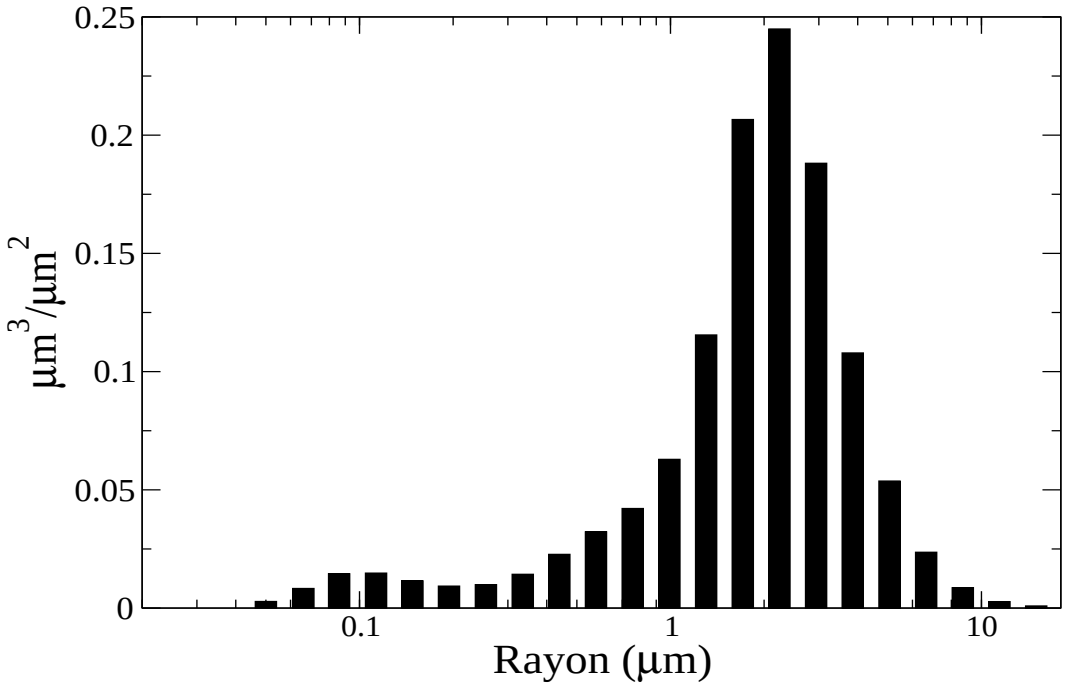

Figure 4.2: Moyenne de la distribution en taille AERONET des particules entre Octobre 2016 et Juin 2017 à Dakar.

4.2.2.2 Forme et morphologie des poussières collectées : Analyse par MEB et EDS

La morphologie et la cartographie de la distribution des poussières collectées, sur les surfaces des panneaux PV, ont été caractérisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage à émission de champ Zeiss Ultra plus 55 (FE-SEM) à haute résolution, fonctionnant à une tension de travail de 2,0 kV. Ainsi, nous représentons sur la figure 4.3 les images des grains de poussières obtenus, grâce au MEB avec différents grossissement. En effet, ces particules ont été observées avec des grossissement respectifs de 10 μm (figure 4.3a), de 1 μm (figure 4.3b), de 0,2 μm (figure 4.3c) et de 0,1 μm (figure 4.3d). On constate que cette poussière est un agrégat de petites particules de tailles comprises entre 0,1 et 10 μm. Cependant, aucune forme particulière n'apparaît dans ces différentes images.

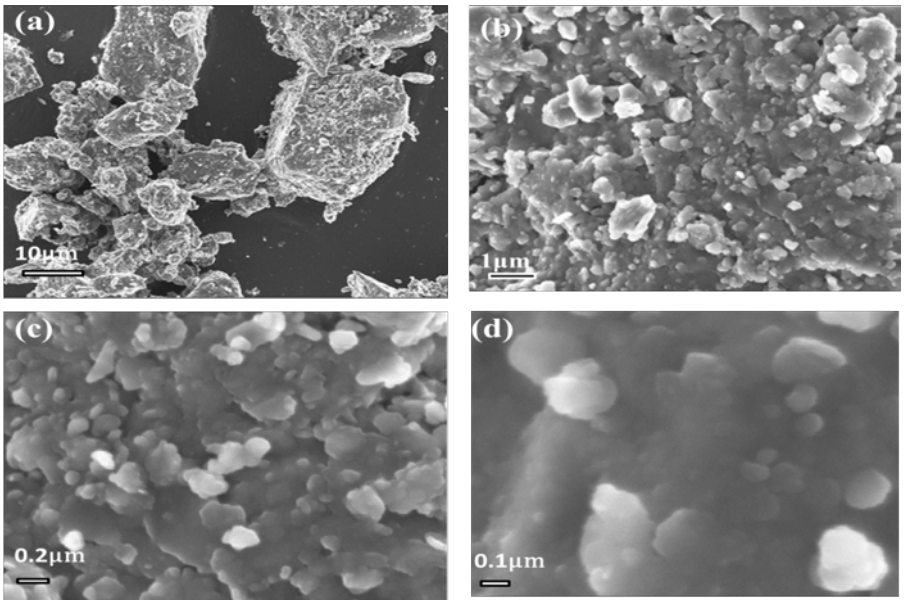

Figure 4.3: (a – d) Image des particules de poussière collectées directement sur les surfaces des panneaux photovoltaïques obtenues par le (MEB) avec un grossissement de 10 (a) ; 1 (b); 0,2 (c); et 0,1 μm (d) situés à l'Université Cheikh Anta Diop (Dakar, Sénégal).

Une autre vue de cette poussière à l'échelle électronique est illustrée sur la figure 4.4. Elle confirme les résultats précédents en indiquant que cette poussière est constituée de particules sans formes particulière. De plus, les plus grosses particules autour de 25 μm sont peu nombreux.

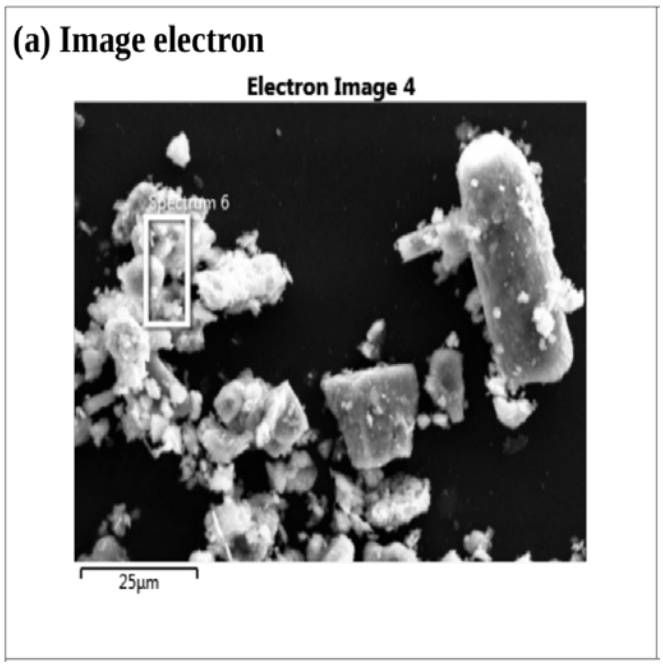

Figure 4.4: Image Électron.

A partir des images du MEB, nous effectuons la distribution fréquentielle en des tailles de particules de l'échantillon étudié. La figure 4.5 représente le nombre de particules (%) en fonction de la taille des grains.

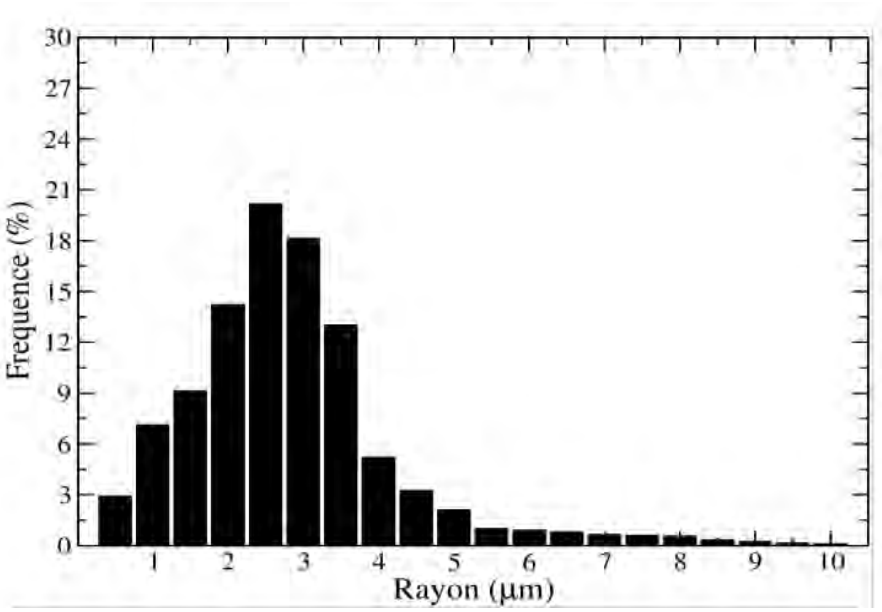

Figure 4.5: Distribution fréquentielle des tailles des particules dans l'échantillon de poussières collecté à Dakar.

D'abord, on constate que les particules collectées sur la surface des panneaux solaires ont une taille qui varie de 0 à 10 μm. De plus, comme pour la distribution en taille AERONET, la plupart des grains ont une taille de 2,5 μm. Par ailleurs, cette distribution ressemble à une gaussienne centrée autour de 2,5 μm. En résumé, on peut tirer quelques conclusions sur l'analyse de ces différentes figures. D'abord, on constate que ces particules n'ont pas de forme apparente, ce qui est en conformité avec la valeur du facteur d'asymétrie autour de 0,72. En effet, le coefficient d'asymétrie d'une particule sphérique est égal à 0 et celle des poussières est comprise entre 0,6 et 1. Ensuite, on retrouve le même résultat que la distribution en taille des AERONET avec de grosses particules dont la taille est comprise entre 0 et 10 μm. Et enfin, ces résultats révèlent que la plupart de ces grains ont une taille autour 2,5 μm.

4.3 Identification des éléments chimiques composants la poussière avec plusieurs techniques de caractérisation

4.3.1 Résultats obtenus par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS)

Le MEB à émission de champ Zeiss Ultra plus 55 (FE-SEM) est couplé d'un détecteur de signaux pour l'analyse de la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie. Ainsi, la figure 4.6 représente les résultats de l'analyse des échantillons de poussières obtenus par la spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS). Cette technique permet d'une part d'identifier les différents éléments chimiques (atomiques) qui composent cette poussière (figure 4.6a) et d'autres part de déterminer la teneur en concentration de chaque élément (figure 4.6b). Cette figure montre que les éléments atomiques contenus dans les particules de poussières ne sont pas uniformes avec des concentrations différentes. Ainsi, les éléments chimiques retrouvés dans ces échantillons sont respectivement l'Oxygène (O) 48,5%, le Silicium (Si) 24,1%, l'Aluminium (Al) 9,78%, le Fer (Fe) 8,11%, le Calcium (Ca) 4,17%, le Magnésium (Mg) 1,59%, le potassium (K) 1,08%, le Chlore (Cl) 1,05%, le sodium (Na) 0,92% et le Titane (Ti) 0,67%. Cependant, selon Aïssa et al. (2016), le contenu atomique quantitatif de l'oxygène doit être pris avec un soin particulier, car l'EDS n'est pas une technique appropriée pour sonder cet élément.

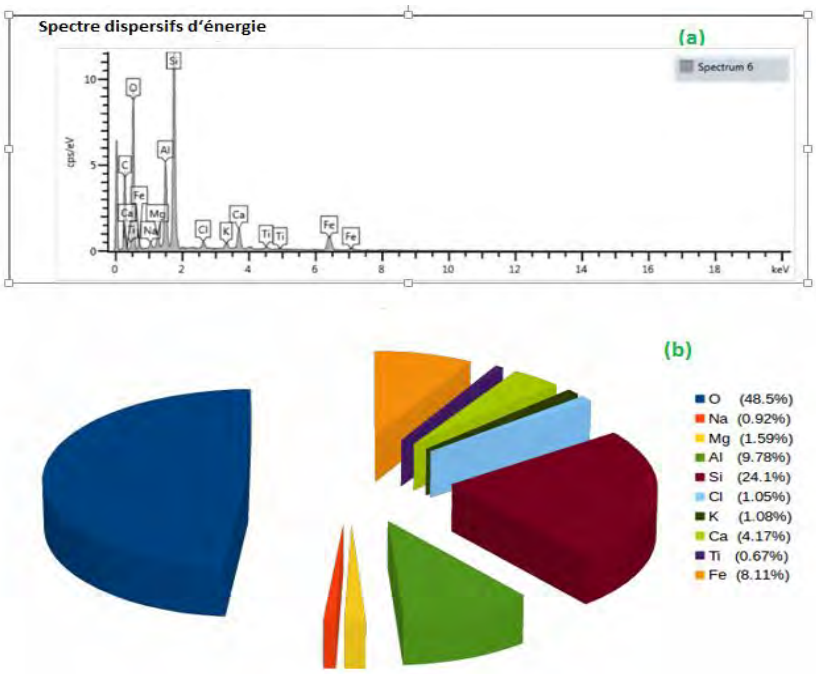

Figure 4.6: Spectres dispersifs d'énergie des particules de poussière (a) et (b) Analyse élémentaire (% de contenu atomique) réalisée au laboratoire.

Une autre analyse élémentaire (EDS) a été réalisée sur un des échantillons par un autre type de spectromètre en l'occurrence le Rigaku Supermini 200 WDXRF. En effet, elle montre presque les mêmes pourcentages que l'analyse de la technique précédente, surtout pour les éléments atomiques majoritaires. Outre ces éléments majoritaires, d'autres éléments sous forme de trace ont été retrouvés par cette technique de caractérisation comme, le Soufre (S) 0,43%, le Phosphore (P) 0,28%, le Manganèse (Mn) 0,13%, le Zinc (Zn) 0,08%, le Strontium (Sr) 0,06%, le Zirconium (Zr) 0,05% et le Chrome (Cr) 0,03% (figure 4.7. Les traces de potassium (P) pourraient être dues à la proximité de la mer. Contrairement aux travaux de Reid et al. (2003), les deux échantillons de poussière africains contiennent à la fois du sodium et du chlorure.

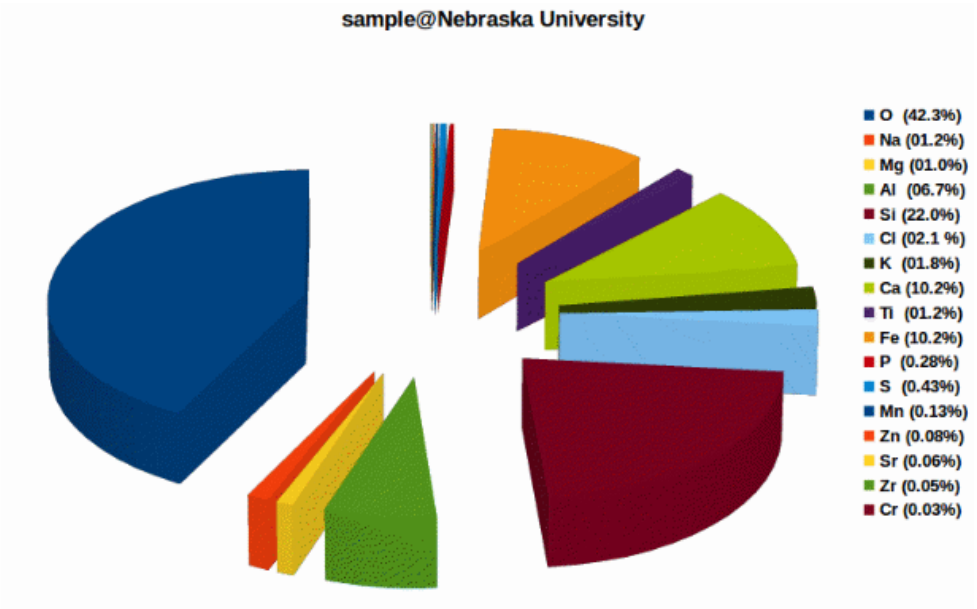

Figure 4.7: Analyse élémentaire (% de contenu atomique) par spectromètre Rigaku Supermini 200 WDXRF réalisée à Nebraska.

4.3.2 Identification des éléments chimiques par fluorescence aux rayons X (XRF) des échantillons de poussières

Une troisième technique de caractérisation (fluorescence aux rayons X) des éléments chimiques a été effectuée. La figure 4.8 illustre l'analyse élémentaire par fluorescence aux rayons X (XRF) des échantillons de poussières. Comme pour les deux techniques précédentes, on retrouve à peu près les même éléments majoritaires que sont le Si, le Fe, le Ca, le K, le, Ti, le P et le S. Cependant, certains éléments comme le Cr, le Cu, le Zn, le Zr, le Mn et le Sr sont minoritaires. Enfin, les éléments chimiques tels que, le Cd, le Br et le Pb sont très minoritaires c'est à dire sont sous forme de traces.

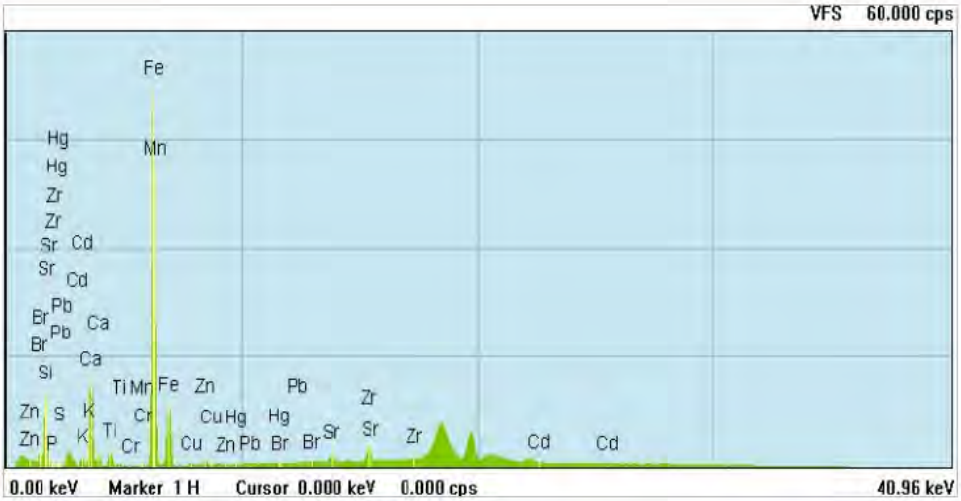

Figure 4.8: Composition des éléments chimiques détectés dans la poussière de Dakar par XRF.

La figure 4.9 représente la concentration de chaque élément détecté dans la poussière par fluorescence aux rayons X. Elle montre les proportions en masse de chaque élément chimique détecté dans la poussière.

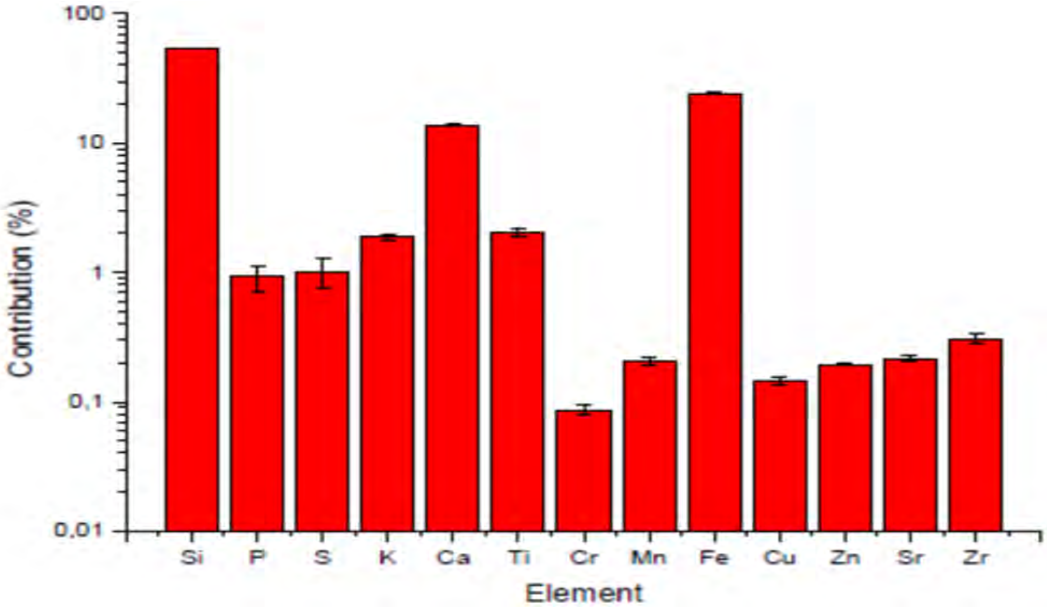

Figure 4.9: Pourcentage en masse et éléments détectés dans la poussière collectée à Dakar.

L'analyse révèle que cette poussière est constituée en majorité de Silicium (Si) avec un taux de plus 50,10% de la masse totale. Le reste des éléments est constitué du Fe avec 16,81%, (Ca) 10,63%, (K) 1,51%, (Ti) 1,44%, (P) 0,99% et du (S) avec 0,56% de la masse totale. Des éléments comme le Cu, Zn, Sr, Zr qui sont très faibles en terme de pourcentage, sont également décelés par cette technique. Cependant, l'analyse chimique par fluorescence aux rayons X (XRF) ne permet pas de détecter les éléments très légers comme l'aluminium. Les résultats d'analyse de la figure 4.9 révèlent une forte concentration en Silicium, en Calcium et en Fer dans la poussière collectée à Dakar. Par conséquent, cela pourrait être attribuée à une composition proche de celle du sable (poussière) (Messaoudene et al., 2012; Byers et al., 2016).

La figure 4.10 montre une comparaison de la concentration en masse de la composition des poussières collectées au Sénégal avec deux types de sables (poussières) de référence standardisés et certifiés par l'Institut National des Normes et de la Technologie des États-Unis que sont les matériaux de référence standard SRM2709a et SRM2710 respectivement de San Joaquin (36°36'N Latitude, 120°11'W Longitude) et de Montana (46°57'N Latitude, 109°32'W Longitude) (Schneider et al., 2016; Mackey et al., 2010). Ces deux matériaux sont utilisés comme éléments de références et de validations pour déterminer les concentrations des éléments du sable. On retrouve les mêmes éléments chimiques pour ces trois échantillons, ce qui prouve que la poussière collectée à Dakar est effectivement constituée de sable. Cependant, les éléments majoritaires tels que, le Si, Ca, Fe, S et le P sont plus importants en masse dans la poussière saharienne que les deux autres échantillons. Par conséquent, cela prouve la nature désertiques de la poussière collectée à Dakar (Li et al., 1995).

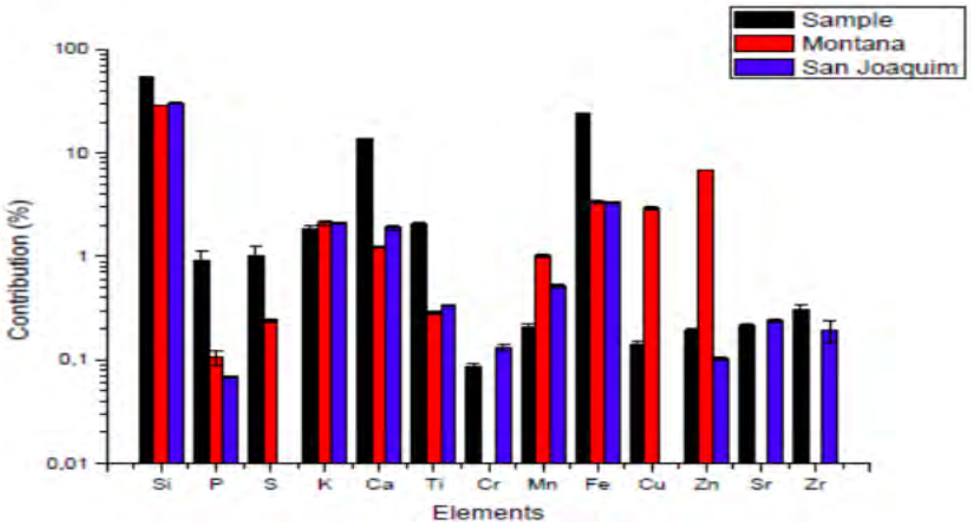

Figure 4.10: Comparaison entre la poussière collectée (en noir) et deux échantillons de sables de références standardisés et certifiés nommés, SRM-2709a et SRM-2710 respectivement de San Joaquin (en bleu) et de Montana (en rouge) aux USA.

4.4 Caractérisation de la composition moléculaire par diffraction des rayons X

Afin de déterminer la composante moléculaire de cette poussière, la diffraction des rayons X a été réalisée sur les échantillons collectés sur les mêmes panneaux solaires. La figure 4.11 représente le diagramme de diffraction des rayon X des poussières collectées et analysées. Le diagramme de diffraction des rayons X (XRD) a été obtenu à l'aide d'un diffractomètre (Brucker D8 Advance) à géométrie thêta/2thêta, fonctionnant avec une source de rayons X Cu (K, 1,5418 Ä) à 2Θ valeurs comprises entre 10° et 80°.

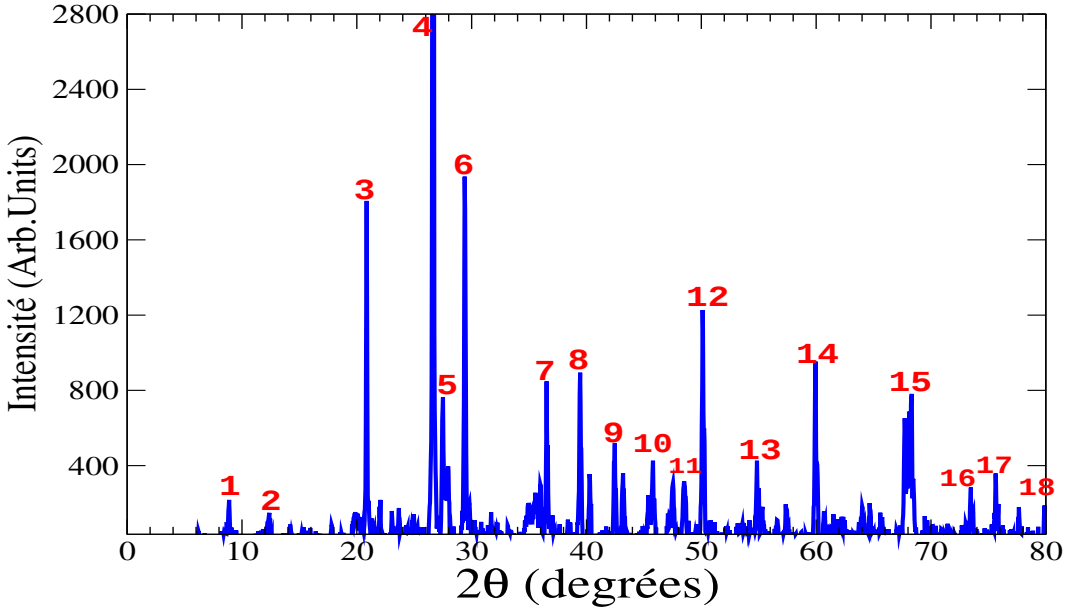

Figure 4.11: Identification des pics du spectre de diffraction des rayons X des particules de poussière à Dakar, Sénégal, en Afrique de l'Ouest par le logiciel X'Pert High Score Plus.

Elle représente l'intensité mesurée par le détecteur en fonction de la valeur de 2Θ (variant dans cette thèse de 0° à 80°). Un signal (raie ou pic de diffraction) apparaît sur ce diagramme aux positions 2Θ, où la condition de Bragg est remplie pour les séries de plans parallèles à la surface d'un monocristal, ou des grains d'un polycristal (Bibienne, 2015). L'exploitation de ce diagramme mène aux structures cristallines des molécules constituants des poussières. Pour identifier et exploiter ce spectre de DRX, nous avons utilisé le logiciel d'analyse en poudre de la diffraction des rayons X du fournisseur PANalytical (version X'Pert High Score Plus). Les molécules qui composent cet échantillon sont clairement identifiées par analyse des pics de la figure 4.11. La molécule qui correspond à chaque pic de la figure 4.11 est représentée sur le tableau 4.2 par numéro du pic concerné. Globalement, le tableau 4.2 résume la nature des principaux pics de la figure 4.11.

Pic	$2\theta(°)$	Formule Chimique de la phase
1	8,8600	SiO_2, $Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$
2	12,3824	$Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$
3	20,8761	SiO_2 alpha
4	26,5959	SiO_2 alpha
5	27,5882	$Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$
6	29,4570	$CaCO_3$, $Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$
7	35,1462	SiO_2, $CaCO_3$, FeOCl, $Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$
8	36,5327	SiO_2, $CaCO_3$
9	39,6126	SiO_2
10	45,7978	SiO_2 alpha ,$Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$
11	47,5021	$Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$
12	50,1503	SiO_2, FeOCl, $Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$
13	54,9035	SiO_2 alpha
14	59,9934	SiO_2, $CaCO_3$
15	68,3129	SiO_2 , SiO_2 alpha
16	73,5210	$CaCO_3$
17	75,6607	$CaCO_3$
18	77,5236	FeOCl, $CaCO_3$, SiO_2

Table 4.2: Synthèse des principaux composés chimiques de l'échantillon de poussières identifiés par diffraction des rayons X

L'analyse révèle que cette poussière est principalement composée de quartz (SiO_2), de quartz-a (SiO_2-alpha), de calcite ($CaCO_3$), d'oxychlorure de fer (FeOCl), de Kaersutite ($Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$) et de Mantienneite ($Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$) (Fransolet et al., 1984; Goldsztaub, 1935). Cependant, cette technique n'a pas permis de connaître la teneur de chaque composée dans l'échantillon .

La même procédure a été effectuée à l'université du Nebraska (USA) sur une autre partie du même échantillon par une autre technique d'identification moléculaire. La phase de recherche de concordance a été réalisée par le programme PDF-4 du centre international pour les données de diffraction (ICDD) (Aubin, 2013). L'analyse montre que le composé est un mélange avec la phase prédominante du quartz de type SiO_2. La deuxième phase est vraisemblablement du $CaCO_3$. Les résultats sont résumés sur la figure ci dessous (4.12). Ils montrent que cette poussière est composée de 51,5% de quartz-a (SiO_2 alpha), 22,3% de quartz (SiO_2) et 13,6% de calcite ($CaCO_3$). Le reste (12,6%) n'a pas pu être identifié par cette technique de caractérisation.

Figure 4.12: Diffractogramme de rayons X des poussières sahariennes du programme PDF-4.

En résumé, la complémentarité entre ces deux techniques d'identification permet d'avoir une analyse moléculaire complète de l'échantillon avec la teneur de chaque composé. Le tableau 4.3 présente un bilan complet de l'analyse des échantillons de poussières effectués avec la tenure de chaque composé. En effet, les principales structures possibles obtenues par analyse XRD sont le Quartz avec 73,8 %, et la calcite avec 13,6 %. Enfin, le reste (12,6 %) est un mélange d'oxychlorure de fer, de kaersutite et de mantienneite.

Nom de formule	**Formule chimique**	**Taux dans la poussière (%)**
Oxyde de silicium - alpha	SiO_2	51,5
Oxyde de silicium	SiO_2	22,3
Carbonate de Calcium	$CaCO_3$	13,6
Oxychlorure de fer Mantiennéite Kaersutite	FeOCl $Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$ $Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$	12,6

Table 4.3: Compositions des structures possibles des particules de poussière identifiées par le programme ICDD à partir de l'analyse XRD.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, différents échantillons de poussières ont été collectés sur la surface des panneaux solaires entre Octobre 2016 et Juin 2017 à Dakar. Ainsi, plusieurs techniques de caractérisation tels que, la DRX, EDS, XRF ...ont été utilisées pour analyser cette poussière collectée. L'objectif de cette partie consistait à étudier les propriétés structurelles et physico-chimiques des particules recueillies. D'abord, nous avons étudié ces aérosols avant leur dépôt par des techniques de télédétection grâce au photomètre d'AERONET stationné à Dakar. Les résultats ont permis de conclure que, les particules contenues dans l'atmosphère de Dakar durant cette période sont de forme quelconque et non sphérique avec de grosses tailles centrées autour de 2 μm. Aussi, l'analyse radiative révèle que ces particules sont purement diffusant et surtout vers l'arrière. Par conséquent, un premier bilan permet d'indiquer que ces aérosols atmosphériques sont effectivement constitués par des poussières désertiques.
Ensuite, les échantillons collectés sur la surface des systèmes PV ont été soumis à plusieurs techniques de caractérisation au laboratoire. Concernant la taille et la forme, on retrouve les mêmes conclusions que la technique par télédétection. Ce sont les mêmes particules qui se trouvaient dans l'atmosphère de Dakar qui se sont déposées plus tard sur la surface de ces panneaux par sédimentation. Les résultats de l'analyse de la composition élémentaire de la poussière étudiée par des techniques de diffraction à rayons X indiquent que les échantillons de poussières sont dominés par des éléments cristallins tels que O, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Mn et Fe. D'autres éléments tels que le P, S, Zn, Sr, Zr et Cr très minoritaires ou sous forme de traces ont été aussi identifiés. L'analyse moléculaire montre que cette poussière est un mélange de différents composés chimiques avec une phase prédominante constituée du quartz de type SiO_2 (environ 73,8% du total) et la seconde phase est de type calcite $CaCO_3$ représentant 13,6% de la poussière collectée à Dakar. Le reste qui est estimé à 12,6%, est un mélange d'oxychlorure de fer (FeOCl), de mantienneite ($Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$) et de kaersutite ($Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$).

Chapitre 5

Modélisation des pertes en propriétés optiques et électriques dues aux dépôts secs de poussières sur les cellules photovoltaïques

5.1 Introduction

Ce chapitre évalue l'impact du dépôt de poussière sur le rayonnement solaire et le rendement des panneaux solaires à Dakar, au Sénégal. L'interaction entre les particules et le rayonnement solaire entraîne une altération de cette dernière par des phénomènes de réflexion, de diffusion ou d'absorption. Par ailleurs, notons que les poussières désertiques qui font l'objet de cette thèse sont plutôt des particules diffusant (Drame et al., 2011). Pour ce faire, nous implémentons deux modèles estimant les pertes dues au dépôts de poussière sur les systèmes PV. Il s'agit des pertes en propriétés optiques du rayonnement et celle en propriétés électriques des panneaux PV dues aux dépôts secs de poussière.
Les approches matricielles et récursives sont les plus utilisées (Sahouane, 2016) pour l'étude de réflectivité ou de transmittance des couches minces. Ainsi, la première approche est basée sur le formalisme introduit par Abelès (1950) et présenté en détail par Pardo et al. (1988); Katsidis et al. (2002). Souvent, les codes de calcules pour des empilements multicouches qui sont basés sur la méthode récursive sont aussi utilisés, même si les couches ne sont pas très nombreuses (Delmotte, 2010). D'ailleurs, l'approche du calcul de réflectivité et de la transmission d'un empilement multicouche est effectuée dans plusieurs travaux tels que dans (Macleod, 2017).
Pour l'étude des pertes des propriétés électriques des cellules solaires à base de silicium, nous considérons un empilement de couche poussière/verre/silicium. Ainsi, la couche de silicium est modélisée comme étant une jonction PN comme représentée dans le modèle de Mahfoud (2018).
Ce chapitre est constitué de trois parties.
D'abord, nous évaluons avec des mesures au laboratoire, l'impact d'une couche mince de poussière sur un rayonnement électromagnétique envoyé. Ensuite, avec le dispositif Air/poussière/verre, nous simulons les pertes en réflectance et en transmittance en fonction de la taille de la couche de poussière.
Et enfin, avec le dernier code nous estimons les pertes en propriétés électriques du dispositif poussière/verre/silicium. Il s'agit entre autres des paramètres comme, la densité de courant de court-circuit, la puissance produite, le rendement et le facteur de forme de la cellule photovoltaïque à base de silicium.

5.2 Quelques mesures de l'impact du dépôt de poussières sur le rayonnement au laboratoire

5.2.1 Préambule

Avant l'analyse par modélisation, nous avons eu à effectuer quelques manipulations au laboratoire qui ont permis d'effectuer une étude préliminaire sur l'impact du dépôt de poussière sur le rayonnement. Pour ce faire, des couches minces de poussière ont été déposées sur des substrats de verre avec un spin coater. Après, les résultats issus de ces spectromètres ont été utilisés pour évaluer les pertes en réflectance et en transmittance du rayonnement électromagnétique envoyé.

5.2.2 Évaluation de l'impact de la poussière sur le rayonnement par réflectance diffuse

La figure 5.1 représente le spectre de réflectance de la poussière par spectrophotométrie à réflectance diffuse de l'ultraviolet au proche infrarouge.

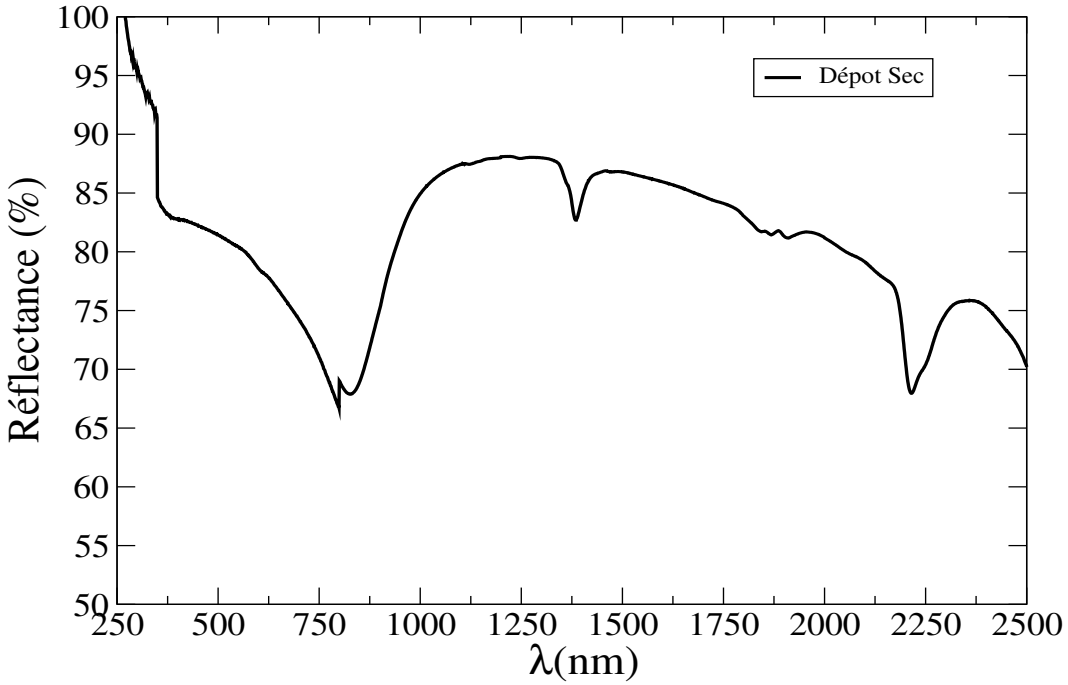

Figure 5.1: Spectres de réflexion (réflectance diffuse, spectrophotomètre UV-Vis-NIR) d'un échantillon de poussière collecté à Dakar en Juin 2017.

Ainsi, elle illustre l'interaction entre la lumière et la couche mince de poussière sur la plage de rayonnement solaire comprise entre 250 nm et 2500 nm. Cependant, la taille de la couche mince sur laquelle on a envoyé le rayonnement électromagnétique n'a pas pu être déterminée. Cette figure révèle que, la réflectance des particules de poussière dans la longueur d'onde de l'émission solaire (400 à 800 nm) est d'environ 70 %. Par conséquent on a conclu que cette couche de poussière pourrait renvoyer plus de trois quart du rayonnement solaire qui arrive à la surface des panneaux photovoltaïques par réflexion vers l'arrière.

5.2.3 Mesure de la transmittance par le spectrophotomètre

Après avoir réalisé une couche mince de poussière déposée sur un substrat de verre, au laboratoire Laplace de Toulouse (France), nous envoyons un rayonnement électromagnétique avec un spectrophotomètre UV-Visible. Avec cet appareil, nous mesurons la transmittance du spectre dans le visible d'un verre propre, ensuite celle d'un verre revêtue d'une couche de poussière d'épaisseur 35 μm (correspondant à un dépôt de 1,63 g/m^2). Au moment de cette manipulation nous disposions d'un Microscope optique numérique Kéyence qui nous a permis de déterminer l'épaisseur de la couche mince de poussière en μm. Ainsi, la figure 5.2 représente l'évolution des transmittances mesurées expérimentalement par le spectrophotomètre pour un système poussière-verre (courbe en couleur noire) et celle pour un verre propre (courbe en couleur cyan). On constate que le verre propre sans poussière laisse passer plus de 95% du rayonnement arrivant. Une forte diminution de la transmittance est enregistrée pour le verre revêtu d'une couche de poussière par rapport au verre propre. Ces données seront utilisées plus tard comme outils de validation des transmittances simulées par le modèle optique utilisé dans cette thèse.

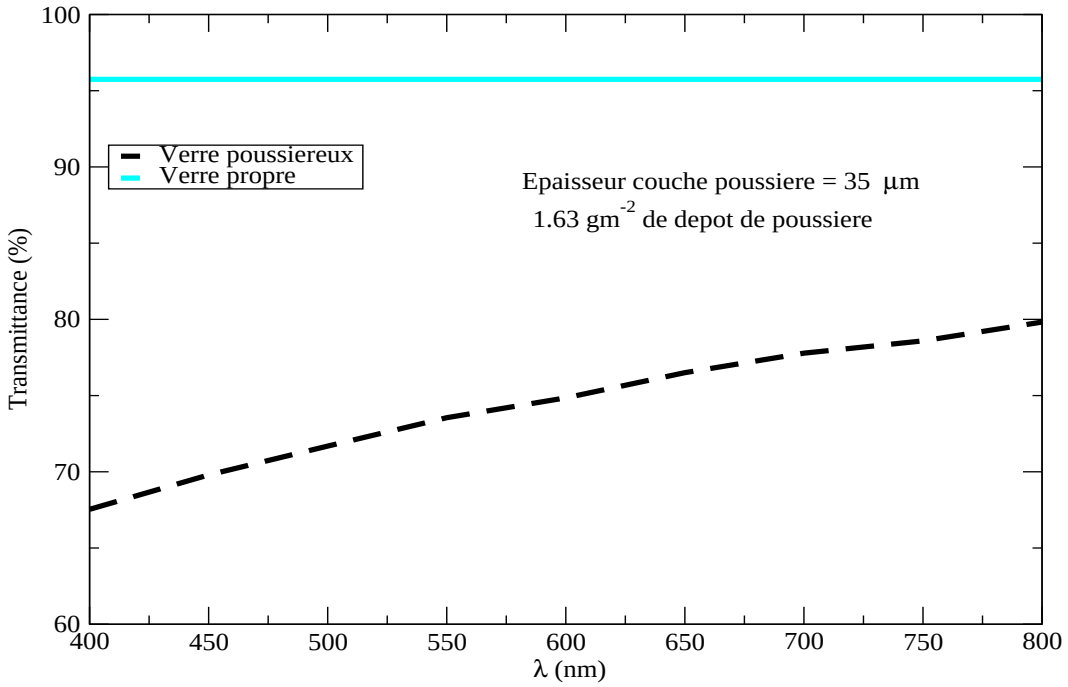

Figure 5.2: Transmittance mesurée par le spectrophotomètre (en noir) pour une couche de poussière d'épaisseur de 35 μm déposée sur un substrat de verre. La courbe en couleur cyan représente la transmittance du verre propre.

5.3 Modélisation des pertes en propriétés optiques

5.3.1 Validation de la transmittance simulée

Pour valider les sorties du code optique (les paramètres de l'équation (2.13)) proposé dans cette thèse, les données expérimentales obtenues grâce au spectrophotomètre UV-Visible ont été utilisées. En effet, la figure 5.3 illustre la comparaison entre les transmittances simulées (en rouge), mesurée (en noire) et de celle d'un verre propre en couleur cyan. Premièrement, les résultats révèlent qu'une couche mince d'épaisseur 35 μm de poussière (correspondant à un dépôt de 1,63 g/m^2) laisse passer (transmittance) en moyenne de 75 % du rayonnement solaire correspondant à peu près à 21% de perte par rapport au verre propre.

Ensuite, la comparaison montre un bon accord entre les transmittances mesurées et simulées surtout dans le visible entre 450 et 800 nm. En effet, on enregistre un coefficient de corrélation de plus de 88 % entre ces deux produits.

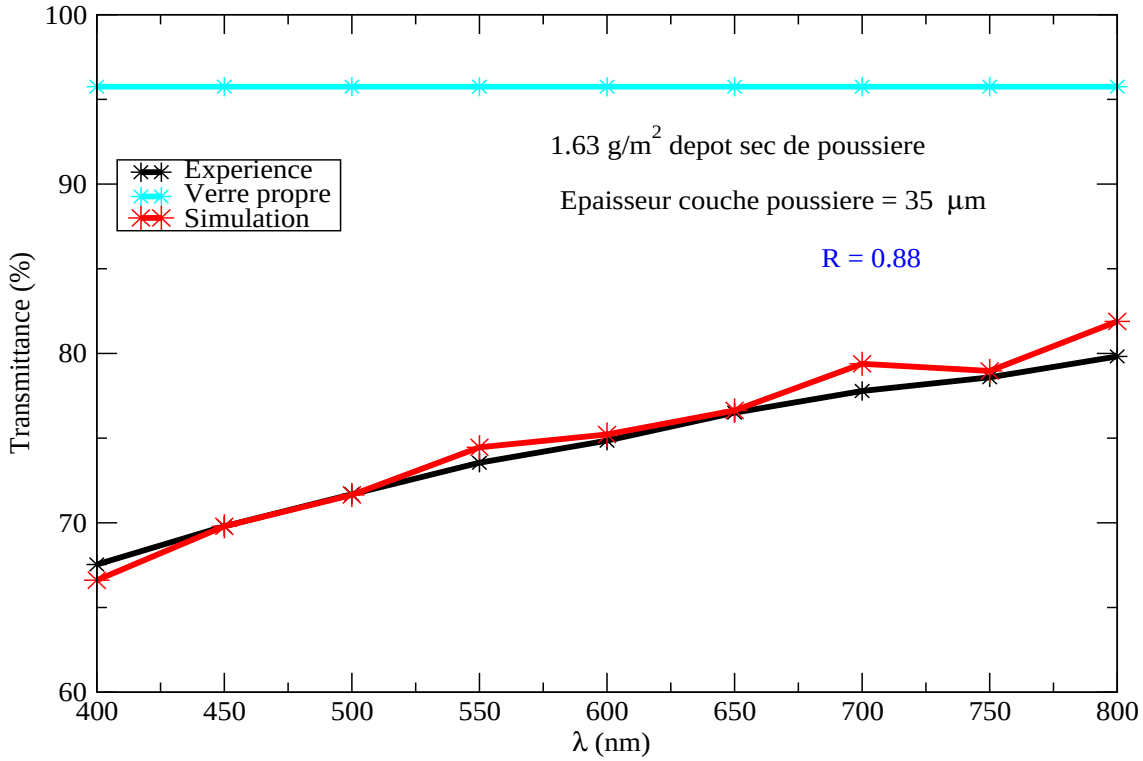

Figure 5.3: Comparaison entre la transmittance mesurée par le spectrophotomètre (en noir) et simulée par le modèle (en rouge) pour une couche de poussière d'épaisseur de 35 μm. La courbe en couleur cyan représente la transmittance du verre propre

5.3.2 Perte en transmittance du rayonnement solaire en présence de la poussière

Après la validation du modèle, nous procédons à des études de sensibilités puis à l'évaluation de l'impact de différentes couches de poussières sur les composantes du rayonnement. La première étape consiste à simuler l'influence des couches de poussières sur la transmission du rayonnement solaire. Pour cela, on exécute le code avec différentes tailles de couches de poussières. La figure 5.4 représente la transmittance du système air-poussière-verre pour différentes tailles de couche de poussières.

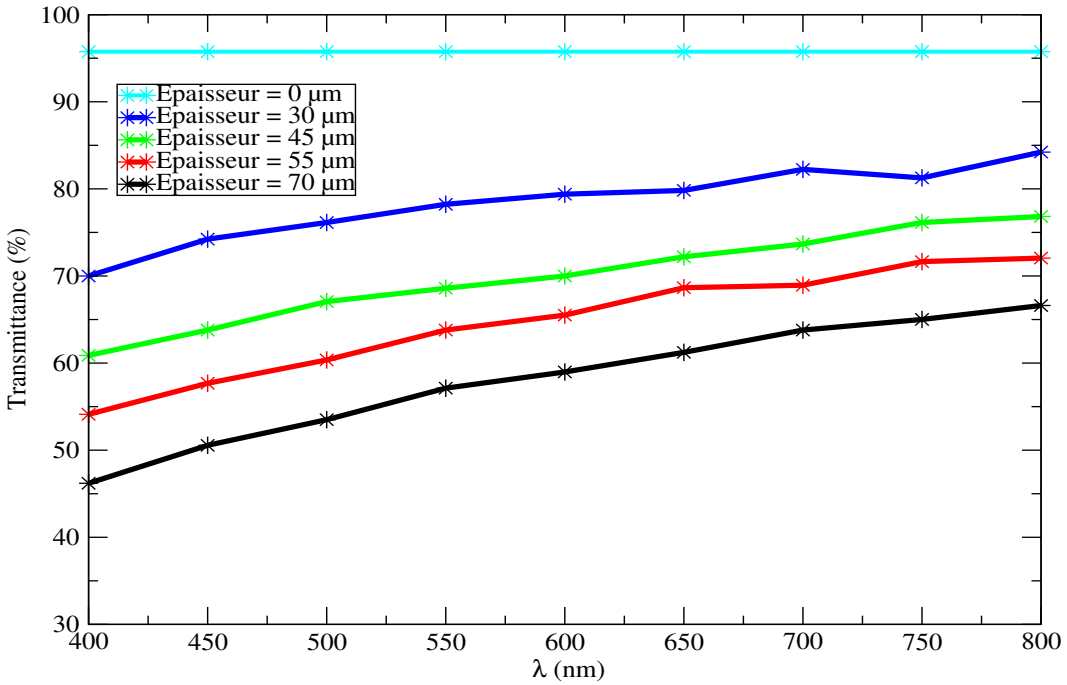

Figure 5.4: Simulation des transmittances du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde pour différentes couches de poussières d'épaisseurs de 30, 45, 55 et de 70 μm.

Il s'agit des couches de poussière de taille 30 μm, 45 μm, 55 μm et 70 μm, correspondant respectivement à un dépôt de poussière de 1,4 g/m^2, 2,1 g/m^2, 2,6 g/m^2 et 3,3 g/m^2. En effet, la conversion entre la taille de la couche en μm et le dépôt de poussières en g/m^2 est effectuée en considérant une masse volumique de la poussière Saharienne de l'ordre de 2,6 g/m^3 selon Ansmann et al. (2012). La courbe en cyan sur la figure 5.4 représente la transmittance du verre propre sans poussière (système air-verre propre) qui est considérée comme la référence. Globalement, on note que le verre propre laisse passer presque tout le rayonnement incident avec une transmittance de l'ordre de 95 %. Après, la figure 5.4 montre qu'un dépôt de poussière de 1,4 g/m^2 (une épaisseur de poussière de taille de

l'ordre de 30 μm) laisse passer en moyenne 78 % du spectre solaire correspondant à une diminution de 18 % de transmittance du rayonnement solaire par rapport à la référence. Ensuite, plus la taille de la couche augmente, moins il y a de rayonnement qui passe. En effet, pour des tailles de couche d'épaisseur de 45, 55 et de 70 μm, la transmittance moyenne est respectivement de 70%, 65% et de 58%. En effet, ces figures montrent aussi que les transmittances sont plus importantes pour les grandes longueurs d'ondes. D'ailleurs, ces résultats sont en accord avec les travaux de Quan et al. (2017). Néanmoins, cette perte de transmittance est plus importante par rapport aux résultats de Mastekbayeva et al. (2000). Ces derniers avaient montré que pour une période de 30 jours et pour un dépôt de poussière de l'ordre de 3,72 g/m^2, la perte en transmittance était de l'ordre, 24,2 %. Cette différence pourrait être due à la différence de composition des types de poussières considérés. On note que lorsque la couche de poussière atteint 70 μm, la moitié du rayonnement solaire est perdue par diffusion (Xie et al., 2020). Le rayonnement solaire est bloqué par la couche de poussière, ce qui entraîne une perte de transmittance dépendant de la quantité de poussière qui s'est déposée sur la surface de la plaque de verre, comme l'a montré Hegazy (2001).

5.3.3 Perte en réflectance et en transmittance du rayonnement solaire en présence de la poussière

La figure 5.5 représente la réflectance en fonction de la longueur d'onde pour quatre épaisseurs de couche de poussière, que sont 30, 45, 55 et 70 μm. Elle montre les pertes par réflectance (du système air-poussière-verre) pour différentes couches de poussières considérées dans le modèle. Globalement, on note que la réflectance moyenne augmente de 26 à 53% si la couche de poussière passe de 30 à 70 μm. La réflectance est plus importante pour les courtes longueurs d'ondes entre 400 à 600 nm.

Selon Kaufman et al. (2000), la forte réflectance vers les longueurs d'onde 462-500 nm est due à la présence des atomes de fer dans la poussière. D'autres études comme celles de Müller et al. (2009) confirment ces propriétés radiatives des poussières sahariennes.

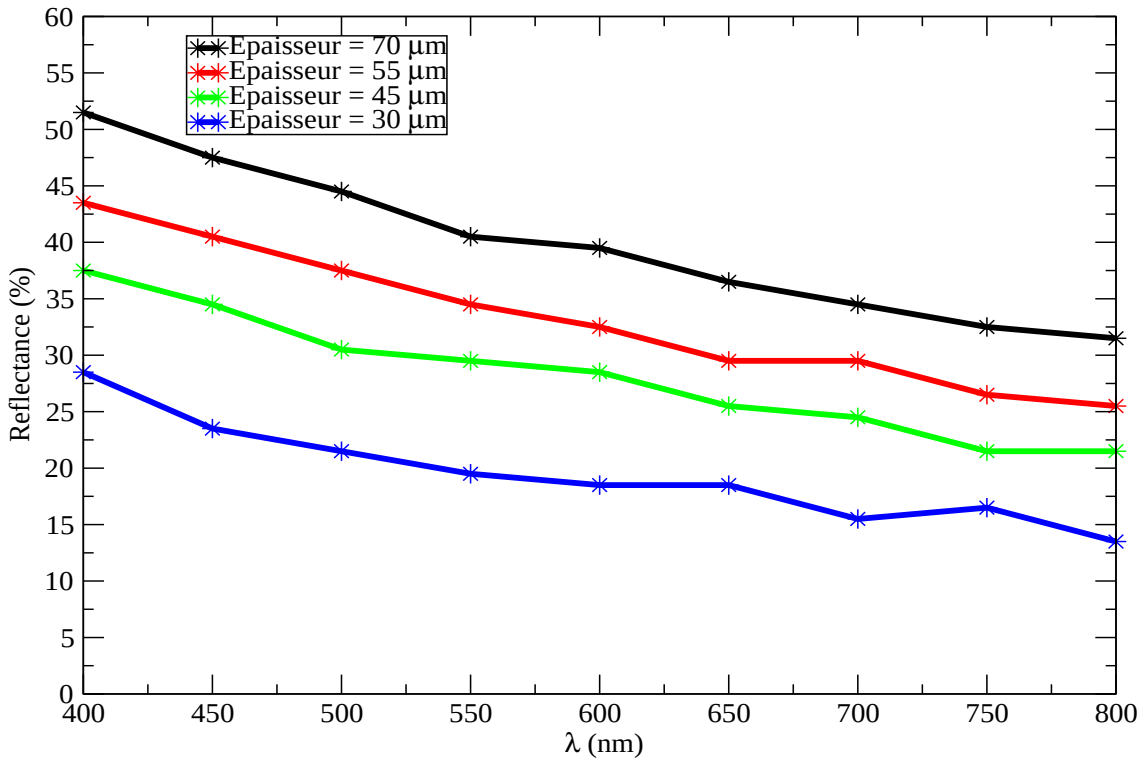

Figure 5.5: Simulation des réflectances du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde pour différentes couches de poussières d'épaisseurs de 30, 45, 55 et de 70 μm.

Sur la figure 5.6, on représente les pertes en transmittances en fonction de différentes couches de poussière d'épaisseur comprise entre 0 et 70 μm. Ainsi, on constate que la transmittance diminue presque linéairement lorsque la taille de la couche de poussière augmente. Ces résultats sont en bon accord avec ceux de (Said et al., 2014; Al-Hasan, 1998; Ebert et al., 2012; Duell et al., 2010; Chaouki et al., 2016) qui ont montré que, plus la couche de poussière est importante, plus la transmittance diminue. On note également que, la transmittance du rayonnement diminue jusqu'à 58% entre un verre propre et un verre revêtus d'une couche mince de poussière de 70 μm.

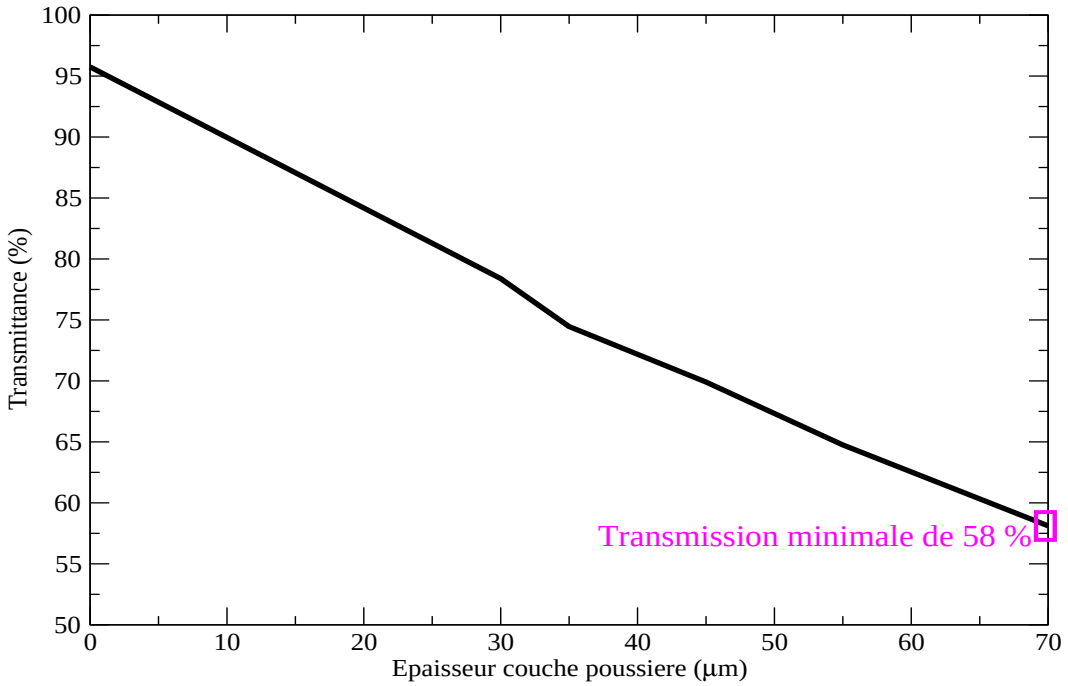

Figure 5.6: Simulation des pertes en transmittances pour des épaisseurs de poussière variant de 0 à 70 μm

5.4 Modélisation des pertes en propriétés électriques dues aux dépôts de poussières sur les cellules PV

5.4.1 Évolution du courant de court-circuit de la cellule solaire en présence de la poussière

La figure 5.7 illustre l'évolution de la densité de photo courant (J) de la cellule PV pour différentes épaisseurs de couche de poussière de 30, 45, 55 et 70 μm correspondant respectivement à un dépôt de poussière de 1,4; 2,1; 2,6 et 3,3 g/m^2.

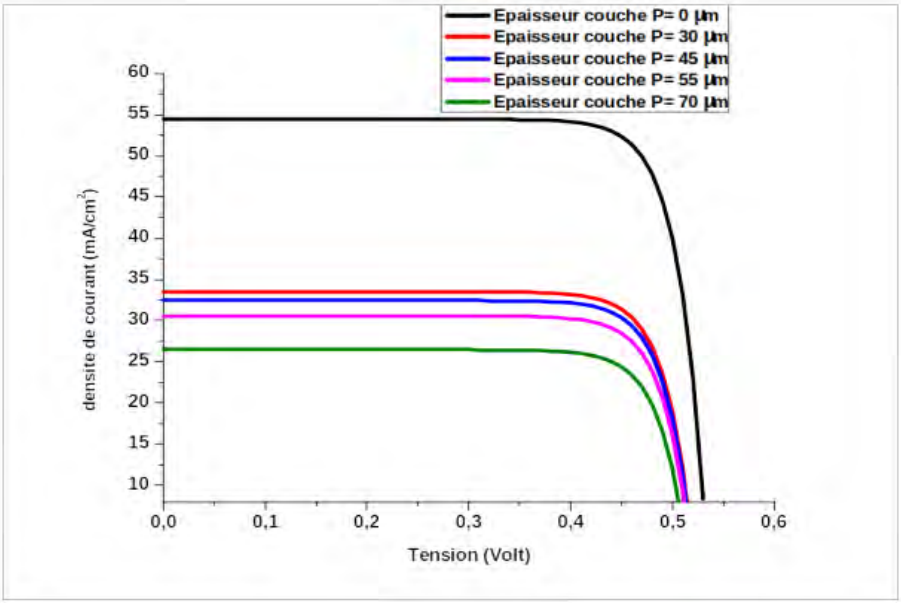

Figure 5.7: Caractéristiques courant-tension de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière.

Elle représente la caractéristique J-V pour différentes dépôts de poussière sur la surface de la cellule PV. On observe une forte baisse du courant de court-circuit de la cellule lorsque la taille de la couche de poussière augmente. Pour la cellule propre (courbe noire) sans poussière, le courant de court-circuit est de 54,44 mA. Lorsque la poussière commence à s'accumuler sur la surface de ces panneaux, on constate une diminution progressive de ce courant de court circuit. Ainsi, pour une couche de 30, 45, 55 et 70 μm, le courant de court circuit est respectivement de 33,5; 32,44; 30,54 et 26,45 mA. Lorsque la poussière se dépose sur la surface de la cellule, une grande partie de la lumière est réfléchie et le flux de photon arrivant à la surface est réduit. Ceci entraîne une baisse de la température à l'intérieur de la cellule. Selon Mahfoud (2018), cette baisse de courant de court-circuit est due à la

diminution du flux de photon arrivant à la surface de la cellule. Par conséquent, une couche de poussière d'épaisseur de 70 μm entraîne une réduction de ce courant de 51% par rapport à celle de la cellule propre. Ces résultats sont en accord avec ceux de Chanchangi et al. (2020) qui ont montré que le courant de court-circuit des cellules PV se réduit de 46 % lorsque les fientes d'oiseaux ont été déposées sur les surfaces des cellules PV. En plus, cette figure montre que le dépôt de poussière sur les cellules PV diminue faiblement la tension en circuit-ouvert comme l'ont montré Mani et al. (2010). D'autres résultats comme ceux de Jiang et al. (2016); Abdolzadeh et al. (2019) confirment nos résultats. Nos travaux ont montré que la poussière réduisait considérablement le courant de court-circuit des cellules solaires. De plus, selon Klugmann-Radziemska (2015), le courant de court-circuit dépend de l'irradiation et cette dernière en atteignant la cellule diminue avec l'augmentation de la poussière déposée sur la surface de la cellule PV.

5.4.2 Réduction de la puissance produite de la cellule PV en fonction du dépôt de poussière

La figure 5.8 représente l'évolution de la puissance produite (par simulation) par la cellule de silicium pour différentes couches de poussière déposées sur la surface de cette dernière en fonction de la tension d'alimentation. La puissance produite par la cellule propre sans poussière est représentée par la courbe noire et la courbe verte correspond à la cellule revêtue d'une couche de poussière de 3,3 g/m^2. Entre le verre propre et celle revêtue d'une couche de poussière, la puissance produite passe de 23,62 mW/m^2 à 11 mW/m^2. Cela correspond à une réduction de moitié par rapport à la cellule propre et ces résultats confirment ceux de Majeed et al. (2020). En résumé, on note que, pour des épaisseurs de couche de poussière de 30, 45 et 55 μm correspondant respectivement à un dépôt de poussière de 1,4; 2,1 et 2,6 g/m^2, la puissance produite passe respectivement de 14,12; 13,66 et 12,816 mW/m^2.

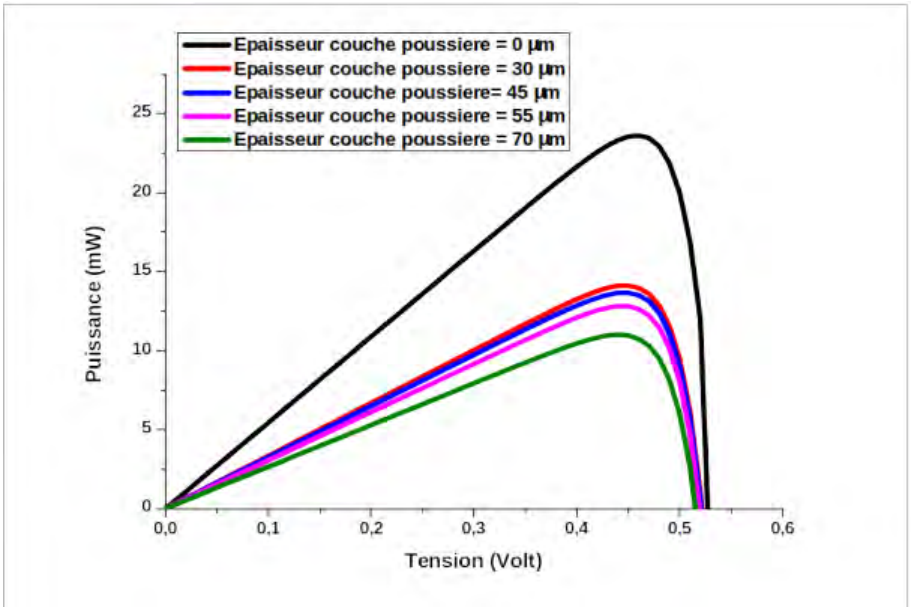

Figure 5.8: Caractéristiques puissance-tension de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière (simulation).

5.4.3 Caractéristiques courant-tension de la cellule PV en présence de la poussière

Les courbes noires de la figure 5.9 montrent les caractéristiques courant-tension entre une cellule propre et une cellule revêtue de poussière d'une taille de 70 μm. Les caractéristiques de la puissance-tension de la cellule photovoltaïque à base de silicium entre la cellule propre et une cellule revêtue de poussière (70 μm) sont représentées en couleur bleue. En effet, les pertes de la puissance produite par la cellule sont étudiées au point de puissance maximale (PPM). Ce dernier (PPM) est caractérisé par le couple (I_{mpp}; V_{mpp}), qui désigne respectivement le courant de puissance maximale (I_{mpp}) et la tension de puissance maximale (V_{mpp}). Lorsque la cellule est propre, la puissance à ce point est égale à 23,461 mW. Par conséquent, cette puissance correspond à un couple avec des valeurs de 49,918 mA pour I_{mpp} et de 0,47 V pour le Vmpp . Cependant, lorsque la poussière se dépose sur la surface de la cellule avec une couche d'épaisseur de 70 μm correspondant à un dépôt de 3,3 g/m^2, la puissance au PPM passe à 8,2 mW. Ainsi, cette baisse de production de la cellule au point PMM correspond à une perte de l'ordre de 66 % par rapport à la puissance de la cellule propre. Ceci montre que la poussière réduit considérablement la puissance au point MPP des cellules photovoltaïques. Ces résultats sont en accords avec les travaux de Nimmo et al. (1981) qui notaient une baisse de l'ordre de 65%. De plus, cette figure confirme les résultats de Jiang et al. (2016) qui ont montré que le dépôt de la poussière sur les surfaces des cellules PV diminue la puissance de sortie de la cellule.

Au Sénégal, les travaux de Ndiaye et al. (2013) ont aussi montré que cette diminution de la puissance de la cellule est due à la baisse de l'éclairement, lorsque les particules de la poussière réfléchissent le rayonnement arrivant à la surface de la cellule.

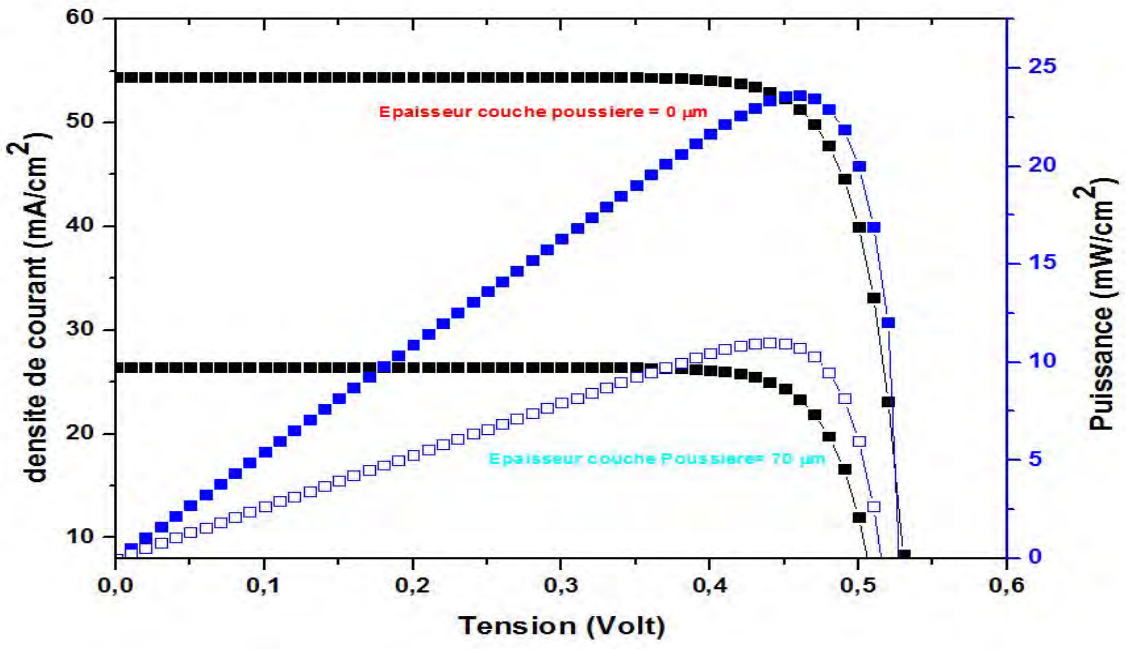

Figure 5.9: Variation du Point de Puissance Maximale (MPP). Caractéristique courant-tension pour une cellule PV propre (épaisseur de couche de poussière 0 μm) et une cellule PV salle (épaisseur de couche de poussière 70 μm) (courbes noires); Caractéristique puissance-tension pour une cellule propre (épaisseur de couche de poussière 0 μm) et une cellule salle (épaisseur de couche de poussière 70 μm) (courbes bleues).

5.4.4 Variation du rendement de conversion de la cellule à base de silicium en fonction du dépôt

La figure 5.10 représente le rendement de conversion de la cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin pour différentes couches de poussière déposées sur la surface de la cellule PV en fonction de la taille de la couche de poussière. En augmentant le dépôt de poussière sur la surface de la cellule de 30, 45, 55 et 70 μm correspondant respectivement à 1,4; 2,1; 2,6; 3,3 g/m^2; le rendement de conversion de la cellule PV diminue de 23 à 11 %. Ainsi, on constate que la moitié de la production de la cellule est perdue à cause de la couche de poussière. Ces résultats corroborent ceux de (Chen et al., 2019; Guan et al., 2017; Ramli et al., 2016) qui avaient conclu que le rendement de productivité des

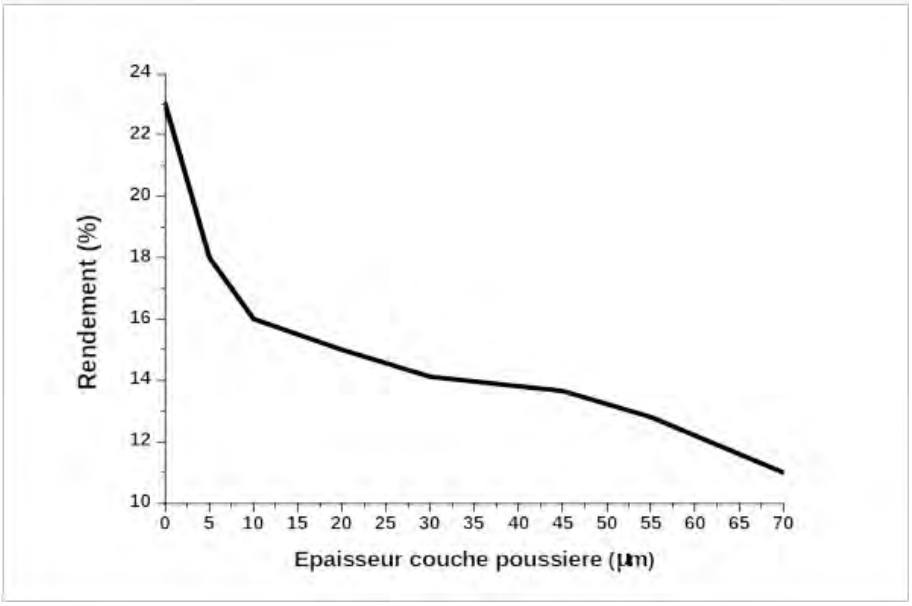

Figure 5.10: Rendement de conversion de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière

cellules photovoltaïques diminue de moitié lors de l'accumulation de la poussière sur leurs surfaces. Leurs études ont montré que la baisse de performance est due à la diminution de l'absorption de l'énergie solaire, car une petite fraction du rayonnement solaire traverse la couche de poussière et atteint la surface du module PV. Cette baisse du rendement pourrait être due à la diminution de la transmission de la lumière à travers le couvercle en verre lors de l'accumulation de la poussière sur les surfaces des cellules PV (Klugmann-Radziemska, 2015; Hegazy, 2001).

D'autres auteurs, ont expliqué que la diminution du rendement pourrait venir de l'augmentation de la température au dessus de la cellule qui est causée par l'absorption de la lumière par les couches de poussières (Ndiaye et al., 2013; Rao et al., 2014).

5.4.5 Facteur de forme de la cellule photovoltaïque à base de silicium

La figure 5.11 représente le facteur de forme de la cellule PV à base de silicium pour différentes couches de poussières déposées sur la surface de la cellule. En effet, ce paramètre permet d'avoir des informations sur la qualité de la cellule. Pour une variation de couche d'épaisseur de 0 à 70 μm, le facteur de forme diminue de 76 à 50 %. Cette baisse correspond à 26 % par rapport à la cellule propre. En outre, cette figure confirme que le dépôt de

poussière sur les surfaces des cellules à base de silicium monocristallin peut entraîner une dégradation de ces dernières et par conséquent réduire leur durée de vie. D'ailleurs, la réduction de ce facteur est favorisée par l'augmentation de la température sur la surface de la cellule PV qui est due à l'absorption des photons de la lumière par les atomes de la poussière selon Ahmed et al. (2013).

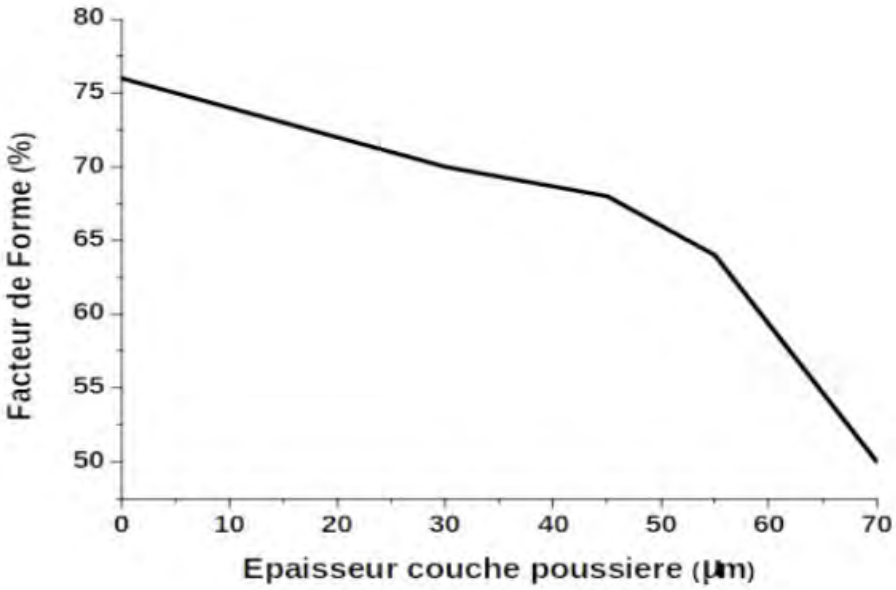

Figure 5.11: Facteur de forme de la cellule pour différentes épaisseurs de couche de poussière

5.5 Conclusion

Ce chapitre a permis d'évaluer les pertes en propriétés optiques et électriques dues au dépôt de poussière sur la surface des cellules photovoltaïques à base de silicium. Pour cela, deux modèles basés sur les équations de l'optique géométrique et les jonctions PN ont été utilisés. Les simulations révèlent que, pour une couche de poussière d'épaisseur 70 μm, correspondant à un dépôt de poussière de 3,3 g/m^2, le spectre de transmittance du rayonnement dans le visible diminue de moitié. L'étude sur les propriétes électriques a permis de conclure que pour une même quantité de dépôt de poussière sur la surface de la cellule solaire, la densité de courant de court-circuit de la cellule diminue de l'ordre de la moité aussi (51 %). Cependant, ce dépôt de poussière affecte très faiblement la tension en circuit ouvert de la cellule. En définitive, les deux modèles développés ont révélé que la présence de poussière sur la surface des cellules solaires réduit considérablement la transmittance du rayonnement et le rendement des panneaux solaires.

Chapitre 6

Conclusion et Perspectives

L'objectif de cette thèse a été d'évaluer l'impact du dépôt sec de poussière sur la production des panneaux solaires dans un environnement Sahélien comme celui de Dakar au Sénégal. Cette objectifs principale se décline sous la forme de plusieurs questions que sont :
Quel est le cycle saisonnier, mensuel et annuel du dépôt sec de poussières au Sahel ?
L'impact du dépôt de la poussière sur la production des panneaux solaires ?
Les caractéristiques physiques des particules se déposant sur les installations solaires ?
Évaluation des pertes optiques et électriques dues au dépôt de poussière sur la surface des panneaux PV?
Elle rentre dans le cadre du développement des énergies renouvelables dans un contexte de changement climatique. Nous avons surtout focalisé notre étude sur la station de Dakar qui a été choisie comme terrain expérimental comportant à la fois des panneaux photovoltaïques installés à l'air libre mais aussi des instruments mesurant la dynamique des poussières comme le photomètre AERONET. Des échantillons de poussières ont été prélevés sur la surface des panneaux photovoltaïques à l'Université de Dakar et ont servi à des études au laboratoire. Cette thèse s'est basée essentiellement sur un ensemble d'outils composés de techniques de caractérisation d'échantillons, de deux modèles climatiques permettant de simuler les flux de dépôts des poussières et de deux codes simulant les pertes en propriétés optiques du rayonnement et en propriétés électriques des panneaux PV. Globalement cette thèse a permis de mettre en évidence un certain nombre de résultats intéressants :
On a montré que d'importantes quantités de particules se déposent chaque année par sédimentation pendant la saison sèche entre les mois de Novembre et de Juin. L'analyse des propriétés physico-chimiques des échantillons ont révélé que les particules collectées sont exclusivement de nature minérales (poussières désertiques). Les simulations ont démontré que les dépôts de poussière avaient comme conséquence, de réduire considérablement le rayonnement solaire arrivant sur la surface des systèmes solaires et donc de réduire l'efficacité des panneaux PV.
Le premier volet de cette thèse a donc porté sur la caractérisation saisonnière des dépôts de poussières en Afrique de l'Ouest et au Sénégal. Pour cela, des modèles climatiques globaux incluant le cycle complet des poussières ont été utilisés dans le but de simuler les flux de dépôts secs entre 2006 et 2010. Après validation de ces derniers avec les données in situ, le modèle ALADIN de Météo-France a été retenu pour des simulations long terme sur la région Sahélienne. Les résultats des simulations ont révélé que les maxima en flux de dépôts secs sont enregistrés pendant la saison sèche de Novembre à Juin. Néanmoins, les pics ont été notés autour des sources principales avec des valeurs qui peuvent atteindre 60 g/m^2/mois. Par contre sur la station de Dakar au Sénégal, les valeurs du dépôt sec varient de 18 g/m^2/mois en saison sèche à 2 g/m^2/mois pendant la saison humide.
Ensuite, nous avons prélevé deux échantillons sur la surface des panneaux solaires à l'Université de Dakar. Rappelons que cette poussière est issue du dépôt accumulé pendant presqu'une année entre Octobre 2016 et Juin 2017. Les échantillons ont été analysés dans des laboratoires avec des techniques de caractérisation. L'analyse des propriétés optiques a confirmé la nature minérale de ces particules. Les résultats d'analyse par fluorescence aux

rayons X (XRF) et par spectroscopie de rayon X à dispersion d'énergie (EDS) indiquent que les échantillons de poussières sont dominés par des éléments cristallins tels que O, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, Mn et Fe. De plus, d'autres éléments tels que le P, S, Zn, Sr, Zr et Cr très minoritaires ou sous forme de traces ont été identifiés. Et enfin, l'analyse moléculaire par diffraction aux rayons X montre que cette poussière est un mélange de différents composés chimiques avec une phase prédominante constituée du quartz de type SiO_2 (environ 73,8% du total) et la seconde phase est de type calcite $CaCO_3$ représentant 13,6% de la poussière collectée à Dakar. Le reste, qui est estimé à 12,6% est un mélange d'oxychlorure de fer (FeOCl), de mantienneite ($Al_2FeH_{33}K_{0.5}Mg_3O_{34}P_4Ti$) et de kaersutite ($Al_2Ca_2Mg_6NaO_{24}Si_6$).
Et enfin, le dernier chapitre de ce document est consacré à l'évaluation des pertes en propriétés optiques (du rayonnement) et électriques (des panneaux photovoltaïques). Pour cela, deux codes ont été implémentés pour d'une part, modéliser les interactions entre le rayonnement et la couche de poussière et d'autre part, évaluer l'impact de la couche sur la production des panneaux solaires. Les simulations avec les deux modèles ont montré que la présence de poussière sur la surface des modules solaires entraînait une réduction considérable de la transmittance du rayonnement arrivant et du rendement des panneaux solaires. En effet, pour une couche de poussière d'épaisseur 70 μm, correspondant à un dépôt de poussière de 3,3 g/m^2, le spectre de transmittance du rayonnement solaire diminue de moitié. Pour une même quantité de dépôt, la densité de courant de court-circuit du panneau diminue à peu prés du même ordre (51%).
Ce travail ouvre la voie à des perspectives :
Les perspectives de cette thèse reposeront en grande partie sur les futurs résultats du nouveau dispositif que nous venons d'installer à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar comme le montre la figure (6.1).

Figure 6.1: Photos du dispositif déployé à l'Université Cheikh Anta DIOP de Dakar.

Il s'agit d'un dispositif composé de quatre systèmes identiques et indépendants. Chaque système comprend un panneau solaire qui est relié à une batterie et à des capteurs (courant, tension et puissance). Le tout est monitoré par un ordinateur chargé de recueillir et d'enregistrer les données de chaque système. Ces panneaux solaires rendus intelligents peuvent ainsi être considérés comme des objets connectés. La seule chose qui diffère entre ces quatre systèmes est le cycle temporel de nettoyage (lavage) de chaque panneau solaire. Pour toute la saison sèche 2010-2020 un programme spécifique est entrain d'être mené. En effet, le premier panneau est lavé tous les jours, le deuxième est nettoyé par semaine, le troisième par mois et le quatrième n'est jamais nettoyé. L'idée est de pouvoir mesurer à temps réel la production de chaque panneau (courant et puissance) et les tensions au bord des panneaux et batteries. L'objectif étant de laisser les panneaux en plein air sous l'influence des paramètres météorologiques comme le dépôt de poussière entre autres. Par conséquent, un certain nombre d'information relatives à l'environnement dans lequel les panneaux sont installés (ensoleillement, puissance produite en fonction de la puissance nominale des panneaux, les besoins en énergie, la force du vent et sa direction, l'humidité, la température, la pluviométrie, la quantité de particule dans l'air ...) seront mesurées. Par conséquent, grâce à un système décisionnel, on déduira une métrique qui permettra de connaître avec suffisamment de précision le niveau critique. Un système d'alerte permettra ainsi de savoir en temps réel qu'un nettoyage est nécessaire ou pas et cela pour chaque saison.
Et enfin, le dépôt de poussière sur la surface des panneaux dans une atmosphère surchauffée donne lieu à un réchauffement excessif des panneaux solaires. Ce phénomène appelé Hot Spots à tendance à réduire considérablement la durée de vie des panneaux photovoltaïques.

Ainsi, l'utilisation de caméras thermique permettra d'avoir une idée précise sur ce phénomène en milieu Sahélien où les températures et dépôts de poussières sont très importants.

Liste des publications

Articles acceptés et publiés

1- Diop, D., Kama, A., Drame, M.S., Diallo, M., & Niang, D.N. (2018). The use of ALADIN model and MERRA-2 reanalysis to represent dust seasonal dry deposition from 2006 to 2010 in Senegal, West Africa. **Modeling Earth Systems and Environment**, 4(2), 815-823. https://doi.org/10.1007/s40808-018-0458-5

2- Goni, S., Adannou, H.A., **Diop, D**., Drame, M.S., Tikri, B., Barka, M., & Beye, A.C. (2019). Long-term variation of sunshine duration and their inter-action with meteorogical parameters over Chad, central africa. **Natural Resources**, 10(3), 47-58.
https://doi:10.4236/nr.2019.103004

3- Goni, S., Adannou, H.A., **Diop, D**., Kriga, A., Nebon, B., Beye, A.C., & Drame, M.S. (2019). Observation and Simulation of Available Solar Energy at N'Djamena, Chad. **Smart Grid and Renewable Energy**, 10(6), 165-178.
https://doi: 10.4236/sgre.2019.106011

4- Diop, D., Niang, D.N., Drame, M.S., & Ba, A. (2020). Dust Source, Vertical Profile and Climate Impact by RegCM3 Regional Climate Model over West Africa during 2006. **Atmospheric and Climate Sciences**, 10(2), 206-219.
https://doi: 10.4236/acs.2020.102011

5- Diop, D., Drame, M.S., Diallo, M., Malec, D., Mary, D. and Guillot, P. (2020) Modelling of Photovoltaic Modules Optical Losses Due to Saharan Dust Deposition in Dakar, Senegal, West Africa. **Smart Grid and Renewable Energy**, 11, 89-102.
https://doi.org/10.4236/sgre.2020.117007

Bibliographie

Abbad, I. (2019). Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairement) sur le rendement d'une cellule solaire. Master's thesis, Université Larbi Ben M'Hidi / Oum El Bouaghi, Algérie.

Abdolzadeh, M., and Nikkhah, R. (2019). Experimental study of dust deposition settled over tilted pv modules fixed in different directions in the southeast of Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(30):31478–31490.

Abelès, F. (1950). Recherches sur la propagation des ondes électromagnétiques sinusoïdales dans les milieux stratifiés-application aux couches minces. In *Annales de physique*, volume 12, pages 596–640. EDP Sciences.

Aboujja, S. (2000). *Électroluminescence en avalanche des jonctions pn à base de silicium et d'arseniure de gallium, et effet d'irradiation*. PhD thesis, Université Paul Verlaine-Metz.

Ackerman, A.S., Kirkpatrick, M.P., Stevens, D.E., and Toon, O. (2004). The impact of humidity above stratiform clouds on indirect aerosol climate forcing. *Nature*, 432(7020):1014–1017.

Adeyemi, A.A., Barakat, N., and Darcie, T. (2009). Applications of digital micro-mirror devices to digital optical microscope dynamic range enhancement. *Optics express*, 17(3):1831–1843.

Adinoyi, M.J., and Said, S. (2013). Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. *Renewable energy*, 60:633–636.

Ahmed, Z., Kazem, H.A., and Sopian, K. (2013). Effect of dust on photovoltaic performance: Review and research status. *Latest Trends in Renewable Energy and Environmental Informatics*, pages 193–199.

Aïssa, B., Isaifan, R.J., Madhavan, Vinod, E., and Abdallah, A. (2016). Structural and physical properties of the dust particles in qatar and their influence on the pv panel performance. *Scientific reports*.

Al Baloushi, A., Saeed, M., Marwan, S., Algghafri, S., and Moumouni, Y. (2018). Portable robot for cleaning photovoltaic system: Ensuring consistent and optimal year-round photovoltaic panel performance. In *2018 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pages 1–4. IEEE.

Al-Hasan, A. (1998). A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface. *Solar Energy*, 63(5):323–333.

Al Shehri, A., Parrott, B., Carrasco, P., Al Saiari, H., and Taie, I. (2016). Impact of dust deposition and brush-based dry cleaning on glass transmittance for pv modules applications. *Solar Energy*, 135:317–324.

Albrecht, B. (1989). Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science*, 245(4923):1227–1230.

Andreae, M. (1995). Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels. *World survey of climatology*, 16(06):347–398.

Ansmann, A., Seifert, P., Tesche, M., and Wandinger, U. (2012). Profiling of fine and coarse particle mass: case studies of saharan dust and eyjafjallajökull/grimsvötn volcanic plumes. *Atmospheric Chemistry and Physics*.

Aubin, A. (2013). *Analyse de la formation des phases du système cuivre-germanium par diffraction des rayons X sur des échantillons d'épaisseur nanoscopique*. PhD thesis, École Polytechnique de Montréal.

Avagliano, S., Bianco, N., Manca, O., and Naso, V. (1999). Combined thermal and optical analysis of laser back-scribing for amorphous-silicon photovoltaic cells processing. *International journal of heat and mass transfer*, 42(4):645–656.

Azzam, R.M.A., and Bashara, N. (1977). *Ellipsometry and polarized light*. North-Holland personal library. North-Holland Pub. Co.

Azzam, R. and Bashara, N. (1974). Application of generalized ellipsometry to anisotropic crystals. *JOSA*, 64(2):128–133.

Bardet, I., Desmonts, T., Ryckelynck, F., and Bourrier, P. (2000). Video monitoring of visible atmospheric emissions: from a manual device to a new fully automatic detection and classification device. *Revue de Métallurgie*, 97(10):1223–1234.

Beattie, N.S., Moir, R.S., Chacko, C., Buffoni, G., Roberts, S.H., and Pearsall, N. (2012). Understanding the effects of sand and dust accumulation on photovoltaic modules. *Renewable Energy*, 48:448–452.

Beckhoff, B., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., and Wolff, H. (2007). *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Springer Science & Business Media.

Bencherif, H. (2015). *Etude et modélisation analytique d'une cellule solaire à base de Si-Ge*. PhD thesis, Université de Batna 2.

Bergametti, G., Remoudaki, E., Losno, R., Steiner, E., Chatenet, B., and Buat-Menard, P. (1992). Source, transport and deposition of atmospheric phosphorus over the northwestern mediterranean. *Journal of atmospheric chemistry*, 14(1-4):501–513.

Berthier, S., and Lafait, J. (1981). Modelisation des proprietes optiques des milieux inhomogenes a structure complexe. *Le Journal de Physique Colloques*, 42(C1):C1–285.

Bibienne, T. (2015). *Alliages cubiques centrés Ti-VX (X= Cr ou Mn) pour le stockage de l'hydrogène*. PhD thesis, Université du Québec à Trois-Rivières.

Binkowski, F.S., and Roselle, S. (2003). Models-3 community multiscale air quality (cmaq) model aerosol component 1. model description. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 108(D6).

Bonnet, D., and Meyers, P. (1998). Cadmium-telluride—material for thin film solar cells. *Journal of Materials Research*, 13(10):2740–2753.

Borbély-Kiss, I., Kiss, A.Z., Koltay, E., Szabó, G., and Bozó, L. (2004). Saharan dust episodes in hungarian aerosol: elemental signatures and transport trajectories. *Journal of Aerosol Science*, 35(10):1205–1224.

Born, M., and Wolf, E. (2013). *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Elsevier.

Bourrier, P., and Desmonts, T. (2007). Monitoring dust collection in the environment of an integrated steel plant: source identification. *Revue de Métallurgie*, 104(6):287–295.

Brinker, C.J., Frye, G.C., Hurd, A.J., and Ashley, C. (1991). *Fundamentals of sol-gel dip coating*, volume 201. Elsevier.

Brooks, N., and Legrand, M. (2000). Dust variability over northern africa and rainfall in the sahel. In *Linking climate change to land surface change*, pages 1–25. Springer.

Bubnová, R., Hello, G., Bénard, P., and Geleyn, J. (1995). Integration of the fully elastic equations cast in the hydrostatic pressure terrain-following coordinate in the framework of the arpege/aladin nwp system. *Monthly Weather Review*, 123(2):515–535.

Buchard, V., Randles, C.A., da Silva, A.M., Darmenov, A., Colarco, P.R., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A.J., Ziemba, L.D., et al. (2017). The merra-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. part ii: Evaluation and case studies. *Journal of Climate*, 30(17):6851–6872.

Byers, H., McHenry, L., and Grundl, T. (2016). Forty-nine major and trace element concentrations measured in soil reference materials nist srm 2586, 2587, 2709a, 2710a and 2711a using icp-ms and wavelength dispersive-xrf. *Geostandards and geoanalytical research*, 40(3):433–445.

Cassou, C. and Terray, L. (2001). Oceanic forcing of the wintertime low-frequency atmospheric variability in the north atlantic european sector: A study with the arpege model. *Journal of Climate*, 14(22):4266–4291.

Chameides, W.L., Yu, H., Liu, S.C., Bergin, M., Zhou, X., Mearns, L., Wang, G, Kiang, C.S., Saylor, R.D., Luo, C., et al. (1999). Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in china through emission controls. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(24):13626–13633.

Chanchangi, Y.N., Ghosh, A., Sundaram, S., and Mallick, T. (2020). An analytical indoor experimental study on the effect of soiling on pv, focusing on dust properties and pv surface material. *Solar Energy*, 203:46–68.

Chaouki, F., Anana, W., Laarabi, B., Sebbar, M.A., Mahi, E., M., Barhdadi, A., Dambrine, G., Menard, E., Boardman, J., et al. (2016). Physical and chemical analysis of outdoor dust deposited on photovoltaic panels installed in rabat. In *2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pages 148–151. IEEE.

Charlson, R.J., Schwartz, S.E., Hales, J.M., Cess, R.D., Coakley, J.J.A., Hansen, J.E., and Hofmann, D. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255(5043):423–430.

Chen, W., and Zhang, Q. (2017). Recent progress in non-fullerene small molecule acceptors in organic solar cells (oscs). *Journal of Materials Chemistry C*, 5(6):1275–1302.

Chen, Y., Wang, D., Liu, Y., Dong, Y., and Liu, J. (2019). Research on photovoltaic performance reduction due to dust deposition: Modelling and experimental approach. *Journal of Thermal Science*, 28(6):1186–1194.

Cheng, C.S., Campbell, M., Li, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich, S., Klaassen, J., MacIver, D., et al. (2008). Differential and combined impacts of extreme temperatures and air pollution on human mortality in south–central canada. part i: historical analysis. *Air quality, atmosphere & health*, 1(4):209–222.

Chiapello, I., Bergametti, G., Gomes, L., Chatenet, B., Dulac, F., Pimenta, J., and Suares, E. (1995). An additional low layer transport of sahelian and saharan dust over the north-eastern tropical atlantic. *Geophysical Research Letters*, 22(23):3191–3194.

Chin, M., Ginoux, P., Kinne, S., Torres, O., Holben, B.N., Duncan, B.N., Martin, R.V., Logan, J.A., Higurashi, A., and Nakajima, T. (2002). Tropospheric aerosol optical thickness from the gocart model and comparisons with satellite and sun photometer measurements. *Journal of the atmospheric sciences*, 59(3):461–483.

Colarco, P., da Silva, A., Chin, M., and Diehl, T. (2010). Online simulations of global aerosol distributions in the nasa geos-4 model and comparisons to satellite and ground-based aerosol optical depth. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14).

Courtier, P., Freydier, C., Geleyn, J., Rabier, F., and Rochas, M. (1991). The arpege project at météo-france, paper presented at ecmwf annual seminar, eur. cent. for medium-range weather forecasts. *Reading, UK*.

Courtney, I.A., and Dahn, J. (1997). Electrochemical and in situ x-ray diffraction studies of the reaction of lithium with tin oxide composites. *Journal of the Electrochemical Society*.

Cruz, C.N., and Pandis, S. (1997). A study of the ability of pure secondary organic aerosol to act as cloud condensation nuclei. *Atmospheric Environment*, 31(15):2205–2214.

Csima, G. and Horányi, A. (2008). Validation of the aladin-climate regional climate model at the hungarian meteorological service. *Időjárás*, 112(3-4):155–77.

Cyrs, W.D., Avens, H.J., Capshaw, Z.A., Kingsbury, R.A., Sahmel, J., and Tvermoes, B. (2014). Landfill waste and recycling: Use of a screening-level risk assessment tool for end-of-life cadmium telluride (cdte) thin-film photovoltaic (pv) panels. *Energy Policy*, 68:524–533.

Dajuma, A., Yahaya, S., Touré, S., Diedhiou, A., Adamou, R., Konaré, A., Sido, M., and Golba, M. (2016). Sensitivity of solar photovoltaic panel efficiency to weather and dust over west africa: Comparative experimental study between niamey (niger) and abidjan (côte d'ivoire). *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 5(04):123.

d'Almeida, G.A., and Schütz, L. (1983). Number, mass and volume distributions of mineral aerosol and soils of the sahara. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(2):233–243.

d'Almeida, G. (1986). A model for saharan dust transport. *Journal of climate and applied meteorology*, 25(7):903–916.

Daniel, M., Lemonsu, A., Déqué, M., Somot, S., Alias, A., and Masson, V. (2019). Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions. *Climate Dynamics*, 52(5-6):2745–2764.

Das, N., Wongsodihardjo, H., and Islam, S. (2015). Modeling of multi-junction photovoltaic cell using matlab/simulink to improve the conversion efficiency. *Renewable Energy*, 74:917–924.

Delmotte, F. (2010). *Couches minces et optiques multicouches dans le domaine spectral XUV (1 nm à 60 nm). Matière Condensée [cond-mat]*. PhD thesis, Université Paris-Sud.

Deneuville, A., Bruyère, J.C., Mini, A., Hamdi, H., and Kahil, H. (1980). Cellules solaires: quelques aspects des structures «schottky» à base de silicium amorphe hydrogéné. *Revue de Physique Appliquée*, 15(2):233–240.

Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A., and Cariolle, D. (1994). The arpege/ifs atmosphere model: a contribution to the french community climate modelling. *Climate Dynamics*, 10(4-5):249–266.

Desmarchelier, R. (2014). *Analyses des forces photo-induites par le laser femtoseconde dans les verres à base de silice. Theoretical and/or physical chemistr.* PhD thesis, Université Paris Sud - Paris 11.

Despujols, J. (2000). *Spectometrie D'emission des Rayons X. Fluorescence X.* Ed. Techniques Ingénieur.

Diarra, C. and Ba, A. (2014). Analyse des paramètres optiques des aérosols atmosphériques, de leur distribution et de leur albédo de diffusion par les mesures photométriques au mali. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 10(2).

Diop, D., Kama, A., Drame, M.S., Diallo, M., and Niang, D. (2018). The use of aladin model and merra-2 reanalysis to represent dust seasonal dry deposition from 2006 to 2010 in senegal, west africa. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(2):815–823.

Drame, M., Jenkins, G.S., Camara, M., and Robjhon, M. (2011). Observations and simulation of a saharan air layer event with a midtropospheric dust layer at dakar, senegal, 6–7 july 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.*

Drame, M., Ould Bilal, B., Camara, M., Sambou, V., and Gaye, A. (2012). Impacts of aerosols on available solar energy at mbour, senegal. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 4(1):013105.

Dubois, S. (2007). *Influence des interactions impureté-défaut et impureté-impureté sur le rendement de conversion des cellules photovoltaïques au silicium cristallin.* PhD thesis, Aix-Marseille 3.

Duce, R. (1995). Sources, distributions, and fluxes of mineral aerosols and their relationship to climate. *Aerosol forcing of climate.*

Duell, M., Ebert, M., Muller, M., Li, B., Koch, M., Christian, T., Perdichizzi, R.F., Marion, B., Kurtz, S., and Doble, D. (2010). Impact of structured glass on light transmission, temperature and power of pv modules. In *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conf. and Exhibition, Valencia, Spain*, pages 3867–72.

Dunion, J.P., and Marron, C. (2008). A reexamination of the jordan mean tropical sounding based on awareness of the saharan air layer: Results from 2002. *Journal of Climate*, 21(20):5242–5253.

Dunion, J.P., and Velden, C. (2004). The impact of the saharan air layer on atlantic tropical cyclone activity. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3):353–366.

Eberspacher, C., Fahrenbruch, A.L., and Bube, R. (1986). Properties of zno films deposited onto inp by spray pyrolysis. *Thin solid films*, 136(1):1–10.

Ebert, D., and Bhushan, B. (2012). Transparent, superhydrophobic, and wear-resistant coatings on glass and polymer substrates using sio2, zno, and ito nanoparticles. *Langmuir*, 28(31):11391–11399.

Engelstaedter, S., Tegen, I., and Washington, R. (2006). North african dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*.

Engelstaedter, S., and Washington, R. (2007). Atmospheric controls on the annual cycle of north african dust. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D3).

Farda, A., Déué, M., Somot, S., Horányi, A., Spiridonov, V., and Tóth, H. (2010). Model aladin as regional climate model for central and eastern europe. *Studia Geophysica et geodaetica*, 54(2):313–332.

Fransolet, A., Oustrière, P., Fontan, F., and Pillard, F. (1984). La mantiennéite, une nouvelle espèce minérale du gisement de vivianite d'anloua, cameroun. *Bulletin de minéralogie*, 107(6):737–744.

Fujiwara, H. (2007). *Spectroscopic ellipsometry: principles and applications*. John Wiley & Sons.

Gac, J.Y., Carn, M., Diallo, M.I., and Orange, D. (1991). Le point sur les observations quotidiennes des brumes sèches au sénégal de 1984 à 1991. Technical report.

Gelaro, R., Mccarty, W., Suárez, M.J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C.A., Darmenov, A., Bosilovich, M.G., Reichle, R., et al. (2017). The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (merra-2). *Journal of Climate*, 30(14):5419–5454.

Gilliot, M. and Christophe, P. (2006). *Caractérisation de couches minces nanostructurées par ellipsométrie spectroscopique: application aux propriétés optiques isotropes et anisotropes de nanoparticules sphériques et ovoïdes de cobalt*. PhD thesis, Metz.

Girard, A., and Delisle, C. (1982). Réflectance et transmittance d'un matériau optique. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 29(5):611–626.

Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J., and Joy, D. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.

Goldsztaub, S. (1935). Étude de quelques dérivés de l'oxyde ferrique (FeO. OH, FeO2Na, FeOCl); détermination de leurs structures. *Bulletin de Minéralogie*, 58(1):6–76.

Grini, A., Myhre, G., Zender, C.S., and Isaksen, I. (2005). Model simulations of dust sources and transport in the global atmosphere: Effects of soil erodibility and wind speed variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D2).

Guan, Y., Zhang, H., Xiao, B., Zhou, Z., and Yan, X. (2017). In-situ investigation of the effect of dust deposition on the performance of polycrystalline silicon photovoltaic modules. *Renewable energy*, 101:1273–1284.

Gugliermetti, F., Asdrubali, F., and Bisegna, F. (2004). Experimental glass optical data of new glazing systems to improve energy savings. In *Proc. of New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development International Conference, Evora, Portugal*, volume 28.

Habell, K. (1968). Advanced optical techniques. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 15(4):413–414.

Hall, D.B., Underhill, P., and Torkelson, J. (1998). Spin coating of thin and ultrathin polymer films. *Polymer Engineering & Science*, 38(12):2039–2045.

Hamzaoui, A. (2018). *Effet de l'illumination sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires au silicium polycristallin*. PhD thesis.

He, D., Wu, S., Zhao, H., Qiu, H., Fu, Y., Li, X., and He, Y. (2017). Association between particulate matter 2.5 and diabetes mellitus: A meta-analysis of cohort studies. *Journal of diabetes investigation*, 8(5):687–696.

Hegazy, A. (2001). Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors. *Renewable energy*, 22(4):525–540.

Helmaoui, A., Belghachi, A., and Bellali, B. (2007). Amélioration du rendement de collecte et la tension vco d'une cellule solaire avec couche bsf. *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda (2007) 153-156*.

Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., et al. (1998). Aeronet—a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote sensing of environment*, 66(1):1–16.

Horányi, A., Ihász, I., and Radnóti, G. (1996). Arpege/aladin: A numerical weather prediction model for central-europe with the participation of the hungarian meteorological service. *IdŰjárás (Budapest. 1905)*, 100(4):277–301.

Hou, J., Inganäs, O., Friend, R.H., and Gao, F. (2018). Organic solar cells based on non-fullerene acceptors. *Nature materials*, 17(2):119–128.

Houghton, J.T., Albritton, D.L., Meira Filho, L., Cubasch, U., Dai, X., Ding, Y., Griggs, D.J., Hewitson, B., Isaksen, I., Karl, T., et al. (2001). *Technical summary of working group 1.* Cambridge University Press.

Hua, C., and Lin, J. (2003). An on-line mppt algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays. *Renewable energy*, 28(7):1129–1142.

IRENA (2016). Solar pv in africa: Costs and markets. Technical report, The International Renewable Energy Agency.

Israelevich, P.L., Ganor, E., Levin, Z., and Joseph, J. (2003). Annual variations of physical properties of desert dust over israel. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13).

Israelevich, P.L., Levin, Z., Joseph, J.H., and Ganor, E. (2002). Desert aerosol transport in the mediterranean region as inferred from the toms aerosol index. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D21):AAC–13.

Jacobsson, R. (1966). V light reflection from films of continuously varying refractive index. In *Progress in optics*, volume 5, pages 247–286. Elsevier.

Jassim, J.M., and Kodeary, A. (2013). Experimental study of the influence of aerosol particles on link range of free space laser communication system in iraq. *Journal of Applied Electromagnetism*, 15(2).

Jenkins, R. (1999). *X-ray fluorescence spectrometry*, volume 2. Wiley New York.

Jiang, Y., and Lu, L. (2016). Experimentally investigating the effect of temperature differences in the particle deposition process on solar photovoltaic (pv) modules. *Sustainability*, 8(11):1091.

Jickells, T.D., An, Z.S., Andersen, K.K., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Cao, J.J., Boyd, P.W., Duce, R.A., Hunter, K.A., et al. (2005). Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *science*, 308(5718):67–71.

Kacenelenbogen-Tilot, M. (2008). *Application de la télédétection spatiale à la surveillance de la pollution en aérosols.* PhD thesis, Lille 1.

Karyampudi, V.M., Palm, S.P., Reagen, J.A., Fang, H., Grant, W.B., Hoff, R.M., Moulin, C., Pierce, H.F., Torres, O., Browell, E.V., et al. (1999). Validation of the saharan dust plume conceptual model using lidar, meteosat, and ecmwf data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(6):1045–1076.

Katsidis, C.C., and Siapkas, D. (2002). General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference. *Applied optics*, 41(19):3978–3987.

Kaufman, Y.J., Tanre, D., Dubovik, O., Karnieli, A., Remer, L.A., and Einaudi, F. (2000). Satellite and ground-based radiometers reveal much lower dust absorption of sunlight than used in climate models.

Kazem, H.A., and Khatib, T. (2013). A novel numerical algorithm for optimal sizing of a photovoltaic/wind/diesel generator/battery microgrid using loss of load probability index. *International Journal of Photoenergy*, 2013.

Kazem, H., Chaichan, M., Al-Waeli, A., and Sopian, K. (2020a). A novel model and experimental validation of dust impact on grid-connected photovoltaic system performance in northern oman. *Solar Energy*, 206:564–578.

Kazem, H., Chaichan, M., Al-Waeli, A., and Sopian, K. (2020b). A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, page 123187.

Kennedy, D.A., and Collins, C. (2000). Microbiological safety cabinets: selection, installation, testing and use. *British journal of biomedical science*, 57(4):330.

Keshner, M.S., McClelland, P., and Arya, R. (2008). Amorphous silicon photovoltaic cells having improved light trapping and electricity-generating method. US Patent App. 11/875,367.

Kiehl, J.T., Schneider, T.L., Rasch, P.J., Barth, M.C., and Wong, J. (2000). Radiative forcing due to sulfate aerosols from simulations with the national center for atmospheric research community climate model, version 3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 205(D1):1441–1457.

King, D. (1997). Photovoltaic module and array performance characterization methods for all system operating conditions. In *AIP conference proceedings*, volume 394, pages 347–368. American Institute of Physics.

Kinne, S., Schulz, M., Textor, C., Guibert, S., Balkanski, Y., Bauer, S.E., Berntsen, T., Berglen, T.F., Boucher, O., Chin, M., et al. (2005). An aerocom initial assessment–optical properties in aerosol component modules of global models. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5(5):8285–8330.

Klaassen, C.D., Casarett, L.J., and Amdur, M. (1986). Toxicology: the basic science of poisons. Macmillan.

Klugmann-Radziemska, E. (2015). Degradation of electrical performance of a crystalline photovoltaic module due to dust deposition in northern poland. *Renewable Energy*, 78:418–426.

Lametschwandtner, A., Lametschwandtner, U., and Weiger, T. (1984). Scanning electron microscopy of vascular corrosion casts–technique and applications. *Scanning electron microscopy*, pages 663–695.

Laurent, B. (2005). *Simulation des émissions d'aérosols désertiques à l'échelle continentale: Analyse climatologique des émissions du nord-est de l'Asie et du nord de l'Afrique.* PhD thesis, Paris 12.

Li, X., Coles, B., Ramsey, M., and Thornton, I. (1995). Chemical partitioning of the new national institute of standards and technology standard reference materials (srm 2709–2711) by sequential extraction using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Analyst*, 120(5):1415–1419.

Ludwig, M. (1996). Optical properties of silicon-based materials: A comparison of porous and spark-processed silicon. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*, 21(4):265–351.

Maache, M. (2005). *Dépôt et Caractérisation de Couches Minces de ZnO par Spray Pyrolyse.* PhD thesis, Universite Mohamed Khider-BISKRA.

Mackey, E.A., Christopher, S.J., Lindstrom, R.M., Long, S.E., Marlow, A.F., Murphy, K.E., Paul, R.L., Popelka-Filcoff, R.S., Rabb, S.A., Sieber, J., et al. (2010). Certification of three nist renewal soil standard reference materials for element content: Srm 2709a san joaquin soil, srm 2710a montana soil i, and srm 2711a montana soil ii. *NIST Special Publication*, 260(172):1–39.

Macleod, H. (2017). Thin-film optical filters. CRC press.

Madogni, V.I., Kounouhewa, B., Yakoub, I.A., Agbomahena, M., Houngninou, E., Kouchade, C., and Awanou, C. (2016). Modèle analytique pour l'étude de la dégradation de la performance des cellules photovoltaïques au silicium monocristallin. *Numéros*, 12(4).

Mahdjoub, A., Moualkia, H., Remache, L, and Hafid, A. (2015). Analyse des spectres de transmittance des couches minces par une modélisation mathématique appropriée. *Rev. Alg. Phys*, 2:30–37.

Mahfoud, A. (2018). *Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement.* PhD thesis, Université Ferhat Abbas Sétif 1.

Mahowald, N., Kohfeld, K., Hansson, M., Balkanski, Y., Harrison, S.P., Prentice, I.C., and Rodhe, H. (1999). Dust sources and deposition during the last glacial maximum and current climate: A comparison of model results with paleodata from ice cores and marine sediments. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D13):15895–15916.

Majeed, R., Waqas, A., Sami, H., Ali, M., and Shahzad, N. (2020). Experimental investigation of soiling losses and a novel cost-effective cleaning system for pv modules. *Solar Energy*, 201:298–306.

Mallet, M., Pont, V, Liousse, C., Gomes, L., Pelon, J., Osborne, S., Haywood, J., Roger, J.C., Dubuisson, P., Mariscal, A., et al. (2008). Aerosol direct radiative forcing over djougou (northern benin) during the african monsoon multidisciplinary analysis dry season experiment (special observation period-0). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23).

Mallet, M., Nabat, P., Zuidema, P., Redemann, J., Sayer, A., Stengel, M., Schmidt, S., Cochrane, S., Burton, S., Ferrare, R., et al. (2019). Simulation of the transport, vertical distribution, optical properties and radiative impact of smoke aerosols with the aladin regional climate model during the oracles-2016 and lasic experiments. *Atmospheric Chemistry and Physics, European Geosciences Union*, 19(7):4963–4990.

Mambrini, T. (2014). *Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies.* PhD thesis, Paris 11.

Mani, M., and Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (pv) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9):3124–3131.

Mariano, R., Yau, A., McKeown, J., Kumar, M., and Kanan, M. (2020). Comparing scanning electron microscope and transmission electron microscope grain mapping techniques applied to well-defined and highly irregular nanoparticles. *ACS omega*, 5(6):2791–2799.

Marticorena, B., Chatenet, B., Rajot, J.L., Bergametti, G., Deroubaix, A., Vincent, J., Kouoi, A., Schmechtig, C., Coulibaly, M., Diallo, A., et al. (2017). Mineral dust over west and central sahel: Seasonal patterns of dry and wet deposition fluxes from a pluriannual sampling (2006–2012). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres.*

Marticorena, B., Haywood, J., Coe, H., Formenti, P., Liousse, C., Mallet, M., and Pelon, J. (2011). Tropospheric aerosols over west africa: highlights from the amma international program. *Atmospheric Science Letters*, 12(1):19–23.

Mastekbayeva, G.A., and Kumar, S. (2000). Effect of dust on the transmittance of low density polyethylene glazing in a tropical climate. *Solar Energy*, 68(2):135–141.

Mathieu, H., and Fanet, H. (2001). *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*, volume 5. Dunod Paris.

Mazumder, M.K., Horenstein, M.N., Joglekar, N.R., Sayyah, A., Stark, J.W., Bernard, A.A.R, Garner, S.M., Yellowhair, J.E., Lin, H.Y., Eriksen, R.S., et al. (2017). Mitigation of dust impact on solar collectors by water-free cleaning with transparent electrodynamic films: progress and challenges. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(5):1342–1353.

McCandless, B.E., and Sites, J. (2011). Cadmium telluride solar cells. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, pages 600–641.

McDonald, R.P., and Ho, M. (2002). Principles and practice in reporting structural equation analyses. *Psychological methods*, 7(1):64.

Mehmood, U., Al-Sulaiman, F.A., and Yilbas, B. (2017). Characterization of dust collected from pv modules in the area of dhahran, kingdom of saudi arabia, and its impact on protective transparent covers for photovoltaic applications. *Solar Energy*, 141:203–209.

Messaoudene, I., Molez, L., Rangeard, D., Jauberthie, R., and Naceri, A. (2012). Mortiers à base de sable pliocène et de ciments aux ajouts: fillers de déchets industriels et cendres volcaniques. *Matériaux & Techniques*, 100(5):377–386.

Middleton, N. (1986). A geography of dust storms in south-west asia. *Journal of Climatology*, 6(2):183–196.

Mishchenko, M.I., Travis, L.D., Kahn, R.A., and West, R. (1997). Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a shape mixture of randomly oriented polydisperse spheroids. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14):16831–16847.

Mokhtari, M., Tulet, P., Fischer, C., Bouteloup, Y., Bouyssel, F., and Brachemi, O. (2015). Three-dimensional dust aerosol distribution and extinction climatology over northern africa simulated with the aladin numerical prediction model from 2006 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*.

Morcrette, J. (1989). *Description of the radiation scheme in the ECMWF model*. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

Müller, T., Schladitz, A., Massling, A., Kaaden, N., Kandler, K., and Wiedensohler, A. (2009). Spectral absorption coefficients and imaginary parts of refractive indices of saharan dust during samum-1. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 61(1):79–95.

Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., Decharme, B., Drugé, T., Roehrig, R., and Saint-Martin, D. (2020). Modulation of radiative aerosols effects by atmospheric circulation over the euro-mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(14):8315–8349.

Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Michou, M., Sevault, F., Driouech, F., Meloni, D., di Sarra, G., Di Biagio, C., Formenti, P., et al. (2015). Dust aerosol radiative effects during summer 2012 simulated with a coupled regional aerosol-atmosphere-ocean model over the mediterranean. *Atmospheric Chemistry and physics*, 15(6):3303–3326.

Nakajima, T., and King, M. (1990). Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. part i: Theory. *Journal of the atmospheric sciences*, 47(15):1878–1893.

Ndiaye, A., Kébé, C.M.F., Ndiaye, P.A., Charki, A., Kobi, A., and Sambou, V. (2013). Impact of dust on the photovoltaic (pv) modules characteristics after an exposition year in sahelian environment: The case of senegal. *International Journal of Physical Sciences*, 8(21):1166–1173.

Nemmar, A., Hoet, P.H.M., Dinsdale, D., Vermylen, J., Hoylaerts, M.F., and Nemery, B. (2003). Diesel exhaust particles in lung acutely enhance experimental peripheral thrombosis. *Circulation*, 107(8):1202–1208.

Nimmo, B., and Said, S. (1981). Effects of dust on the performance of thermal and photovoltaic flat plate collectors in saudi arabia-preliminary results. In *aes*, volume 1, pages 145–152.

Notton, G., Caluianu, I., Colda, I., and Caluianu, S. (2010). Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin. *Revue des énergies renouvelables*, 13(1):49–62.

Nouet, G., Lay, P., and Chermant, J. (1987). Le silicium polycristallin polix: élaboration, propriétés et performances. *Revue de physique appliquee*, 22(7):535–547.

Ogunjobi, K., He, Z., and Simmer, C. (2008). Spectral aerosol optical properties from aeronet sun-photometric measurements over west africa. *Atmospheric Research*, 88(2):89–107.

Oh, G., Kim, Y., Lee, S., and Kim, E. (2020). Broadband antireflective coatings for high efficiency ingap/gaas/ingaasp/ingaas multi-junction solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 207:110359.

Olvera, M.D.L.L., Maldonado, A., Asomoza, R., Solorza, O., and Acosta, D. (2001). Characteristics of zno: F thin films obtained by chemical spray. effect of the molarity and the doping concentration. *Thin solid films*, 394(1-2):241–248.

Orgeret, M. (1985). *Les Piles solaires: Le composant et ses applications.* Masson.

Osborne, R., Durkin, T., Shannon, H., Dornan, E., and Hughes, C. (1999). Performance of open-fronted microbiological safety cabinets: the value of operator protection tests during routine servicing. *Journal of applied microbiology*, 86(6):962–970.

Papet, P. (2007). Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en silicium cristallin. *Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.*

Paquet, H., Coudé-Gaussen, G., Rognon, P., and Wendling, R. (1984). Etude minéralogique de poussières sahariennes le long d'un itinéraire entre 19 et 35 de latitude nord. *Révue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 25(4):257–265.

Pardo, B., Megademini, T., and André, J. (1988). X-uv synthetic interference mirrors: theoretical approach. *Revue de physique appliquée*, 23(10):1579–1597.

Perry, K.D., Cahill, T.A., Eldred, R.A., Dutcher, D.D., and Gill, T. (1997). Long-range transport of north african dust to the eastern united states. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D10):11225–11238.

Petit, R.H., Legrand, M., Jankowiak, I., Molinié, J., de Beauville, A., C., Marion, G., and Mansot, J. (2005). Transport of saharan dust over the caribbean islands: Study of an event. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D18).

Piazza, M., Terray, L., Boé, J., Maisonnave, E., and Sanchez-Gomez, E. (2016). Influence of small-scale north atlantic sea surface temperature patterns on the marine boundary layer and free troposphere: A study using the atmospheric arpege model. *Climate dynamics*, 46(5-6):1699–1717.

Piga, G., Santos-Cubedo, A., Solà, S.M., Brunetti, A., Malgosa, A., and Enzo, S. (2009). An x-ray diffraction (xrd) and x-ray fluorescence (xrf) investigation in human and animal fossil bones from holocene to middle triassic. *Journal of Archaeological Science*, 36(9):1857–1868.

Posthuma, N.E., Flamand, G., Geens, W., and Poortmans, J. (2005). Surface passivation for germanium photovoltaic cells. *Solar energy materials and solar cells*, 88(1):37–45.

Pristinski, D., Kozlovskaya, V., and Sukhishvili, S. (2006). Determination of film thickness and refractive index in one measurement of phase-modulated ellipsometry. *JOSA A*, 23(10):2639–2644.

Prospero, J.M., and Carlson, T. (1972). Vertical and areal distribution of saharan dust over the western equatorial north atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research*, 77(27):5255–5265.

Prospero, J.M., Glaccum, R.A., and Nees, R. (1981). Atmospheric transport of soil dust from africa to south america. *Nature*, 289(5798):570–572.

Prospero, J.M., and Lamb, P. (2003). African droughts and dust transport to the caribbean: Climate change implicationsprospero, joseph m and lamb, peter j. *Science*.

Prospero, J. (1999). Long-term measurements of the transport of african mineral dust to the southeastern united states: Implications for regional air quality. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D13):15917–15927.

Quan, Y.Y., and Zhang, L. (2017). Experimental investigation of the anti-dust effect of transparent hydrophobic coatings applied for solar cell covering glass. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160:382–389.

Radnóti, G. (1995). Comments on "a spectral limited-area formulation with time-dependent boundary conditions applied to the shallow-water equations". *Monthly weather review*, 123(10):3122–3123.

Ramanathan, V.C.P.J., Crutzen, P.J., Kiehl, J.T., and Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *science*, 294(5549):2119–2124.

Ramli, M.A.M., Prasetyono, E., Wicaksana, R.W., Windarko, N.A., Sedraoui, K., and Al-Turki, Y. (2016). On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions. *Renewable Energy*, 99:836–844.

Randles, C.A., da Silva, A.M., Buchard, V., Colarco, P.R., Darmenov, A., Govindaraju, R., Smirnov, A., Holben, B., Ferrare, R., Hair, J., et al. (2017). The merra-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. part i: System description and data assimilation evaluation. *Journal of Climate*, 30(17):6823–6850.

Rao, A., Pillai, R., Mani, M., and Ramamurthy, P. (2014). Influence of dust deposition on photovoltaic panel performance. *Energy Procedia*, 54:690–700.

Redelsperger, J.L., Thorncroft, C.D., Diedhiou, A., Lebel, T., Parker, D.J., and Polcher, J. (2006). African monsoon multidisciplinary analysis: An international research project and field campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(12):1739–1746.

Reichle, R.H., Liu, Q., Koster, R.D., Draper, C.S., Mahanama, S.P.P., and Partyka, G. (2017). Land surface precipitation in merra-2. *Journal of Climate*, 30(5):1643–1664.

Reid, E.A., Reid, J.S., Meier, M.M., Dunlap, M.R., Cliff, S.S., Broumas, A., Perry, K., and Maring, H. (2003). Characterization of african dust transported to puerto rico by individual particle and size segregated bulk analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D19).

Ricaud, A., and Gratzel, M. (1997). Photopiles solaires: de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés. *Cahiers de chimie*.

Richter, R.P., and Brisson, A. (2005). Following the formation of supported lipid bilayers on mica: a study combining afm, qcm-d, and ellipsometry. *Biophysical journal*, 88(5):3422–3433.

Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S.D., Takacs, L., Kim, G., et al. (2011). Merra: Nasa's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14):3624–3648.

Roig, B., Koenig, A., Perraut, F., Piot, O., Manfait, M., and Dinten, J. (2016). In vivo diffuse reflectance micro-spectroscopy for correction of raman depth profiles acquired on skin. In *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care V*, volume 9887, page 988717. International Society for Optics and Photonics.

Roig, B. (2015). *Caractérisation de tissus cutanés par spectroscopie bimodale: Réflectance Diffuse et Raman.* PhD thesis, Reims.

Roupsard, P., and RadioProtection-ENVironnement, P. (2013). *Etude phénoménologique du dépôt sec d'aérosols en milieu urbain.* PhD thesis, University of Rouen.

Rushingabigwi, G., Nsengiyumva, P., Sibomana, L., Twizere, C., and Kalisa, W. (2020). Analysis of the atmospheric dust in africa: The breathable dust's fine particulate matter pm2. 5 in correlation with carbon monoxide. *Atmospheric Environment*, 224:117319.

Sahli, M. (2015). *Synthèse, élaboration et caractérisation des nanocomposites à base de magnésium pour le stockage solide d'hydrogène.* PhD thesis, Université des Frères Mentouri de Constantine.

Sahouane, N. (2016). *Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel.* PhD thesis, Université de Tlemcen - Abou Bekr Belkaid.

Said, S.A.M., and Walwil, H. (2014). Fundamental studies on dust fouling effects on pv module performance. *Solar Energy*, 107:328–337.

Said, S.M., Hassan, G., Walwil, H.M., and Al-Aqeeli, N. (2018). The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82:743–760.

Saidan, M., Albaali, A.G., Alasis, E., and Kaldellis, J. (2016). Experimental study on the effect of dust deposition on solar photovoltaic panels in desert environment. *Renewable Energy*, 92:499–505.

Sánchez-Friera, P., Piliougine, M., Pelaez, J., Carretero, J., and Sidrach de Cardona, M. (2011). Analysis of degradation mechanisms of crystalline silicon pv modules after 12 years of operation in southern europe. *Progress in photovoltaics: Research and Applications*, 19(6):658–666.

Schneider, A.R., Cancès, B., Breton, C., Ponthieu, M., Morvan, X., Conreux, A., and Marin, B. (2016). Comparison of field portable xrf and aqua regia/icpaes soil analysis and evaluation of soil moisture influence on fpxrf results. *Journal of Soils and Sediments*, 16(2):438–448.

Schütz, L., and Sebert, M. (1987). Mineral aerosols and source identification. *Journal of aerosol science*, 18(1):1–10.

Seinfeld, J.H., and Pandis, S. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change.* John Wiley & Sons.

Shackley, M. (2010). Is there reliability and validity in portable x-ray fluorescence spectrometry (pxrf). *The SAA Archaeological Record*, 10(5):17–20.

Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H., Mikami, M., Tanaka, T.Y., Wang, X., and Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in earth system science. *Aeolian Research*.

Shao, Y. (2001). A model for mineral dust emission. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17):20239–20254.

Shim, Y., Mamedov, N., and Yamamoto, N. (2004). Phase-modulated spectroscopic ellipsometry and polarized transmission intensity studies of wide-gap biaxial caga2s4. *Thin solid films*, 455:244–247.

Skonieczny, C., Bory, A., Bout-Roumazeilles, V., Abouchami, W., Galer, S.J.G., Crosta, X., Diallo, A., and Ndiaye, T. (2013). A three-year time series of mineral dust deposits on the west african margin: sedimentological and geochemical signatures and implications for interpretation of marine paleo-dust records. *Earth and Planetary Science Letters*, 364:145–156.

Slingo, A., Ackerman, T.P., Allan, R.P., Kassianov, E.I., McFarlane, S.A., Robinson, G.J., Barnard, J.C., Miller, M.A., Harries, J.E., Russell, J.E., et al. (2006). Observations of the impact of a major saharan dust storm on the atmospheric radiation balance. *Geophysical Research Letters*, 33(24).

Smithson, P. (2002). Ipcc, 2001: climate change 2001: the scientific basis. contribution of working group 1 to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, edited by jt houghton, y. ding, dj griggs, m. noguer, pj van der linden, x. dai, k. maskell and ca johnson (eds). cambridge university press, cambridge, uk, and new york, usa, 2001. no. of pages: 881. price£ 34.95, us 49.95,isbn0-521-01495-6(paperback).£90.00,us 130.00, isbn 0-521-80767-0 (hardback). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*.

Sopori, B. and Pryor, R. (1983). Design of antireflection coatings for textured silicon solar cells. *Solar Cells*, 8(3):249–261.

Steiner, A.L., and Chameides, W. (2005). Aerosol-induced thermal effects increase modelled terrestrial photosynthesis and transpiration. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 57(5):404–411.

Styszko, K., Jaszczur, M., Teneta, J., Hassan, Q., Burzyńska, P., Marcinek, E., Łopian, N., and Samek, L. (2019). An analysis of the dust deposition on solar photovoltaic modules. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(9):8393–8401.

Sulaiman, S.A., Mat, M.N.H., Guangul, F.M., and Bou-Rabee, M. (2015). Real-time study on the effect of dust accumulation on performance of solar pv panels in malaysia.

In *Electrical and Information Technologies (ICEIT), 2015 International Conference on*, pages 269–274. IEEE.

Swanson, R. (2005). Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells. In *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.*, pages 889–894. IEEE.

Swap, R., Garstang, M., Greco, S., Talbot, R., and Kållberg, P. (1992). Saharan dust in the amazon basin. *Tellus B*, 44(2):133–149.

Sze, S.M., and Kwok, N. (2006). *Physics of semiconductor devices.* John wiley & sons.

Talbot, R.W., Harriss, R.C., Browell, E.V., Gregory, G.L., Sebacher, D.I., and Beck, S. (1986). Distribution and geochemistry of aerosols in the tropical north atlantic troposphere: Relationship to saharan dust. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 91(D4):5173–5182.

Tanaka, T.Y., Kurosaki, Y., Chiba, M., Matsumura, T., Nagai, T., Yamazaki, A., Uchiyama, A., Tsunematsu, N., and Kai, K. (2005). Possible transcontinental dust transport from north africa and the middle east to east asia. *Atmospheric Environment*, 39(21):3901–3909.

Tegen, I., and Fung, I. (1994). Modeling of mineral dust in the atmosphere: Sources, transport, and optical thickness. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D11):22897–22914.

Tegen, I., Harrison, S.P., Kohfeld, K., Prentice, I.C., Coe, M., and Heimann, M. (2002). Impact of vegetation and preferential source areas on global dust aerosol: Results from a model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D21).

Tegen, I., Werner, M., Harrison, S.P., and Kohfeld, K. (2004). Small anthropogenic contribution to soil dust aerosol emission. *Geophys. Res. Lett*, 31:L24106.

Textor, C., Schulz, M., Guibert, S., Kinne, S., Balkanski, Y., Bauer, S., Berntsen, T., Berglen, T., Boucher, O., Chin, M., Dentener, F., Diehl, T., Feichter, J., Fillmore, D., Ginoux, P., Gong, S., Grini, A., Hendricks, J., Horowitz, L., Huang, P., Isaksen, I.S.A., Iversen, T., Kloster, S., Koch, D., Kirkevåg, A., Kristjansson, J.E., Krol, M., Lauer, A., Lamarque, F., J., Liu, X., Montanaro, V., Myhre, G., Penner, J.E., Pitari, G., Reddy, M.S., Seland, Ø., Stier, P., Takemura, T., and Tie, X. (2007). The effect of harmonized emissions on aerosol properties in global models – an aerocom experiment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(17):4489–4501.

Thirion-Merle, V. (2014). Spectrométrie de fluorescence x.circulation et provenance des matériaux dans les sociétés anciennes, editions des archives contemporaines, collection sciences archéologiques,9782813001634. hal-01393984.

Todokoro, H., and Ezumi, M. (1999). Scanning electron microscope. Google Patents. US Patent 5,872,358.

Tompkins, H., and Irene, E. (2005). *Handbook of ellipsometry*. William Andrew.

Tompkins, H.G., and McGahan, W. (1999). *Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide*. Wiley.

Tost, H., Jöckel, P., Kerkweg, A., Sander, R., and Lelieveld, J. (2006). A new comprehensive scavenging submodel for global atmospheric chemistry modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(3):565–574.

Träger, F. (2012). *Springer handbook of lasers and optics*. Springer Science & Business Media.

Tripathi, A.K., Aruna, M., and Murthy, C. (2017). Output power loss of photovoltaic panel due to dust and temperature. *International journal of renewable energy research*, 7(1):439–442.

Tulet, P., Crahan-Kaku, K., Leriche, M., Aouizerats, B., and Crumeyrolle, S. (2010). Mixing of dust aerosols into a mesoscale convective system: Generation, filtering and possible feedbacks on ice anvils. *Atmospheric Research*, 96(2):302–314.

Tulet, P., Crassier, V., Cousin, F., Suhre, K., and Rosset, R. (2005). Orilam, a three-moment lognormal aerosol scheme for mesoscale atmospheric model: Online coupling into the meso-nh-c model and validation on the escompte campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D18).

Tulet, P., Mallet, M., Pont, V., Pelon, J., and Boone, A. (2008). The 7–13 march 2006 dust storm over west africa: Generation, transport, and vertical stratification. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D23).

Twomey, S. (2007). Pollution and the planetary albedo. *Atmospheric Environment*, 41:120–125.

Ueda, Y., Yamanaka, T., Yamashita, D., Suzuki, T., Ohmae, E., Oda, M., and Yamashita, Y. (2005). Reflectance diffuse optical tomography: its application to human brain mapping. *Japanese journal of applied physics*, 44(9L):L1203.

Walsh, J.J., and Steidinger, K. (2001). Saharan dust and florida red tides: the cyanophyte connection. *Journal of geophysical research: Oceans*, 106(C6):11597–11612.

Wang, Y., and Petrova, V. (2012). Scanning electron microscopy. *Nanotechnology Research Methods for Foods and Bioproducts*, pages 103–126.

Washington, R., and Todd, M. (2005). Synoptic and dynamic aspects of an extreme springtime saharan dust outbreak. *Geophys. Res. Lett*, 32(10.1029).

Xi, Y., Ding, Z., He, H., and Frost, R. (2004). Structure of organoclays—an x-ray diffraction and thermogravimetric analysis study. *Journal of colloid and interface science*.

Xie, L., Zhong, H., Du, Z., and Zhou, J. (2020). Monte carlo simulation of electromagnetic wave transmittance in charged sand/dust storms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 241:106744.

Yilbas, B.S., Ali, H., Khaled, M.M., Al-Aqeeli, N., Abu-Dheir, N., and Varanasi, K. (2015). Influence of dust and mud on the optical, chemical, and mechanical properties of a pv protective glass. *Scientific reports*.

Zaidi, B., Hadjoudja, B., Felfli, H., Chouial, B., and Chibani, A. (2011). Effet des traitements thermiques sur le comportement électrique des couches de silicium polycristallin pour des applications photovoltaïques. *Revue de Métallurgie*, 108(7-8):443–446.

Zender, C.S., Newman, D., and Torres, O. (2003). Spatial heterogeneity in aeolian erodibility: Uniform, topographic, geomorphic, and hydrologic hypotheses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D17).

Zerga, A., Benyarou, F., and Benyousef, B. (1998). Optimisation du rendement d'une cellule solaire np au silicium monocristallin. *Revue des Energies Renouvelables*, pages 95–100.

Zhang, D.S., Luo, M., and Arola, D. (2006). Displacement/strain measurements using an optical microscope and digital image correlation. *Optical Engineering*, 45(3):033605.

Zhou, Z., Liu, W., Zhou, G., Zhang, M., Qian, D., Zhang, J., Chen, S., Xu, S., Yang, C., Gao, F., et al. (2020). Subtle molecular tailoring induces significant morphology optimization enabling over 16% efficiency organic solar cells with efficient charge generation. *Advanced materials*, 32(4):1906324.