

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE CHIMIE SCIENCES DE LA TERRE

DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

ANNEE : 2018 – 2019 N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

SPECIALITE : SCIENCES ET GENIE DES MATERIAUX

Présentée par :

SAKA Goni

**CARACTERISATION DE LA DUREE D'INSOLATION
ET DU POTENTIEL D'ENERGIE SOLAIRE AU
TCHAD**

Soutenue le 12 Novembre 2019 devant le jury composé de :

Amadou Thierno GAYE	Professeur, ESP, UCAD, Dakar	<u>Président</u>
Bouya DIOP	Maitre de Conférences, UGB, Saint Louis	<u>Rapporteur</u>
Balla Diop NGOM	Maitre de Conférences, FST, UCAD, Dakar	<u>Rapporteur</u>
Pape Douta TALL	Professeur, FST, UCAD, Dakar	<u>Examineur</u>
Vincent SAMBOU	Maitre de Conférences, ESP, UCAD, Dakar	<u>Examineur</u>
Mamadou Simina DRAMÉ	Maitre-Assistant, FST, UCAD, Dakar	<u>Co-encadreur</u>
Aboubaker Chedikh BEYE	Professeur, FST, UCAD, Dakar	<u>Directeur</u>

*"Il ne faut pas penser à l'objectif à atteindre, il faut seulement avancer.
C'est ainsi, à force d'avancer, qu'on atteint ou qu'on double
ses objectifs sans même s'en apercevoir."
Bernard Werber, La révolution des Fourmis*

DEDICACES

Je dédie ce document :

au Tout Puissant **Seigneur Dieu** qui m'assiste et m'éclaire chaque jour ;

à mon feu oncle **Koutou Njounga** paix à son âme ;

à mon père **Issa Kana Uia Niélé** de m'avoir donné une bonne éducation, que le Tout Puissant le protège ;

à ma feu mère **Khadidja Haoua Adamou** paix son âme

à ma Grande sœur **Issa Kana Kibissi** et mon grand frère **Issa Kana Mia Serge** qui m'ont toujours soutenu que Dieu les protège et les bénisse ;

à ma très chère épouse **Leyel Misdongarti Majoie** et mes enfants (**Issa Kana Djonga Christopher** et **Issa Kana Khadidja Winny**) que je les aime tant ;

à toute la famille **Issa Kana** et à tous ceux qui me sont chères.

à toute la famille **Koutou Njounga**

à toute ma famille maternelle.

à ma belle famille

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à Dieu le tout puissant pour sa protection que nous avons bénéficiée durant quatre ans de recherche ainsi que tout le temps de la rédaction de cette thèse.

Qui a dit que la thèse est une empreinte personnelle ? Il est vrai que les tâches accomplies chaque jour au cours de ces trois ans, comme lire un article, tourner une simulation, mesurer un échantillon, etc. sont des gestes individuels, mais leur fruit ne peut pas être cueilli mûr sans l'intervention collective d'un certain nombre de personnes spécialisées.

Parmi ces personnes, **Aboubaker Chedikh BEYE** dont je tiens à remercier pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire Uranie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar durant les quatre années de ma thèse qui l'a dirigée. J'exprime ma reconnaissance envers lui pour ses conseils avisés, sa disponibilité ainsi que son soutien moral et scientifique.

Un remerciement tout particulier que je ne pourrais pas exprimer avec de simples mots, s'adresse à mon encadrant **M. Mamadou Simina Dramé**, Maître-assistant à l'Université Cheik Anta DIOP. Sa rigueur a fait que les travaux présentés au cours de cette thèse ont été menés avec exactitude. Sa disponibilité était un facteur très important qui a permis d'avancer le travail, puisque la porte de son bureau était toujours ouverte pour m'accueillir et répondre à toute question provenant de divers horizons scientifiques et autres. Ses qualités tant scientifiques qu'humaines ont montré son excellence à mener un travail d'encadrement.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury :

- Monsieur **Amadou Thierno GAYE**, professeur à l'École Supérieure Polytechnique de Dakar, pour avoir **présidé** ce jury
- Monsieur **Bouya DIOP**, pour avoir accepté de **rapporter** sur mes travaux dans les délais imposés par l'école doctorale ainsi que ses remarques fructueuses dans le domaine.
- Monsieur **Balla Diop NGOM**, qui a accepté d'être **rapporteur** malgré les exigences en termes de temps.
- Monsieur **Pape Douta TALL**, qui a accepté d'**examiner** avec soin ces travaux de recherche et qui a apporté ses conseils utiles.
- Monsieur **Vincent SAMBOU**, pour avoir accepté d'être membre du jury et d'examiner ce travail.

- Monsieur **Mamadou Simina DRAMÉ**, pour avoir accepté d'être membre du jury et d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres du laboratoire Uranie qui ont contribué de près ou de loin à ce travail, notamment Pr. **Balla Diop Ngom**, Pr. **Kharouna Talla**, Dr. **Allé Dioum** et Pr. Ing **Serigne Bira Gueye**.

Que toute l'équipe d'enseignement au sein du département de physique de l'université soit remercié.

Je remercie tous les amis, les collègues docteurs et doctorants du Laboratoire Uranie pour leur franche collaboration, l'accueil et tout le temps passé ensemble au cours de mes séjours dans ce laboratoire. Mes remerciements en particulier aux amis du bureau (**Haroun Ali Adanou**, **Dialo Diop**, **Ndiaye dione**, **Mamadou Ndiaye**, Mme Sy (**Soukeyna**), **Bachir** et **El hadj Omar**.

Je remercie également mes parents pour leur soutien permanent au cours de ces années.

Mes sincères remerciements à la direction de la météorologie nationale et au centre national de recherche et développement, en particulier Mme **Toko Bilha** et Mme **Félicité Modjinguem**. Finalement, sans citer des noms, sont profondément remerciés mes amis venant de tous les horizons et qui ont marqué mon passage à Dakar durant ces quatre (04) ans.

RESUME

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la caractérisation de la durée d'insolation et du potentiel d'énergie solaire au Tchad. Le but était d'évaluer le potentiel d'énergie solaire avec des outils adaptés comme les observations in situ (les durées d'insolation et les nouvelles mesures du rayonnement global), la nouvelle réanalyse ERA5 du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT/ECMWF) et le code de transfert radiatif Streamer.

Au début, une caractérisation de la durée d'insolation entre 1950 et 2010 au Tchad a été effectuée. Les résultats montrent que le Tchad est l'un des pays les plus ensoleillés au monde. Avec plus de 3031 ± 176.33 heures d'ensoleillement par an correspondant à 8.9 heures par jour. On note également un fort gradient nord-sud avec une insolation quotidienne de 10 ± 0.41 heure dans le nord et de 7.75 ± 1.8 heure dans le sud du pays.

Ensuite, les observations du pyranomètre et les simulations du code de transfert radiatif Streamer ont permis de caractériser la variabilité saisonnière du potentiel d'énergie solaire sur la station de N'Djamena. D'abord, les résultats du fluxmètre évaluent le potentiel d'énergie solaire global moyen à $4.71 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ à N'Djamena. Les maxima sont enregistrés au printemps avec des valeurs supérieures à $5.70 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$; et les minima en hivers et en pleine saison des pluies (mois d'août) avec des valeurs inférieures à $4 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$. Après, les observations du rayonnement global ont permis de valider le code Streamer avec des scores de l'ordre de 98%. Avec ce code nous, avons simulé le rayonnement direct normal et diffus sur plusieurs types de journées (jours clairs, poussiéreux et nuageux). Un examen de l'influence de la poussière sur le rayonnement solaire basé sur un des cas sélectionnés ($\text{AOD} = 2.05$) montre une diminution de 3.17 et $3.33 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$, respectivement pour le potentiel global et direct normal. Cela correspond à une augmentation du potentiel diffus de l'ordre de $0.52 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ pour cette journée.

Et enfin l'analyse des données de la nouvelle Ré-analyses ERA5 a permis de représenter les potentiels direct, diffus et global sur toute l'étendue du territoire tchadien. D'abord, cette réanalyse a été validée par les données de rayonnement global de la station de N'Djamena avec un coefficient de corrélation de 79%. Ensuite, ces résultats confirment le gradient nord-sud du potentiel d'énergie solaire. Ainsi, le potentiel global varie de $8.1 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au nord pendant le printemps à $4.8 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au sud en été. De même que le potentiel direct normal varie de $5.9 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au nord en printemps à $2.8 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au sud en été. Et enfin, le potentiel diffus varie de $2.25 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au sud en été à $0.95 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au nord en hiver.

Mots clés: Potentiel d'énergie solaire, Insolation, pyranomètre, héliographe, Tchad, Afrique centrale.

ABSTRACT

The work presented in this thesis deals with the characterization of the duration of insolation and solar energy potential in Chad. The aim was to evaluate the solar energy potential with adapted tools such as in situ observations (sunstroke durations and new global radiation measurements), the new ERA5 reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the Streamer radiative transfer code.

At first, a characterization of the duration of insolation between 1950 and 2010 in Chad was carried out. The results show that Chad is one of the sunniest countries in the world. With more than 3030.91 ± 176.33 hours of sunshine a year corresponding to 8.9 hours a day. There is also a strong north-south gradient with daily insolation of 10 ± 0.41 hours in the north and 7.75 ± 1.8 hours in the south of the country.

Then, the pyranometer observations and the Streamer radiative transfer code simulations made it possible to characterize the seasonal variability of the solar energy potential at the N'Djamena station. First, the flux meter results estimate the average global solar energy potential at $4.71 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ at N'Djamena. Peaks are recorded in the spring with values greater than $5.70 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$; and minima in winters and in the rainy season (August) with values below $4 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$. After, the observations of the global radiation made it possible to validate the Streamer code with scores of the order of 98%. With this code we simulated the direct normal and diffuse (unmeasured) radiation on several types of days (clear, dusty and cloudy days). An examination of the influence of dust on solar radiation based on one of the selected cases ($\text{AOD} = 2.05$) shows a decrease of 3.33 and $3.17 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$, respectively for the overall and direct potential. This corresponds to an increase of the diffuse potential of the order of $0.52 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ for this day.

And lastly, the analysis of the data from the new ERA5 reanalysis made it possible to represent direct, diffuse and global potentials throughout the whole of Chadian territory. First, this reanalysis was validated by the global radiation data of the N'Djamena station with a correlation coefficient of 79%. Then, these results confirm the north-south gradient of the solar energy potential. Thus, the overall potential varies from $8.1 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ in the north during the spring to $4.8 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ in the south in summer. Just as the normal direct potential varies from $5.9 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ in the north in spring to $2.8 \text{ kWh/m}^2/\text{d}$ in the south in summer. And finally, the diffuse potential varies from $2.25 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ in the south in summer to $0.95 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ in the north in winter.

Keywords : Solar energy potential, Insolation, pyranometer, heliograph, Chad, Central Africa

LISTE DES ACRONYMES ET SIGLES

AGRHYMET : Centre Régional de Formation et d'Application en Agro-Hydrologie-Météorologie

AOD : Aerosol Optical Depth

ASECNA : l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CEPMMT : Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

CILSS : Comité Inter- Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel

CNAR : Centre National d'Appui à la Recherche

CNRD : Centre National de Recherche et de Développement

DGMN : Direction Générale de la Météorologie Nationale

DREM : Direction des Ressources en Eau et de la Météorologie

DCDH : Direction de la Connaissance du Domaine Hydraulique

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat

GIOVANNI: Geospatial Interactive Online Visualization Analysis Infrastructure

HYSPLIT: Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IRENA : Agence Internationale des Energies Renouvelables

ITRAD : Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement

INSH : Institut National des Sciences Humaines

INSA : Institut National des Sciences Appliquées

ISS: Integrated Sensor Suite - ISS

LRVZ : Laboratoire de Recherches Vétérinaire et Zootechnique

MODIS : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MSG : Météosat de Seconde Génération

NASA : **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**ministration

OFS : **O**ffice **F**édéral de la **S**tatistique

OMM : **O**rganisation **M**étéorologique **M**ondiale

PIB : **P**roduit **I**ntérieur **B**rute

PANA : **P**rogramme d'Action **N**ational d'Adaptation aux **C**hangements **C**limatiques

PRASAC : **P**ole **R**égional et de **R**echerche **V**étérinaires **A**ppliquée au **D**éveloppement des **S**avanes en **A**frique **C**entrale

ROPN : **R**éseau d'**O**bservation des **P**âturages **N**aturelles

SMT : **S**ystème **M**ondial de **T**ransmission

UE : **U**nion **E**uropéenne

UV : **U**ltra-**V**iolet

SPI : **S**tandard **P**réciptation **I**ndice

Table des matières

DEDICACES.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTE DES ACRONYMES ET SIGLES	vi
INTRODUCTION GENERALE	1
1. Intérêt scientifique	2
2. Les réserves d'énergie solaire en Afrique et au Tchad	7
3. Objectifs et organisation de la thèse	10
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE	15
1. Origine et nature du rayonnement solaire	16
2. Constante solaire.....	17
3. Rayonnement solaire du sommet de l'atmosphère au sol et ses composants	17
4. La durée d'insolation et la fraction d'insolation	21
5. Bilan radiatif terrestre	23
6. Géométrie solaire	24
6.1. Azimut et hauteur solaire	24
6.2. Coordonnées géographiques et solaires	25
6.3. Déclinaison et angle horaire du soleil	26
6.4. Relations de repérage du soleil	28
6.5. La durée du jour et le temps.....	28
7. Applications de l'énergie solaire	30
CHAPITRE 2 : DONNEES ET METHODES	32
1. Présentation de la zone d'étude et des stations	33
2. Présentation des instruments et des données in-situ utilisés dans la thèse	34
2.1. Mesure de la durée d'insolation.....	34
2.2. Mesure du rayonnement : Le pyranomètre	37

3. Présentation du code de transfert radiatif STREAMER	44
4. Présentation des données MODIS	44
5. Présentation des données de réanalyse ERA5	45
6. Méthode de calcul du potentiel d'énergie solaire	46
7. Traitement des données in-situ de la durée d'insolation et rayonnement.....	48
CHAPITRE 3 : VARIATIONS DE LA DUREE D'ENSOLEILLEMENT ET SON INTERACTION AVEC LES PARAMETRES METEOROLOGIQUES ENTRE 1950 ET 2010 AU TCHAD	51
1. Contexte de l'étude.....	52
2. Caractérisation et tendances saisonnière (annuelle) de la durée d'ensoleillement entre 1950 et 2010.....	54
2.1. Caractérisation annuelle de la durée d'ensoleillement	54
2.2. Caractérisation mensuelle et saisonnière de la durée d'ensoleillement.....	56
2.3. Tendances des anomalies moyennes de la durée d'insolation entre 1950 et 2010 au Tchad	58
3. Effet de la variabilité saisonnière des paramètres météorologiques sur la durée d'insolation... ..	59
3.1. Impact des précipitations sur la durée d'insolation.....	59
3.2. Impact de l'humidité relative et interaction avec les températures.....	60
4. Bilan et conclusion.....	62
CHAPITRE 4 : OBSERVATION ET SIMULATION DU POTENTIEL D'ENERGIE SOLAIRE A N'DJAMENA AU TCHAD	64
1. Approche et objectifs	65
2. Variabilité saisonnière du potentiel d'énergie solaire global à N'Djaména	67
3. Effets saisonniers de l'épaisseur optique des aérosols, de la vapeur d'eau et de la durée d'insolation sur le potentiel solaire global	68
4. Validation diurne du rayonnement global simulé par le code de transfert radiatif STREAMER à N'Djaména.....	70
5. Utilisation du code STREAMER pour évaluer l'impact des aérosols et de la vapeur d'eau sur le rayonnement global, direct normal et diffus à N'Djaména.....	74
6. Bilan et conclusion.....	77

CHAPITRE 5 : UTILISATION DES REANALYSES ERA5 POUR REPRESENTER LE POTENTIEL D'ENERGIE SOLAIRE AU TCHAD EN 2018.....	78
1. Introduction.....	79
2. Validation du rayonnement global d'ERA5 sur la station de N'Djaména en 2018.....	81
3. Représentation mensuelle du potentiel global, direct normal et diffus par ERA5 sur le Tchad en 2018.....	82
3.1 Evolution mensuelle du potentiel global.....	82
3.2 Evolution mensuelle du potentiel direct	84
3.3 Evolution mensuelle du potentiel diffus	85
4. Répartition par zone climatique du potentiel solaire au Tchad.....	87
5. Bilan et conclusion.....	89
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	90
BIBLIOGRAPHIE	94
ANNEXES.....	105

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Emission du dioxyde de carbone et pollution de l'environnement du aux énergies fossiles [11].....	4
Figure 2: Evaluation du potentiel annuel d'utilisation des énergies renouvelables en 2020 [15].....	6
Figure 3: Irradiation horizontale globale en Afrique subsaharienne [17].....	7
Figure 4: Les différentes composantes du rayonnement solaire [37].	19
Figure 5: Spectre énergétique du rayonnement solaire [39].	20
Figure 6: Moyenne annuelle de la durée d'ensoleillement mondiale [41].	22
Figure 7: Bilan d'énergie dans l'atmosphère terrestre en W/m^2 [42].	23
Figure 8: Repérage du soleil [45].....	25
Figure 9: Coordonnées géographiques terrestres	25
Figure 10: Mouvement de la terre autour du soleil.....	26
Figure 11 : Equinoxes et solstices [47]	27
Figure 12: Cartes du Tchad avec les sept (07) stations de mesure (in-situ) de la durée d'insolation.....	33
Figure 13: Instrument de mesure de la durée d'insolation du service de la météorologie nationale de N'Djamena (DGNM, 2017).....	37
Figure 14: Pyranomètre de la station météo Vantage Pro2 [51].....	39
Figure 15: Station Vantage Pro2 Plus de mesures des paramètres météorologiques et du rayonnement solaire du CNRD de N'Djamena [51].	40
Figure 16: Distribution annuelle de la durée d'insolation au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.....	55
Figure 17: Distribution mensuelle de la durée d'insolation au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.....	57
Figure 18: Tendances des anomalies de la durée d'insolation au Tchad. Représentation en a) Nord, b) Centre, c) Sud et d) Moyenne sur le Tchad entre 1950 et 2010.....	58
Figure 19: Anomalies annuelles de la durée d'insolation et des précipitations entre 1950 et 2010 au Tchad.	60
Figure 20: Tendances des anomalies annuelles de la température (moyenne, minimale et maximale) et de l'humidité relative entre 1950 et 2010 au Tchad.....	61

Figure 21: Moyenne mensuelle du potentiel d'énergie solaire global mesuré en kWh/m ² /j à N'Djamena entre 2017 et 2018.	67
Figure 22: Effets qualitatifs de l'insolation (a), de l'épaisseur optique des aérosols (b) et de l'eau précipitable (c) sur le potentiel solaire global à N'Djamena entre 2017 et 2018.	68
Figure 23: Cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux (02) jours clairs (sans aérosols) du 19 octobre (a) et 27 décembre 2018 (c) à N'Djamena. Les droites de régression linéaire entre la mesure et la simulation sont montrées sur les graphes (b) et (d) respectivement pour le 19 octobre et le 27 décembre.	71
Figure 24: Cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux (02) jours poussiéreux (maximum d'ADO) du 29 mars (a) et du 1er avril 2018 (c) à N'Djamena. Les droites de régression linéaire entre la mesure et la simulation sont montrées sur les graphes (b) et (d) respectivement pour le 29 mars et 1 ^{er} avril.	72
Figure 25: Cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux (02) jours nuageux (maximum d'eau précipitable) du 23 août (a) et du 24 août 2018 à N'Djamena. Les droites de régression linéaire entre la mesure et la simulation sont montrées sur les graphes (b) et (d) respectivement pour le 23 août et 24 août.	73
Figure 26: Simulation diurne des flux diffus et direct avec le code STREAMER en faisant varier la valeur de l'AOD pour 29 mars (AOD=0 en rouge et AOD = 2.87 en noir) et 1er avril (AOD = 0 en rouge et AOD = 2.05 en noir).	74
Figure 27: Simulation du cycle diurne des flux direct (droite) et diffus (gauche) avec le code STREAMER en faisant varier la valeur de la vapeur d'eau pour le 23 août (Wp = 0 cm en rouge et Wp = 5.28 cm en noir) et 24 août (Wp = 0 cm en rouge et Wp = 5.7 cm en noir).	76
Figure 28: Carte climatique et pluviométrique du Tchad [103]	79
Figure 29: Corrélation entre le potentiel solaire global issu des mesures in-situ et des Ré-analyses ERA5.....	82
Figure 30: Représentation mensuelle du potentiel d'énergie solaire global par les Ré-analyses ERA5 en 2018 au Tchad.....	83
Figure 31: Représentation mensuelle du potentiel d'énergie solaire direct par les Ré-analyses ERA5 en 2018 au Tchad.....	84

Figure 32: Représentation mensuelle du potentiel d'énergie solaire diffus par les Ré-analyses ERA5 en 2018 au Tchad.....	86
Figure 33: Evolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire global par zone climatique en 2018.	87
Figure 34: Evolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire direct par zone climatique en 2018.	88
Figure 35: Evolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire diffus par zone climatique en 2018.	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Eléments constituant les stations Vantage Pro2/Pro2 Plus	42
Tableau 2 : Caractéristiques techniques des capteurs	43
Tableau 3 : Classification de l'indice SPI [67]	50
Tableau 4: Insolation annuelle et mensuelle au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.	58
Tableau 5: Anomalies annuelles au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.	59
Tableau 6: Impact de trois (03) périodes d'ensoleillement sur les différents paramètres météorologiques au Tchad.....	62
Tableau 7: Les paramètres d'entrée du modèle STREAMER.....	70
Tableau 8: Effet quotidien de la poussière sur le potentiel solaire disponible (direct, diffus et global) pour la journée du 1er avril 2018 à N'Djamena.	75
Tableau 9: Effet quotidien de la présence des nuages sur le potentiel solaire disponible (direct, diffus et global) le 23 aout 2018 à N'Djamena.....	77
Tableau 10: Coordonnées géographiques de vingt (20) localités du Tchad choisis pour l'étude avec les zones climatiques correspondantes.	81

INTRODUCTION GENERALE

1. Intérêt scientifique

A l'image des autres pays du globe, et plus en particulier ceux en développement, le réchauffement climatique représente une menace pour le développement durable du Tchad [1]. Les secteurs socioéconomiques clés du développement (agriculture, élevage, pêche, biodiversité, santé, eau, énergie, tourisme, transport, infrastructures, industrie etc.) restent encore très sensibles aux caprices du climat. Tous ces secteurs touchés ont besoin des services climatiques pour limiter les effets négatifs et saisir les opportunités qu'offre le changement climatique [1].

Le Tchad, pays subsaharien enclavé, dépourvu de toute façade maritime dont plus de la moitié est désertique. C'est un pays essentiellement rural et agricole où l'élevage, la pêche, l'agriculture, occupent 75% de la population et représentent 21% du PIB. Il est parmi les pays les plus vulnérables face aux impacts projetés du changement climatique. En tant que tel, le pays est confronté à de nombreux défis [1].

Le changement climatique ou dérèglement climatique correspond à une modification durable (de la décennie au million d'années) des paramètres statistiques du climat global de la terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements peuvent être dus à des processus intrinsèques à la terre, à des influences extérieures ou, plus récemment, aux activités humaines. Selon la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) sont tous changements attribuables directement ou indirectement aux activités humaines qui affectent la composition de l'air atmosphérique et qui s'ajoutent à la variabilité naturelle du climat [2]. De nombreux travaux scientifiques sur le climat actuel dans la sous-région (GIEC, 2007 et 2014 et AGRHYMET/CILSS [3, 5] ont permis de mettre en évidence les changements climatiques actuels majeurs survenus en Afrique et plus particulièrement au Tchad. La recrudescence des phénomènes météorologiques extrêmes tels que les inondations, les sécheresses, les vagues de chaleur est l'un des faits marquants des changements climatiques enregistrés au cours de ces dernières décennies au Tchad [6].

L'augmentation des températures de l'ordre de +4°C dans le Sahel conduit à une recrudescence des sécheresses aiguës et saisonnières au Tchad [6]. Les années de sécheresses de 1972-1973 et 1984 (El Nino) ont été particulièrement graves ; de pareils épisodes, dû à un déficit pluviométrique, produisent des effets comme insécurité alimentaire, déficit en eau pour les différents usages, chute de production agricole et animale, pertes en vies humaines et de la biodiversité, dégradation du couvert végétal, migration de la population et du bétail,

tarissement précoce des cours d'eau saisonniers ou baisse des niveaux des lacs et des cours d'eau permanents, attaques des acridiens, feu de brousse, exode rural. Les inondations sont en recrudescence 1988, 1999, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010 et 2012 ont été particulièrement violentes. Par exemple, en octobre 2012, environ 56813 ménages affectés ont perdu des abris, des superficies emblavées et d'animaux. Comme conséquences, leurs productions agricoles et les revenus issus de l'élevage ont gravement chuté, créant une insécurité alimentaire dans ces ménages. Les inondations au Tchad ont causé des pertes de productions allant de 40 à 88% et se produisent actuellement environ une année sur deux [2].

Les vents qui étaient moins violents pendant la période d'avant les 30 dernières années sont devenus plus violents (PANA, 2010). Généralement, les formations pluvio-orageuses sont le plus souvent associées à des vents violents (vents de sable, vents de poussière), causant des dégâts quelques fois énormes sur les cultures, les arbres et les habitats [2]. Les changements climatiques majeurs récents enregistrés au cours de ces deux dernières décennies au Tchad montrent des variations des régimes des précipitations marquées par une brusque alternance d'années humides et sèches et variabilité accrue des pluies et ses composantes, une augmentation des températures de l'ordre de 1°C au cours de la période récente par rapport à la période qui va des années 50 à 90 une recrudescence des phénomènes climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les inondations, les vagues de chaleur [1, 6].

De plus, l'Afrique fait partie des régions les plus ensoleillées au monde. Presque tout le Maghreb, les pays sahéliens et l'Afrique australe sont dans la ceinture solaire (régions du monde où l'ensoleillement normal direct excède 2000 kWh/m²/an) [7]. Le Tchad, bien que disposant d'un potentiel énergétique important, vit encore une crise énergétique notoire. Mise à part le pétrole, le pays recèle d'énormes potentialités énergétiques. Par exemple dans les zones d'Aboudeya, Melfi, Mongo, Léré et Pala, des recherches ont révélé un potentiel de gisement d'uranium [8].

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80%) provient de gisements de combustibles fossiles carbonés (charbon, pétrole, gaz). Ces gisements constitués au fil des âges sont évidemment en quantité limitée et sont épuisables. En effet, selon les données publiées par l'industrie BP en 2010, on constate que la consommation croît plus vite que les besoins. Ainsi, si nous prenons le pétrole, la part qui est utilisée dans la production de l'énergie est de 40% et au bout de 46 ans on assistera probablement à l'épuisement de cette ressource. En considérant l'ensemble de ces ressources, la durée d'utilisation restante en années à la consommation 2009 est de 75 ans. Par ailleurs, si on suppose que chaque année,

la consommation connaît un accroissement de 2%, l'échéance sera plus rapprochée (46 ans). Le rapprochement de l'épuisement de ces ressources et le réchauffement climatique qu'occasionne leur combustion doivent impérativement nous amener à envisager le développement des ressources renouvelables [9].

De nos jours, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production [9, 10]. Elles sont propres et inépuisables, donc capables de couvrir nos besoins énergétiques à long terme.

La figure 1 montre une consommation accrue d'énergies fossiles entraînant une émission d'énormes quantités de dioxyde de carbone (CO_2) à travers l'atmosphère par les secteurs industriels. Vu l'utilisation croissante de ces énergies fossiles de par le monde entier et leur pollution sur l'environnement (cf. figure 1) et compte tenu du contexte climatique actuel, il est souhaitable que nous développions des sources d'énergie renouvelables. Parmi les diverses solutions de rechange aux combustibles fossiles, l'énergie solaire semble être l'une des solutions les plus prometteuses à long terme.



Figure 1: Emission du dioxyde de carbone et pollution de l'environnement du aux énergies fossiles [11].

En ces moments où l'énergie devient un enjeu majeur, tant du point de vue économique qu'écologique, il devient urgent de déployer tous nos efforts pour rendre les systèmes les plus vertueux possible. Il en va de l'équilibre global de notre écosystème. Au vu de l'augmentation constante des besoins énergétiques des pays en forte expansion, et de la consommation actuelle de l'énergie, les autorités internationales se sont mobilisées vers le déploiement des énergies renouvelables en vue de fournir une énergie fiable et rentable tant du point de vue économique que sociétal. A l'aide des analyses publiées par les différentes agences mondiale, européenne et nationale, il est possible de mettre en évidence les conséquences de l'utilisation des énergies fossiles sur l'évolution de la planète par l'intermédiaire des rejets de CO₂ dans l'atmosphère [12].

L'Office fédéral de la statistique (OFS) de la Suisse définit les énergies renouvelables comme suit: « Terme générique désignant les énergies disponibles de manière illimitée, à l'échelle temporelle humaine, et dont les matières premières ne s'épuisent pas (sans l'énergie hydraulique). En font partie l'énergie solaire, la chaleur de l'environnement, la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie produite à partir des déchets ménagers et industriels et l'énergie tirée des stations d'épuration des eaux » [13]. Les énergies renouvelables constituent une réelle opportunité pour répondre à une partie de nos besoins énergétiques dans le respect d'impératifs environnementaux, sociaux, économiques, stratégiques et éthiques. Leur utilisation n'est évidemment pas nouvelle. Mais, avec l'avènement de la révolution industrielle, elles ont été marginalisées au profit d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Depuis quelques décennies cependant, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire ont fait prendre conscience de la nécessité d'une organisation de la société qui respecte l'environnement dans lequel nous vivons. Dans le cadre de cette réorientation vers une plus grande viabilité (le "développement durable" ou, dans une traduction plus correcte, le "développement supportable"), les Conférences de Rio et de Kyoto ont attribué un rôle important aux énergies renouvelables [14].

La figure 2 représente l'évaluation des réserves des énergies renouvelables dans le monde avec une estimation des différentes ressources. L'analyse de celle-ci montre que l'énergie du bois est de 1644 Mtep dont le continent américain dispose de 51.52% de cette énergie suivant du continent africain (18.63%), du continent européen (16.03%), du continent asiatique (9.2%) et de l'Océanie (4.35%). Ceci montre une utilisation en moyenne dans l'ordre respectif les énergies suivantes : le bois, l'hydraulique, le solaire, l'éolien, etc. dont le

continent africain qui est l'un des continent le plus ensoleillé à faible pouvoir d'exploitation des énergies renouvelables dont le solaire.

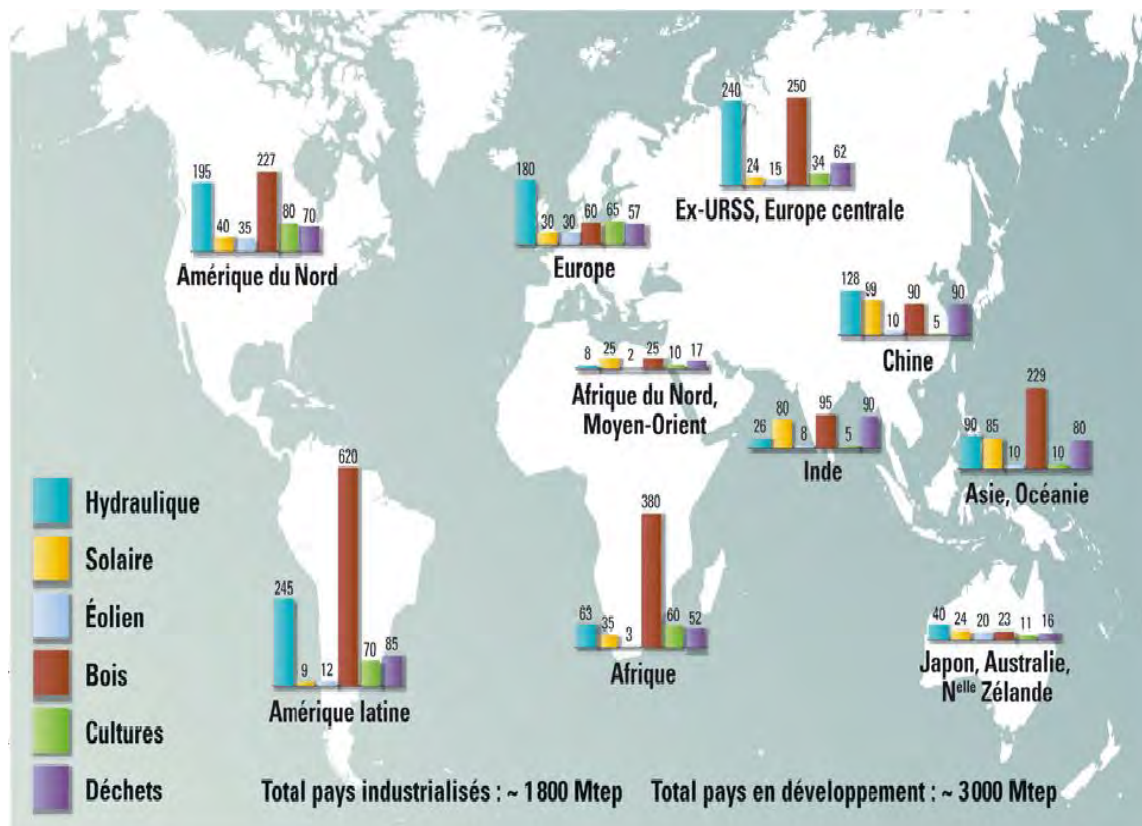


Figure 2: Evaluation du potentiel annuel d'utilisation des énergies renouvelables en 2020 [15].

Selon le forum International sur les énergies renouvelables à N'Djamena en février 2012, le Tchad regorge d'importantes potentialités en énergies renouvelables notamment le solaire et l'éolien. Du Nord au Sud du pays, le soleil brille de 2.750 à 3.250 heures par an. L'intensité du rayonnement global varie en moyenne de 4.5 à 6.5 kWh/m²/j. Quant à l'énergie éolienne, la vitesse moyenne des vents calmes varie de 2.5 m/s à 5m/s du sud au nord, ces données sont fournies par les satellites [8, 16].

Pour renforcer les capacités au niveau local et rendre la fourniture des services énergétiques comme l'eau, l'industrie agro-alimentaire et l'éclairage accessibles à tous, il faut nécessairement des sources d'énergie propres et fiables dont les énergies renouvelables [8]. L'enjeu est de concilier la satisfaction en besoins d'énergie et le respect de l'environnement par l'utilisation de ces sources d'énergie propre en impliquant tous les acteurs. Les besoins de la population rurale par exemple n'ont jamais eu la chance d'être satisfaits par une connexion au réseau centralisé reste beaucoup plus coûteuse. C'est alors que le recours à des petites

sources décentralisées est nécessaire par les énergies renouvelables. Un autre aspect des énergies renouvelables est celui de la protection de l'environnement. L'exploitation des systèmes solaires ne polluant pas, sensibiliserait la population Tchadienne à faire preuve d'une écocitoyenneté par la consommation des produits solaires. L'énergie solaire est une possibilité concrète presque partout dans le monde, chaque région ayant un potentiel plus ou moins grand de production d'énergie solaire. Il est important de connaître ces potentialités, les moyens de sa politique et promouvoir sa technologie [8].

2. Les réserves d'énergie solaire en Afrique et au Tchad

La figure 3 présente l'irradiation globale sur un plan horizontal en Afrique. Elle montre la répartition zonale en termes de potentiel solaire.

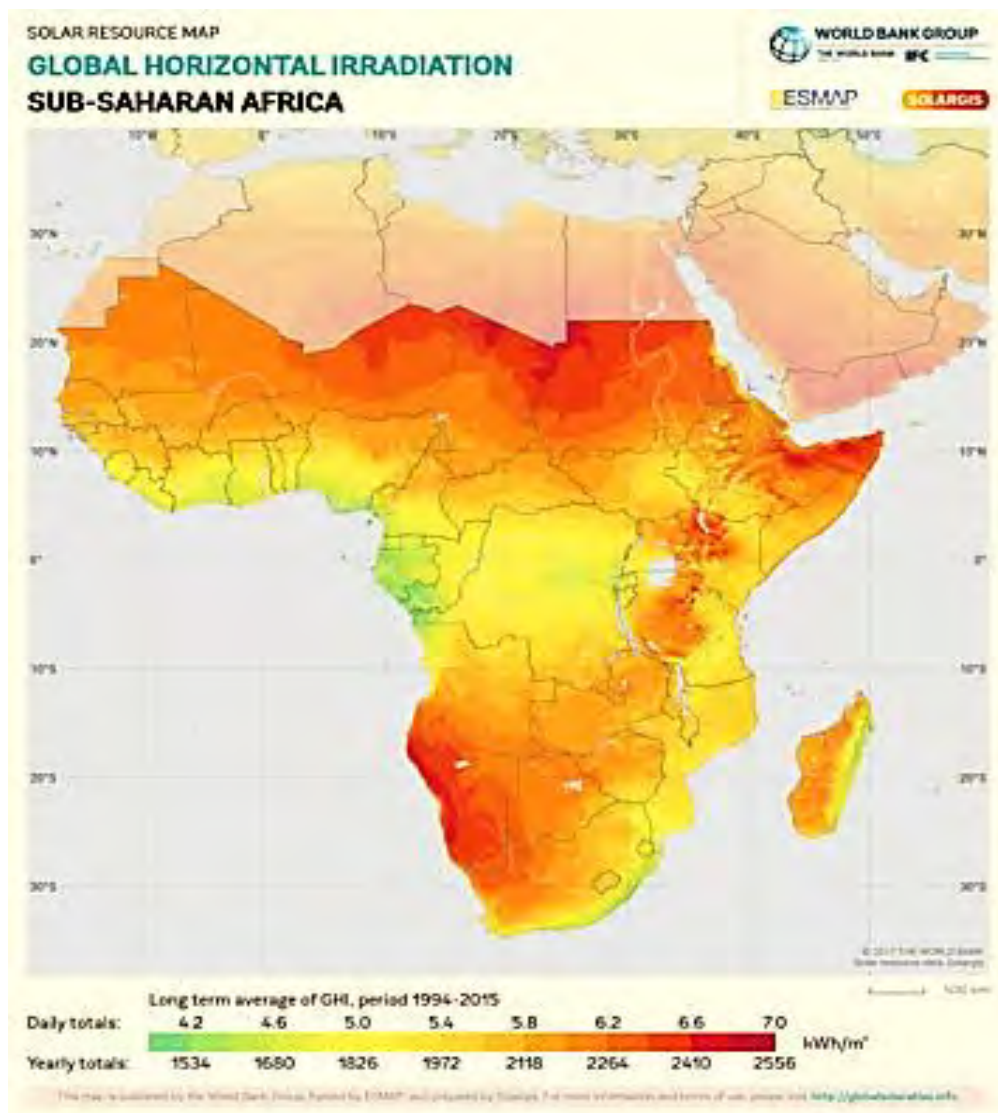


Figure 3: Irradiation horizontale globale en Afrique subsaharienne [17].

L'Afrique est le continent doté du plus fort potentiel pour l'énergie solaire, et nombre des lieux les plus ensoleillés du monde s'y trouvent [18-20]. Malgré ce potentiel, le taux de pénétration de l'énergie solaire est encore très faible [21], mais connaît une forte croissance à partir de la deuxième partie des années 2010. Elle (figure 3) montre l'irradiation solaire globale annuelle dans tous les pays d'Afrique. D'après les données que nous révèle la légende, l'irradiation solaire globale annuelle en Afrique se situe entre 1600 et plus de 2500 kWh/m²/an. Ainsi, les pays tels que Le Soudan, l'Égypte, le Tchad peuvent facilement avoir plus de 2400 kWh/m²/an d'ensoleillement. Tandis que le Gabon, le Sud-ouest du Congo, peuvent se retrouver à 1800 kWh/m²/an d'ensoleillement.

Le gisement solaire, aussi appelé potentiel solaire, de l'Afrique dans son ensemble est colossal. Les réserves totales d'énergie solaire théoriquement disponibles sur le continent ont été estimées à près de 60 millions de TWh/an contre 37.5 millions de TWh/an pour l'Asie, Moyen-Orient hors Égypte inclus, et seulement 3 millions de TWh/an pour l'Europe.

L'Afrique aurait ainsi 40% du potentiel total mondial [17], alors que la superficie totale de l'Afrique constitue à peine 20% de la masse continentale de la terre [22]. L'irradiation solaire globale de l'Afrique est donc a priori très favorable à l'exploitation de l'énergie solaire.

Certaines régions du continent sont parmi les plus ensoleillées de la planète que ce soit en termes d'intensité du rayonnement solaire [23,25] ou de durée de l'insolation effective [26]. Le centre du Sahara oriental, la région la plus aride du globe [27] par exemple, à cheval entre la Libye, l'Égypte, le Soudan et le Tchad, constitue la partie de la terre où l'astre brille le plus souvent en moyenne avec près de 4300 h. an⁻¹ [28] de soleil ce qui représente 97 à 98 % de la période diurne totale, un record mondial [29]. L'intensité moyenne des radiations solaires y dépasse 220 kCal. cm⁻². an⁻¹ [30], là aussi un record planétaire.

Cet aperçu à l'échelle du continent ne doit pas masquer les disparités parfois impressionnantes à l'échelle régionale, nationale voire locale, quant à la distribution des ressources solaires à travers le continent. Ces inégalités se manifestent le plus fréquemment assez logiquement entre les différentes grandes zones climatiques. Le gisement solaire d'un lieu donné dépend en effet de plusieurs facteurs géographiques et climatiques comme l'altitude du lieu, la latitude du lieu (l'éloignement du lieu par rapport à l'équateur), la nébulosité du lieu (la fraction du ciel couverte par les nuages), la pluviométrie du lieu, etc.

Ainsi, les zones les plus favorisées du continent en matière de gisement solaire sont le nord de l'Afrique, le sud de l'Afrique, les plaines désertiques du nord de la Somalie, Djibouti [31] et l'Ouest malgache. Ce sont des régions sèches essentiellement hyperarides, arides ou semi-arides souvent situées au voisinage des tropiques où le ciel est le plus souvent clair et la luminosité continue. Elles font partie de la Global Sun Belt, la « ceinture solaire de la terre ». A contrario, les zones les moins favorisées du continent en la matière sont les zones côtières de l'Afrique de l'Ouest au bord du golfe de Guinée et leurs arrière-pays, le centre de l'Afrique et la côte orientale de l'Afrique le long de l'océan Indien. Ce sont des régions humides bien arrosées situées à proximité de l'équateur d'où un angle d'incidence du rayonnement solaire proche du maximum atteignable mais contrebalancé par un ciel le plus souvent couvert et une luminosité intermittente.

Ainsi, on peut donc dégager quelques tendances selon les pays :

- Les pays extrêmement favorisés : l'Égypte ; le Niger et la Namibie,
- Les pays très favorisés : l'Afrique du Sud ; le Mali et le Tchad,
- Les pays favorisés : le Sénégal ; le Zimbabwe et la Tanzanie,
- Les pays peu favorisés : la Côte d'Ivoire ; le Cameroun et la République démocratique du Congo,
- Les pays très peu favorisés : le Gabon ; la République du Congo et le Liberia.

À noter que la liste d'exemples dans chaque catégorie est notamment basée sur les conditions climatiques de ces pays et est évidemment non exhaustive. Précisons également qu'il existe souvent des contrastes à l'intérieur même de certains pays africains a fortiori si les pays en question sont traversés par différentes zones climatiques qui présentent des régimes de nébulosité et de pluviométrie bien distincts.

D'après les statistiques, les installations solaires totalisaient une capacité de production de 4.15 GWc (gigawatts crête) sur toute l'Afrique en 2017, dont plus de la moitié en Afrique du sud, selon le rapport 2018 de l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) [32]. En comparaison, la France totalise 8.5 GWc de solaire installés, qui ne fournissent pourtant que 2% de l'électricité du pays. Si les projets d'électricité verte se développent en Afrique du sud et dans les pays du Maghreb, l'Afrique subsaharienne reste en revanche le parent pauvre des énergies vertes, et notamment du solaire, selon un rapport de l'Institut Montaigne publié le 14 février 2019. Alors que la ressource solaire est disponible, la taille des projets adaptables, et leur compétitivité de plus en plus attractive face aux solutions

thermiques polluantes (fioul et charbon), le nombre de personnes n'ayant pas accès à l'électricité en Afrique subsaharienne devrait continuer à augmenter jusqu'en 2025, voire 2040 selon les estimations, alors qu'il a reculé de 34% dans le monde entre 2000 et 2016. Un marché se développe toutefois depuis plusieurs années via les « kits individuels », des lampes solaires ou de petits systèmes limités à un panneau et une batterie, avec paiement par le téléphone mobile. Les micro-réseaux électriques, adaptés aux zones rurales éloignées des grandes lignes électriques, se développent également. Mais les projets de taille intermédiaire qui permettraient d'alimenter des agglomérations sont souvent trop petits pour avoir accès aux financements adaptés aux contraintes et aux risques des pays africains [29].

Le secteur de l'énergie du Tchad, faiblement développé, est caractérisé par une forte consommation des combustibles ligneux (bois et charbon de bois) qui représentent plus de 90% de la consommation totale d'énergie du pays. L'utilisation excessive des combustibles ligneux par les ménages pèse lourdement sur les ressources ligneuses nationales car, ajoutée aux effets néfastes de la sécheresse et à la pratique de l'agriculture itinérante, elle constitue l'une des causes principales de la déforestation et de l'inexorable avancée du désert. Les énergies renouvelables, outre le solaire photovoltaïque qui ne connaît qu'un début balbutiant d'utilisation, ne sont pas exploitées malgré d'appréciables potentialités. Des études spécifiques, financées sur un don japonais octroyé par la banque Mondiale, ont été menées entre 2000 et 2002 dans le but de mettre sur pied un programme d'électrification rurale et périurbaine décentralisée (ERPD). Ce programme aurait permis de développer ces énergies mais, malheureusement, les études n'ont pas été finalisées faute du financement qui a été suspendu par la banque.

Cependant, le Tchad recèle d'appréciables potentialités énergétiques en termes d'énergie solaire, dont son exploitation est immature.

3. Objectifs et organisation de la thèse

Au fil des années, le problème de la disponibilité et l'approvisionnement des énergies et de l'eau ne font que s'accroître. Augmentation des besoins croissants du secteur industriel, démographie galopante, coût exorbitant et pollution sont autant de facteurs qui plaident pour l'utilisation des énergies renouvelables et en particulier de l'énergie solaire.

Avec le temps d'ensoleillement annuel parmi les plus hauts de la planète (environ 3000 heures par an), l'Afrique possède un potentiel exceptionnel et encore largement inexploité

pour être leader sur la production d'énergie solaire. Mais si le solaire reste une source d'énergie quasi inépuisable, il présente également un coût de production, donc un besoin de financement. Un autre enjeu crucial étant l'accès aux infrastructures et aux technologies nécessaires au développement de cette source d'énergie prometteuse.

Aujourd'hui, le continent dispose déjà de certains des plus grands parcs solaires au monde, notamment la centrale "Noor" au Maroc. Inaugurée en 2016, cette centrale est à l'image du virage amorcé par de nombreux pays africains. Ainsi, au Sénégal, Senergy 2 permet d'alimenter plus de 200 000 foyers. Nombreux sont les autres pays qui comptent des centrales photovoltaïques : Niger, Kenya, Zambie, Burkina Faso, etc.

De tels projets sont aussi le moyen de mettre au banc d'essai de nouvelles technologies, et sont des premiers pas avant un développement à plus grande échelle. Ils s'inscrivent en tout cas dans un désir d'indépendance énergétique qui ne peut-être que salué, tant il paraît indispensable, voire urgent. Le coût de production du solaire a indéniablement baissé, le rendant plus attractif pour de nombreux investisseurs publics et privés. Toutefois, l'énergie solaire présente un paradoxe : son stockage représente toujours un coût assez important. Un coût qui peut être un frein pour le développement des certains projets en Afrique. Ce qui n'empêche pas les acteurs concernés de multiplier les initiatives dans le domaine en faisant le choix de modèles de coopération public-privé le plus souvent réussis.

Parmi toutes les initiatives lancées en faveur du développement du solaire africain, on notera notamment celle de l'IAER (Initiative de l'Afrique sur les énergies renouvelables). Un projet qui vise au développement des énergies renouvelables sur l'ensemble du continent. Cette initiative vise à atteindre une capacité nouvelle et additionnelle de production à hauteur de 10 GW à l'horizon 2020. Un premier objectif très prometteur, pour une échéance relativement rapide, à l'image de bien d'autres projets qui devraient voir le jour sur la période 2019-2020.

Nombreux sont les chantiers en cours sur l'énergie solaire, parce qu'elle présente un coût de production de plus en plus attractif... mais aussi de meilleures garanties pour les acteurs publics et leurs sources de financement. Ainsi Benban, près d'Assouan en Égypte, va accueillir la plus grande centrale solaire au monde. Elle s'étendra sur 37 km², et devrait être opérationnelle courant 2019. Cette centrale viendra répondre à un besoin énergétique, mais aussi aux problématiques environnementales : elle devrait permettre de réduire de 2 millions de tonnes les émissions de CO₂, à l'échelle du pays.

En Côte d'Ivoire, le projet de la première centrale solaire flottante d'Afrique verra le jour. Ce projet s'inscrit dans l'optique de favoriser une production d'électricité plus durable. Malgré un taux d'accès à l'électricité important, la production ivoirienne reste fortement dépendante de l'énergie thermique et des cours mondiaux.

Un peu plus à l'est du continent, l'Éthiopie a annoncé un appel d'offres pour la création de six mégaprojets solaires nécessitant un investissement de 800 millions de dollars. Ces projets s'inscrivent dans les démarches prises par le gouvernement afin d'augmenter la capacité électrique nationale. La traduction d'une forte volonté politique, symbole d'une prise de conscience autour du potentiel de l'énergie solaire pour assurer l'indépendance énergétique. Investir dans le solaire est certainement la garantie d'un avenir énergétique plus rayonnant pour le continent, mais la tendance positive ne doit pas occulter les freins qui existent encore. D'abord, les pays africains sont entrés dans une phase d'urbanisation accélérée, or leur taux d'accès à l'électricité est le plus bas du monde : seulement 20% de la population africaine possède un accès électrique. Et les capacités de production actuelle ne peuvent pas répondre à la croissance rapide de la demande, que l'on observe partout. Au-delà de ces premiers constats, il y a l'état des réseaux électriques : des infrastructures incomplètes ou dépassées qui ne permettent pas d'assurer une alimentation constante. Les coupures sont très fréquentes dans certaines zones.

L'investissement dans de nouvelles sources d'énergie plus durables et plus éco-responsables est devenu un facteur clé dans le maintien du taux de croissance. Pour préparer son avenir énergétique et accélérer le développement du solaire, l'Afrique doit donc plus que jamais investir à fond sur ses infrastructures, et notamment ses réseaux électriques. Le devoir de tous les acteurs du secteur est de prendre part à ce chantier pharaonique, mais essentiel pour le développement socio-économique d'un continent aussi jeune et ambitieux.

Dans le cadre du Tchad, l'enjeu est de concilier la satisfaction en besoins d'énergie et le respect de l'environnement par l'utilisation de ces sources d'énergie propre en impliquant tous les acteurs. Les besoins de la population rurale par exemple n'ont jamais eu la chance d'être satisfaits par une connexion au réseau centralisé reste beaucoup plus couteuse. C'est alors que le recours à des petites sources décentralisées est nécessaire par les énergies renouvelables. Un autre aspect des énergies renouvelables est celui de la protection de l'environnement. L'exploitation des systèmes solaires ne polluant pas, sensibiliserait la population Tchadienne à faire preuve d'une écocitoyenneté par la consommation des produits

solaires. L'énergie solaire est une possibilité concrète presque partout dans le monde, chaque région ayant un potentiel plus ou moins grand de production d'énergie solaire. Il est important de connaître ces potentialités, les moyens de sa politique et promouvoir sa technologie. Aussi, faut-il voir son impact sur l'angle de "l'aménagement du territoire". Le solaire s'il est vulgarisé aiderait les populations rurales à résister au mirage de l'émigration vers les villes, jouant ainsi un rôle d'équilibrage démographique. Le pays vise également à promouvoir des sources alternatives d'énergie (énergie solaire et éolienne) en vue de limiter l'impact de la coupe de bois de chauffe sur la régénération des ressources forestières.

La caractérisation du rayonnement solaire présente un intérêt certain dans divers domaines, qui sont entre autres : l'agriculture, l'économie d'énergie dans les habitats et dans l'industrie, les prévisions météorologiques, l'environnement, la climatologie solaire et l'ingénierie solaire. Ainsi, une bonne connaissance spatio-temporelle du rayonnement solaire à la surface est impérative.

Les atlas actuels du rayonnement solaire sont élaborés à partir des mesures au sol. Ces mesures sont essentiellement effectuées par des pyranomètres (rayonnement global, ou rayonnement diffus en utilisant un écran pour éliminer le rayonnement direct), des pyréliomètres (rayonnement direct à incidence normale), des héliographes (durée d'insolation) et même par simple observation (nébulosité et visibilité). Du fait du nombre insuffisant de stations de mesures pyranométriques, les données de la durée d'insolation sont en général le plus souvent utilisées pour estimer le rayonnement solaire global. Cette estimation s'effectue grâce à des formules empiriques incluant la durée d'insolation. C'est le cas pour la plus part des pays en voie de développement.

Des pays comme le Tchad ont toujours utilisé ces données d'insolation facile à mesurer pour estimer le rayonnement solaire sur l'étendue de son territoire. Aujourd'hui, l'étude et l'exploitation de l'énergie solaire au Tchad reste encore à l'état embryonnaire à cause du manque en observation in-situ du rayonnement. Les quelques études menées pour évaluer le potentiel solaire sont issues de formules empiriques, de données satellitaires ou de modèles qui sont tous des outils pas très fiables. Ainsi, pour une meilleure connaissance du potentiel solaire au Tchad, il est nécessaire d'effectuer une caractérisation à des échelles spatio-temporelles différentes et variées de gisement solaire. Avec l'installation pour la première fois d'un pyranomètre au Tchad, une nouvelle opportunité s'ouvre pour mieux évaluer le potentiel d'énergie solaire dans ce pays.

Ainsi, cette thèse rentre dans le cadre avec comme objectif d'utiliser des outils adaptés tel que les mesures in-situ (la durée d'insolation et rayonnement global), le code de transfert radiatif STREAMER et les réanalyses atmosphériques, pour caractériser la durée d'insolation et évaluer le potentiel d'énergie solaire au Tchad. Le manuscrit est subdivisé en cinq (05) parties.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'énergie solaire. Il s'articulera sur les notions et de définitions du rayonnement solaire, ses composants, son bilan radiatif et ses applications.

Le second chapitre, quant à lui, présentera les données, les instruments de mesures.

Au chapitre trois, nous procédons à l'évaluation des variations à long terme de la durée d'ensoleillement et à estimer son interaction avec les paramètres météorologiques tels que la température, les précipitations et l'humidité relative entre 1950 et 2010 au Tchad.

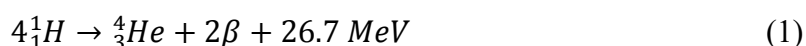
Le quatrième volet de cette thèse utilise les observations in-situ du pyranomètre et les sorties du modèle STREAMER pour évaluer le potentiel solaire à Ndjamena entre 2017 et 2018.

Enfin, le cinquième chapitre concerne l'utilisation des données de réanalyses ERA5 pour représenter le potentiel d'énergie solaire sur toute l'étendue du territoire en 2018.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'ENERGIE SOLAIRE

1. Origine et nature du rayonnement solaire

Le soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint 15 millions de degrés [34]. Compte tenu des températures et des pressions énormes qui y règnent, toute la matière se trouve à l'état gazeux ou sous forme de plasma. La couche externe du soleil, la photosphère, celle qui est visible de la terre, à une température considérablement plus faible qui décroît vers l'extérieur, jusqu'à environ 5 800°K. Les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le noyau du soleil transforment chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium selon l'équation suivante.



L'hydrogène qui représente 71% de la masse dans la photosphère n'est plus présent qu'à 34% dans la partie centrale du soleil, du fait de cette transformation permanente engagée. Il y a 4.5 milliards d'années. Et les 4 millions de tonnes manquantes volatilisées désintégrées dans de gigantesques explosions nucléaires, Le processus mis en jeu est bien compris depuis la célèbre relation d'Albert Einstein ($E = mc^2$) qui montre que toute disparition de masse (m) entraîne une production d'énergie égale au produit de cette masse par le carré de la vitesse de la lumière. La perte de masse du soleil par unité de temps vaut $4.28 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$; et l'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ $3.85 \cdot 10^{20} \text{ MW}$. Sur le plan énergétique un réacteur de centrale nucléaire produit typiquement 1000 MW. Le Soleil fournit donc une puissance équivalente à celle de $4 \cdot 10^{17}$ réacteurs nucléaires, un chiffre véritablement astronomique. Cependant, seule une petite partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil, environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ $1.9 \cdot 10^{11} \text{ MW}$). Le système terre atmosphère réfléchit environ 30% de l'énergie solaire interceptée et absorbe les 70% restants qui sont presque intégralement transformés en chaleur [34-36].

L'énergie émise par le soleil nous parvient sous forme de rayonnements électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière et dont l'ensemble forme le rayonnement solaire, qui constitue la seule source externe notable d'énergie pour l'atmosphère. La théorie corpusculaire de Max Planck prévoit que tout rayonnement de fréquence (ν) peut être considéré comme un flux de photons dont l'énergie élémentaire (E) est directement proportionnel à cette fréquence.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

Où

h : est la constante de Planck.

c : la vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

De ce fait, ce sont les rayonnements de courte longueur d'onde (ou de haute fréquence) qui sont les plus énergétiques; la plus grande partie de l'énergie solaire est cependant rayonnée dans les domaines ultraviolet, visible et proche infrarouge. 99.2% de l'énergie solaire hors atmosphère se trouve entre 200 nm et 4 μm . Au sol, par suite de l'absorption du rayonnement solaire par la vapeur d'eau, le spectre est limité à 2.5 μm environ [34, 35].

2. Constante solaire

La terre reçoit pratiquement toute son énergie du soleil, sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Son contenu total de chaleur ne change significativement pas avec le temps, indiquant en général un équilibre entre le rayonnement solaire absorbé et le flux de rayonnement diffus émis par la planète. À l'extérieur de l'atmosphère terrestre il n'y a pas de composante diffuse du rayonnement solaire mais seulement la composante directe. Pour une distance moyenne entre la terre et le soleil. L'irradiation émise par le soleil à la terre aboutit à une intensité presque fixe dite constante solaire qui est de 1360 W/m^2 (Monteith 1962) [35]. La constante solaire est l'énergie solaire reçue par unité de temps et par unité de surface d'une superficie perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement solaire. Les mesures faites avec une variété d'instruments ont donné la valeur 1353 W/m^2 estimée avec une erreur de $\pm 1.5\%$. La commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a adopté en octobre 1981 la valeur 1367 W/m^2 avec une incertitude de 1%. À présent la meilleure valeur disponible de la constante solaire est 1360 W/m^2 (Frochlich et 1981 Werhli) [35].

3. Rayonnement solaire du sommet de l'atmosphère au sol et ses composants

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées. L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à

un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2). L'ensoleillement varie de zéro, au lever du soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux et peuvent être concentrés par des miroirs. Ce rayonnement direct peut être mesuré par un pyrhéliomètre. Ce dernier est un appareil muni d'un mécanisme d'orientation qui permet de diriger constamment une thermopile en direction du soleil (suiveur solaire).
- Le rayonnement diffus est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, eau, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceau partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques. Le rayonnement diffus peut être mesuré par un pyranomètre avec l'aide d'un écran masquant le soleil c'est-à-dire le rayonnement direct.
- L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. La neige, par exemple, renvoie énormément de rayons lumineux alors qu'un asphalte n'en renvoie pratiquement pas. Les albédomètres conviennent pour mesurer le rayonnement global et/ou l'albédo sur un grand nombre de types de surfaces.

En résumé, le rayonnement global est tout simplement la somme des composantes directe et diffuse [36] comme le montre la figure 4 :

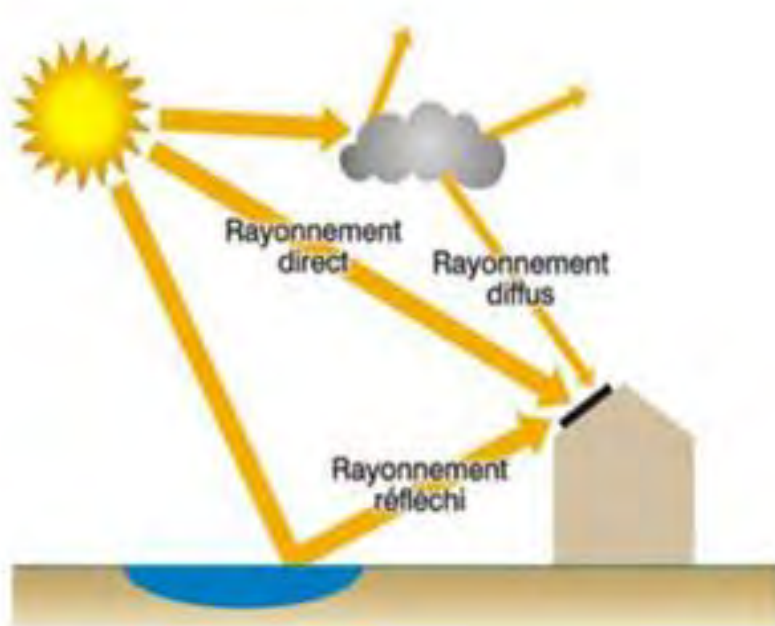


Figure 4: Les différentes composantes du rayonnement solaire [37].

Lors de sa progression dans l'atmosphère, un rayon solaire interagira avec les particules dans l'atmosphère. La taille de ces particules varie du dixième de nanomètre (molécules gazeuses) jusqu'à quelques centimètres (gouttes de pluie ou flocons de neige). Le rayonnement solaire subit alors des phénomènes de diffusion (réflexion, réfraction et diffraction), provoquant une redistribution du rayonnement dans différents sens, et d'absorption, principalement sous forme de bandes d'absorption localisées dans le spectre électromagnétique, dues à certains composants gazeux de l'atmosphère. Il s'ensuit que la distribution spectrale du rayonnement au niveau de la mer diffère de celle au sommet de l'atmosphère (cf. figure 5).

L'éclairement solaire global incident sur une surface orientée à la surface de la terre est la résultante de l'intégration d'une luminance solaire incidente dont la répartition angulaire est hétérogène : cet éclairement dit global est schématiquement décomposé en une somme de trois éclaircements issus de l'intégration de la luminance suivant une partition de trois domaines : l'éclairement direct provenant de l'angle solide du disque solaire (c.à.d. 0.27° de demi-angle d'ouverture) ; l'éclairement diffus provenant de l'angle solide du ciel vu par la surface ; l'éclairement réfléchi provenant de l'angle solide du sol vu par la surface, le cas échéant [38].

Les photons ne sont pas émis en même quantité par le soleil quelle que soit la longueur d'onde. Si l'on mesure l'énergie associée à chaque gamme de longueurs d'onde dans le rayonnement solaire, on observe que celle-ci est très faible pour des longueurs d'onde inférieures à $0.2\text{ }\mu\text{m}$ et pour des longueurs d'onde supérieures à $4\text{ }\mu\text{m}$, mais aussi qu'elle passe par un maximum autour de $0.5\text{ }\mu\text{m}$ correspondant au jaune (qui est bien la couleur dominante de l'astre solaire).

La figure 5 présente la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol en fonction de la longueur d'onde. Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du soleil et l'atmosphère de la terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons. Il est intéressant de remarquer que, sur le plan d'émission du rayonnement, le soleil se comporte de façon similaire à un corps noir à une température de presque de 6000°K .

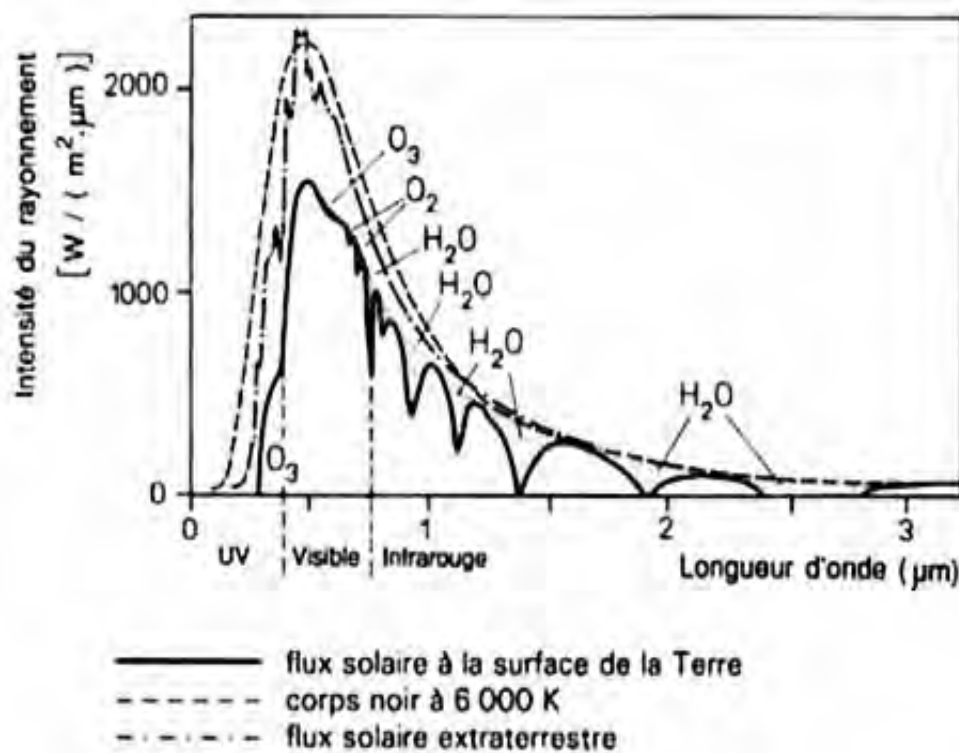


Figure 5: Spectre énergétique du rayonnement solaire [39].

Il est intéressant de remarquer que, sur le plan d'émission du rayonnement, le soleil se comporte de façon similaire à un corps noir à une température de presque de 6000°K . La terre et son atmosphère jouent un rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent

principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'ondes et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge [34, 35].

4. La durée insolation et la fraction d'insolation

La durée d'ensoleillement, ou durée de l'insolation effective, est un indicateur climatique qui mesure la durée temporelle pendant laquelle un endroit, un lieu est soumis à l'insolation effective, c'est-à-dire soumis à un rayonnement solaire suffisamment intense et puissant pour produire des ombres bien distinctes. Cet indicateur est directement lié à la nébulosité, la part du ciel couvert par les nuages, du lieu ou de l'endroit en question et ne doit pas être confondu avec l'ensoleillement qui exprime la quantité d'énergie reçue par le rayonnement solaire sur une surface donnée et sur une certaine période. La durée d'ensoleillement est généralement exprimée en une moyenne d'heures par an ou alors en une moyenne d'heures par jour [40].

La durée d'ensoleillement se mesure le plus souvent à l'aide d'un héliographe qui utilise une lentille optique en verre en forme de sphère. Ces appareils existent sous plusieurs modèles dont les plus célèbres sont l'héliographe de Jordan inventé en 1888 et celui de Campbell-Stokes inventé en 1853 puis modifié en 1879. Le premier est désuet alors que le second est considéré comme l'héliographe de référence car prôné et utilisé par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) depuis 1962 car plus performant [40].

En 2003, la définition de la durée d'ensoleillement a été précisée par l'OMM : elle correspond à la durée temporelle pendant laquelle l'irradiation solaire directe ou non-diffuse est d'une intensité strictement supérieure à 120 W/m^2 . Ainsi en-dessous de ce seuil, l'héliographe considère que le rayonnement solaire est d'une intensité insuffisante pour que l'insolation soit effective [40].

La figure 6 montre la variation de la durée d'ensoleillement d'une région du monde à l'autre selon des facteurs géographiques (la latitude, la longitude et l'altitude), des critères météorologiques (la nébulosité, les précipitations), des critères astronomiques (levers et couchers de soleil) et le passage d'objets en mouvements (avions ...).

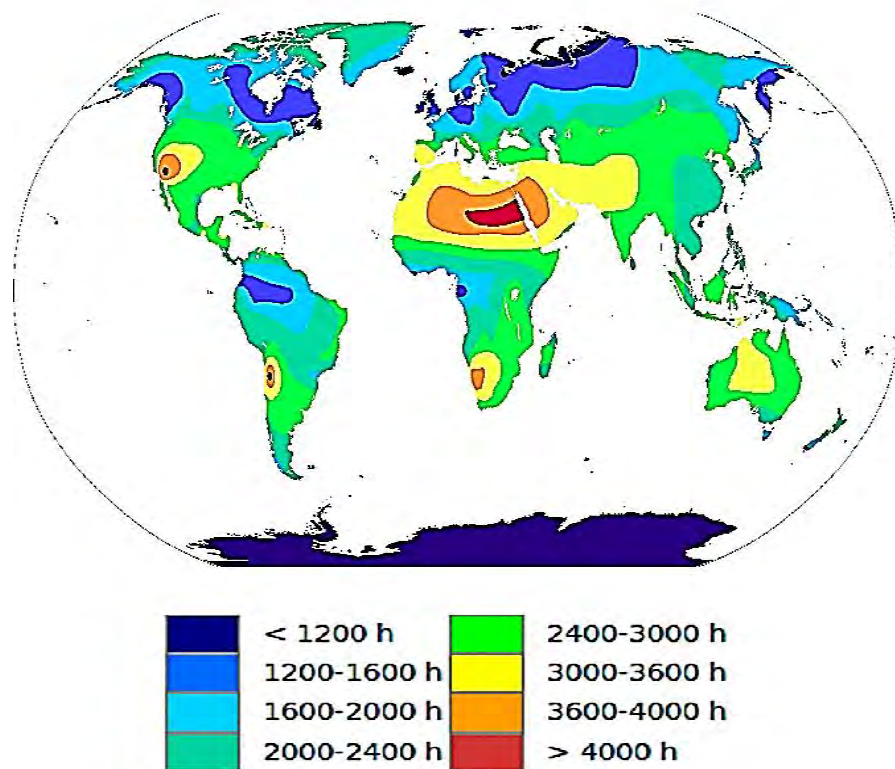


Figure 6: Moyenne annuelle de la durée d'ensoleillement mondiale [41].

Comme on le voit sur la carte d'ensoleillement (cf. Figure 6), la distribution géographique de la durée d'ensoleillement est très disparate avec des extrêmes minima et maxima. Ainsi la moyenne annuelle de la durée d'ensoleillement est par exemple approximativement de 1200 h par an à Ballycastle (Irlande du Nord), 1600 h par an à Libreville (Gabon), 2000 h à Melbourne (Australie), 2400 h à Addis-Abeba (Éthiopie), 2800 h à Marseille (France), 3200 h à Prétoria (Afrique du Sud), 3600 h à Phoenix (Arizona) et 4000 h à Adrar (Algérie) [41]. En simplifiant, la durée d'ensoleillement obéit plus ou moins strictement à une répartition géographique générale à tendance zonale, c'est-à-dire selon la latitude mais la distribution à fine échelle reste bien plus complexe [40].

Pour calculer la durée d'ensoleillement dans une station météorologique, on prend soin de minimiser ce dernier facteur. Cette durée correspond à la durée effective d'insolation reçue par l'héliographe entre 0h et 24h du même jour.

On dit qu'il y a insolation lorsque le disque solaire est bien visible sur le fond diffus du ciel, la durée d'insolation d'une journée est la durée pendant laquelle l'éclairement énergétique du

rayonnement solaire direct dépasse un seuil fixé par convention à 120 W.m^{-2} . En l'absence de nuage la durée d'insolation est pratiquement égale à la durée du jour ; les durées d'insolation mensuelle et annuelle sont un simple cumul des durées d'insolation des diverses journées. L'instrument de mesure de la durée d'insolation s'appelle l'héliographe. Soit (S) la durée d'insolation mesurée et (S_0) la durée du jour (le temps entre l'heure du coucher et l'heure du lever du soleil.), on définit la fraction d'insolation (σ) comme suit [35]

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (3)$$

Avec

$$S_0 = \frac{2}{15} * \cos^{-1}(-\tan(L) * \tan(\delta)) \quad (4)$$

5. Bilan radiatif terrestre

La figure 7 représente la complexité du bilan radiatif terrestre à l'équilibre. La surface du soleil est à une température d'environ 6000°K . Elle émet des radiations dans la gamme de longueur d'onde variant entre 0.2 et $4 \mu\text{m}$.

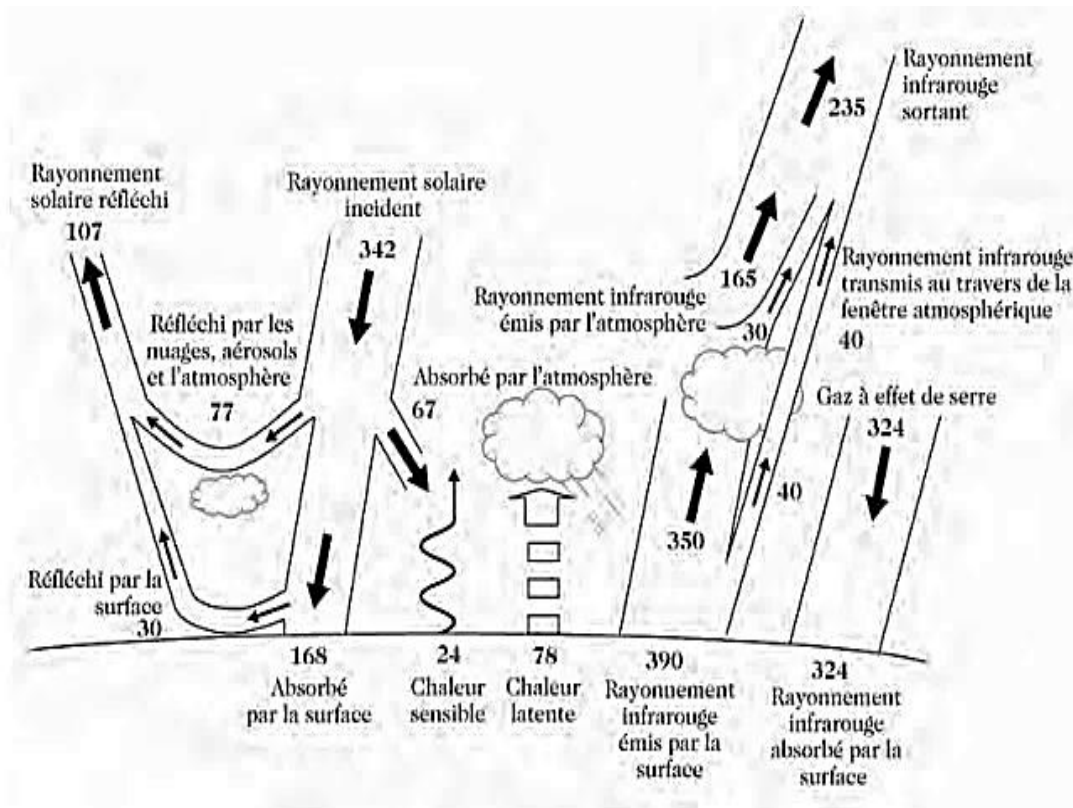


Figure 7: Bilan d'énergie dans l'atmosphère terrestre en W/m^2 [42].

Si l'on considère un modèle simple avec des sources et des puits d'énergie du système terre-océan-atmosphère qui doivent être en équilibre, la température obtenue à la surface de la terre serait trop faible ($-18\text{ }^{\circ}\text{C}$). En réalité vaut $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et cette grande différence est due à l'effet de serre (naturel) lié à l'absorption du rayonnement dans les grandes longueurs d'ondes, principalement par la vapeur d'eau.

Le soleil émet un rayonnement incident de 342 W/m^2 au sommet de l'atmosphère (Voir Figure 7). Environ 30% (107 W/m^2) de ce flux est réfléchi ou diffusé vers l'espace. La surface de la terre en réfléchit à peu près 30 W/m^2 et le reste (77 W/m^2) est dû en grande partie à l'effet des nuages, des gaz et aérosol. 70% du rayonnement incident est absorbé par l'atmosphère (67 W/m^2) et par la surface (168 W/m^2). La terre, dont la température superficielle est beaucoup plus basse, émet à son tour une irradiation tellurique de l'ordre de 390 W/m^2 ce qui permet au système terre/atmosphère d'atteindre son équilibre. La figure 7 décrit aussi comment les gaz à effet de serre empêchent une grande partie ce rayonnement tellurique de sortir de l'atmosphère ce qui est à l'origine du réchauffement climatique. Une bonne partie du rayonnement émis par le soleil est atténué par les aérosols, les nuages, les molécules, les gaz et la vapeur d'eau avant d'arriver à la surface de la terre. Selon le temps qu'il fait, les quantités de ces éléments varient dans l'atmosphère, ce qui fait fluctuer le rayonnement reçu à la surface.

6. Géométrie solaire

6.1. Azimut et hauteur solaire

Le repérage de la position du soleil dans le ciel nécessite la connaissance de deux angles qui sont la hauteur solaire (h) et l'azimut solaire (a) [43].

L'azimut solaire (a), c'est l'angle entre la direction sud et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud (Figure 8). La hauteur solaire (h), c'est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation (Figure 8). Le complément de (h) ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé l'angle zénithal. Le zénith est le point le plus élevé de l'hémisphère céleste, se trouvant directement à la verticale de l'observateur [43, 44].

En remarque, l'azimut solaire est négatif le matin (direction est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction ouest), sur tout le globe.

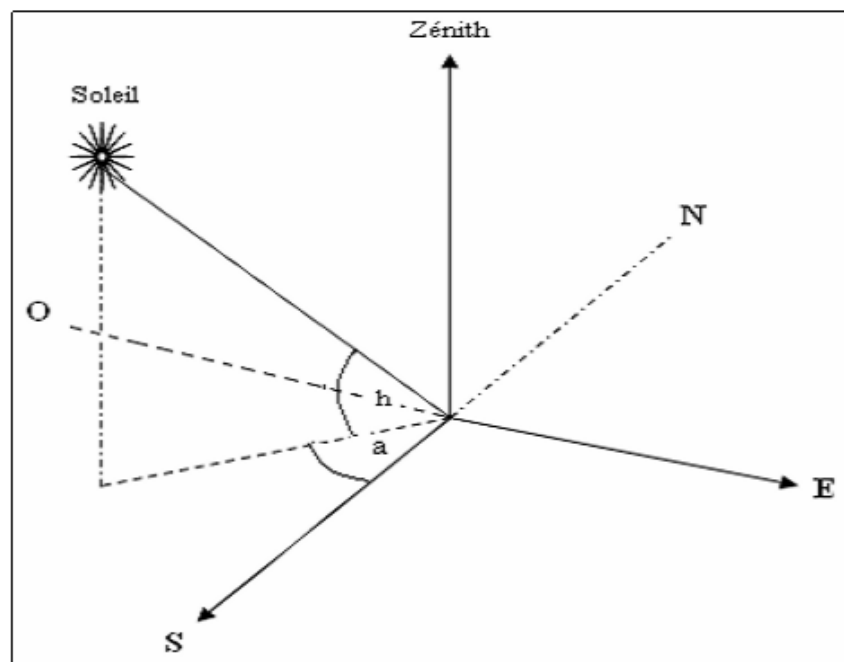


Figure 8: Repérage du soleil [45].

6.2. Coordonnées géographiques et solaires

➤ Coordonnées géographiques

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques que sont la longitude ϕ , la latitude θ et l'altitude Z indiquées par le schéma de la figure suivante :

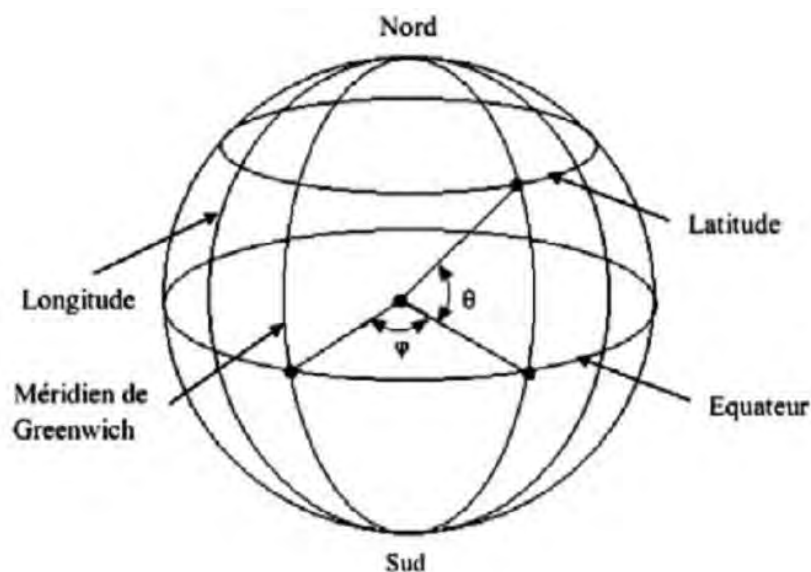


Figure 9: Coordonnées géographiques terrestres

➤ Coordonnées solaires

La terre tourne autour du soleil en formant une trajectoire « elliptique ». La distance terre-soleil ne varie que de $\pm 1.7\%$ par rapport à sa valeur moyenne qui est de $149675 \times 10^6 \text{ km}$. Cette distance est minimale au début du mois de janvier et maximale au début du mois de juillet comme l'indique la figure 10.

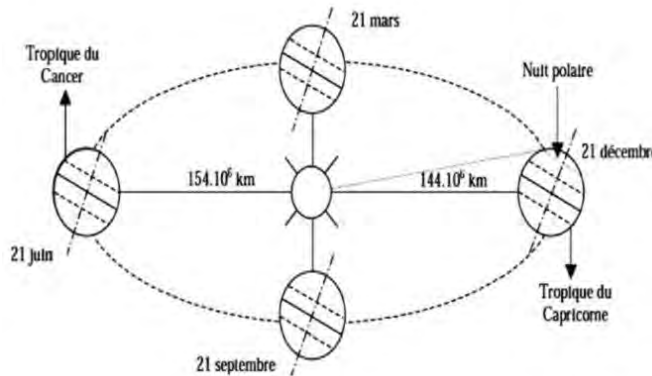


Figure 10: Mouvement de la terre autour du soleil

6.3. Déclinaison et angle horaire du soleil

La déclinaison est l'angle que fait le soleil au maximum de sa course (midi solaire) par rapport au plan équatorial. La déclinaison est nulle aux équinoxes et elle varie entre -23.45° le 21 décembre et $+23.45^\circ$ le 21 juin. Sa valeur en degrés, est donnée par l'équation de Cooper [34, 43, 44, 46].

$$\delta = 23.5 * \sin \left(360 * \frac{284+n}{365} \right) \quad (5)$$

Où n : est le jour de l'année (c.à.d. $n=1$ pour le 1^{er} janvier, $n=32$ pour le 1^{er} février, etc.). Cette expression estime la déclinaison avec une erreur maximale de (3') ; et pour plus d'exactitude on utilise un développement en série de Fourier qui donne la déclinaison en radian [44].

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \cdot \sin \Gamma - 0.006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0.000907 \cdot \sin 2\Gamma - 0.002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0.00148 \cdot \sin 3\Gamma) \quad (6)$$

Avec

$$\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365} \quad (7)$$

L'angle horaire du soleil qu'on note (w) est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course de l'est à ouest, par rapport au méridien local. La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure (un tour de 360° en 24 heures) [44, 45,46].

Remarque : Les équinoxes sont les deux dates de l'année où le soleil traverse le plan équatorial, sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales; l'équinoxe d'automne intervient vers le 21 septembre et l'équinoxe de printemps vers le 21 mars. Le solstice d'été (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître (maximum 16 h 8 mn). Le solstice d'hiver (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître (minimum 8h 12mn) (Figure 11).

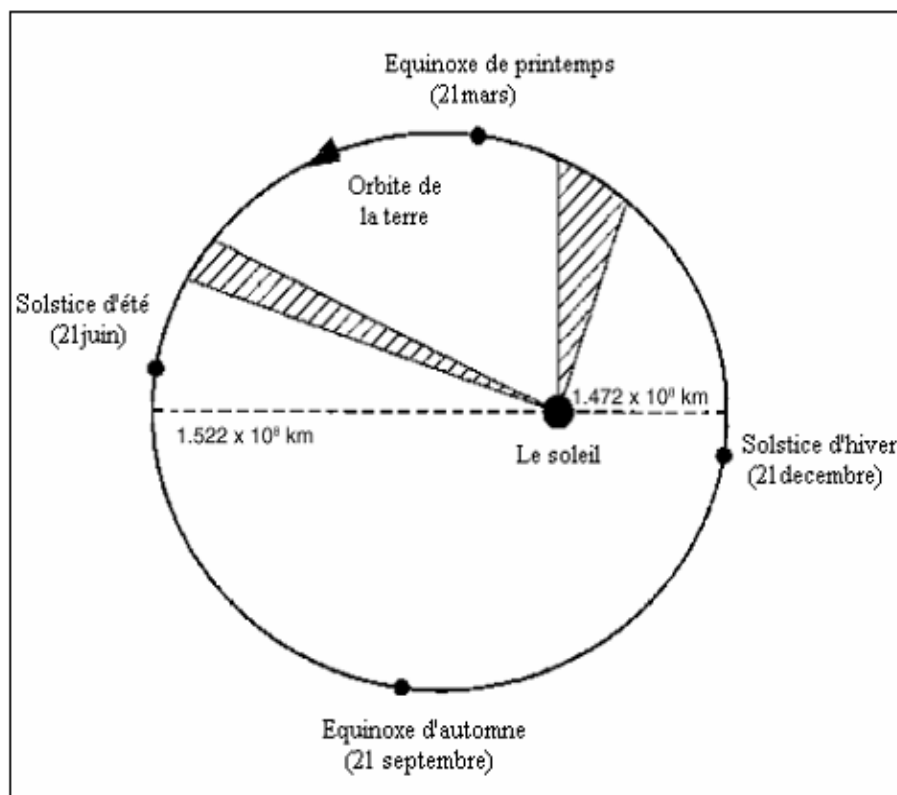


Figure 11 : Equinoxes et solstices [47]

6.4. Relations de repérage du soleil

La position du soleil peut être déterminée à l'aide de deux expressions, dans lesquelles interviennent la déclinaison, la latitude et l'angle horaire [46].

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w) \quad (8)$$

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(w)}{\cos(h)} \quad (9)$$

Tel que :

L : la latitude du lieu

δ : la déclinaison du soleil

w : l'angle horaire

h : la hauteur du soleil

a : l'azimut du soleil

6.5. La durée du jour et le temps

➤ La durée du jour

C'est l'intervalle de temps au cours duquel le soleil se trouve au-dessus de l'horizon, si on néglige le phénomène de la réfraction atmosphérique cette intervalle s'obtient à partir des heures de lever et du coucher du soleil [44,48]. La hauteur du soleil est nulle au coucher ($h=0$) donc.

$$\sin(h) = \sin(L) \cdot \sin(\delta) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(w_c) = 0 \quad (10)$$

Où

w_c : Angle horaire du soleil au coucher.

Donc

$$\cos(w_c) = -\tan(L) \cdot \tan(\delta) \quad (11)$$

Et l'heure solaire au coucher est donc.

$$TS_c = 12 + \frac{w_c}{15} \quad (12)$$

Pour le lever du soleil, on pose ($w_l = w_c$) et l'heure solaire au lever est :

$$TS_l = 12 + \frac{w_c}{15} \Rightarrow TS_l = 12 - \frac{w_c}{15} \quad (13)$$

La durée du jour (S_0) est l'intervalle de temps entre l'heure du coucher et l'heure du lever du soleil.

$$S_0 = TS_c - TS_l \quad (14)$$

Alors

$$S_0 = \frac{2}{15} w_c = -\frac{2}{15} * \cos^{-1}[tg(L).tg(\delta)] \quad (15)$$

Ce qui vient d'être dit pour la durée du jour reste vrai dans le cas où l'horizon à une hauteur nulle, dans les régions montagneuses (h) est l'angle sous lequel on voit l'horizon au lever du jour.

➤ Le temps

Le mouvement de la terre sur elle-même définit la notion de la journée solaire. Une rotation complète s'effectue en 24 heures et celle autour du soleil permet de définir les saisons et amène à distinguer le temps solaire vrai (TSV).

▪ Temps universel (TU)

Le temps légal ou local (Tl) est déduit en ajoutant au temps universel le décalage du fuseau horaire (DE) défini par rapport au méridien de Greenwich.

$$Tl = TU + DE \quad (16)$$

▪ Temps solaire moyen (TSM)

Il se déduit de l'équation (5.43) suivante et s'exprime en heure où ϕ est la longitude du lieu :

$$TSM = TU + \frac{\phi}{15} \quad (17)$$

▪ Temps solaire vrai (TSV)

Le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude de référence.

$$TSV = Tl - DE + \frac{(Et+4\phi)}{60} \quad (18)$$

▪ Équation du temps (Et)

Une bonne approximation du temps Et est donnée par l'équation (5.45) ci-dessous. C'est l'écart de temps entre le temps solaire local (TSL) et le temps solaire vrai (TSV). Le temps (Et) varie de -14.5 minutes entre le 10 et 15 février à $+16.5$ minutes entre le 25 mars au 30 octobre.

$$Et = 9.9 \sin[2(0.986 * J + 100)] - 7.7 \sin(0.986 * J - 2) \quad (19)$$

7. Applications de l'énergie solaire

Avec la raréfaction des énergies fossiles et aussi leur rôle prépondérant dans le réchauffement de la planète, les sources renouvelables constituent une alternative majeure pour notre planète. Une des ressources les plus réparties sur terre est sans doute le solaire. Ainsi, chaque jour la terre reçoit plus de 15 000 fois d'énergie que l'humanité n'en consomme [49]. 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.

Les principales technologies solaires exploitent deux formes d'énergie du soleil, soit en chaleur ou en lumière. Cela, de cinq façons différentes : le solaire thermique passif, le solaire thermique actif, le solaire thermodynamique, le solaire photovoltaïque et l'éclairage naturel. Ces technologies solaires doivent être étudiées et comparées aux autres sources d'énergie renouvelables (hydraulique, éolienne, biomasse et géothermie) afin de déterminer leurs meilleures applications.

Les technologies solaires les plus répandues s'observent majoritairement dans le domaine de l'immobilier : solaire thermique passif, solaire thermique actif, solaire thermodynamique, solaire photovoltaïque et éclairage naturel.

Bien que l'exploitation de l'énergie solaire s'intensifie depuis quelques années et que les technologies évoluent sans cesse, les principes et les phénomènes mis en cause sont très bien connus et font aujourd'hui l'objet de large consensus [50].

L'énergie solaire est la source de toutes les énergies sur terre à l'exception de l'énergie nucléaire, la géothermie et de l'énergie marémotrice. C'est elle qui est à l'origine du cycle de l'eau, des vents et de la photosynthèse. Pour ses besoins vitaux, l'homme utilise cette énergie

directement ou il la transforme en d'autres formes d'énergie telles que l'énergie alimentaire, l'énergie thermique, l'électricité ou la biomasse.

Il existe deux types d'énergie solaire passive et active :

L'énergie solaire passive : C'est une énergie disponible et non polluante. Elle est utilisée directement sous forme de chaleur ou pour l'éclairage lorsque la lumière du soleil pénètre à l'intérieure des maisons par les fenêtres et absorbée par les murs, planchées, meubles etc...

L'énergie solaire active : On l'utilise après la transformation de l'énergie solaire. Il existe trois options de l'énergie solaire active :

- L'énergie solaire thermique : En utilisant l'effet ondulatoire des photons, les capteurs solaires photo thermiques transforment le rayonnement solaire en chaleur. Ces applications sont le chauffe-eau solaire, le séchoir solaire, la cuisson solaire, etc.
- L'énergie solaire photovoltaïque : En utilisant l'effet corpusculaire des photons, la lumière du soleil excite les électrons des matériaux semi-conducteurs qui composent la cellule photovoltaïque tels que le silicium pour produire de l'électricité.
- L'énergie solaire thermodynamique (ou mécanique) : Elle concerne les appareils qui transforment un rayonnement (ou une chaleur) solaire directement en mouvement mécanique qui soit, pourra servir directement ou sera transformé en électricité.

CHAPITRE 2 : DONNEES ET METHODES

1. Présentation de la zone d'étude et des stations

La figure 12 représente notre zone d'étude le Tchad, avec ses sept stations de mesure de la durée d'insolation.

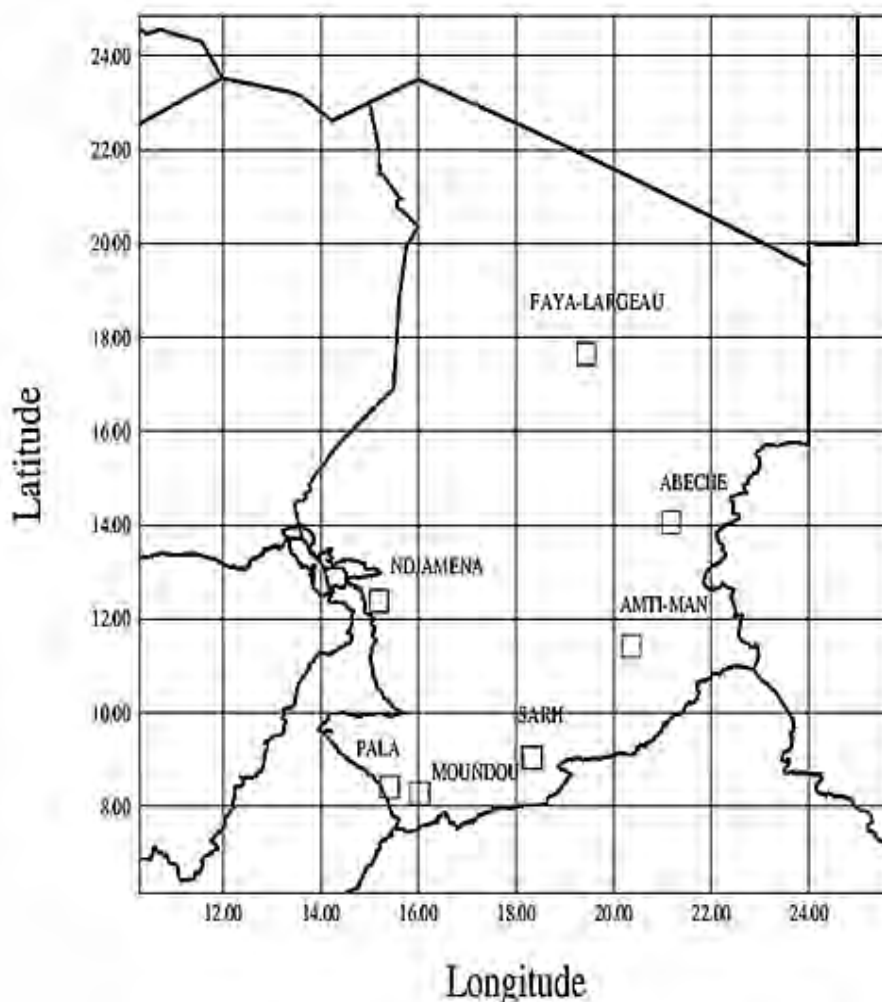


Figure 12: Cartes du Tchad avec les sept (07) stations de mesure (in-situ) de la durée d'insolation.

Les sept (07) stations de mesure de la durée d'insolation sont réparties en trois (03) zones, comme indiqué sur la figure 10. Au Nord, est constitué par les stations de Faya-Largeau ($19^{\circ}07'N$, $17^{\circ}55'E$, 233 m), au Centre, constitué par les trois stations d'Abéché ($20^{\circ}51'N$, $13^{\circ}51'N$, 545 m), N'Djamena ($15^{\circ}02'N$, $12^{\circ}08'N$, 294 m) et Amti-man ($20^{\circ}17'N$, $11^{\circ}02'E$, 435 m), au Sud, constitué par les stations de Moundou ($16^{\circ}04'N$, $8,37^{\circ}02'N$, 420 m), Sarh ($18^{\circ}22'N$, $9^{\circ}00'N$, 300 m) et Pala ($14^{\circ}55'N$, $9^{\circ}22'N$, 454 m).

En plus de sept (07) stations de mesure d'insolation, la station de N'Djamena dispose également d'un pyranomètre mesurant le rayonnement global depuis mars 2017.

2. Présentation des instruments et des données in-situ utilisés dans la thèse

Le rayonnement provenant du soleil est la principale source de l'énergie transmise à la terre. L'étude du rayonnement qui atteint la surface de la terre exige un certain nombre de mesures et notamment la mesure de la durée de l'insolation.

Le terme „insolation“ est associé à la luminosité du disque solaire par rapport au fond que constitue la lumière diffuse du ciel, ou encore, ce qui est plus facile à observer pour l'œil humain, à l'apparition d'ombres que projettent les objets illuminés. Dans cette acception, il se réfère plus au rayonnement visible qu'à l'énergie rayonnée dans d'autres longueurs d'onde, bien que les deux soient inséparables.

2.1. Mesure de la durée d'insolation

La mesure de la durée de l'insolation s'effectue à l'aide de l'héliographe. Cet appareil relativement simple permet de mesurer les totaux horaires ou journaliers de la durée de l'insolation avec une précision correspondant à la dixième partie d'une heure. En outre cet appareil peut permettre d'apprécier régionalement les sommes du rayonnement global pour une période déterminée. Il existe plusieurs types d'héliographes mais on utilise souvent les modèles tels que l'héliographe Marvin, l'héliographe Jordan, l'héliographe Foster, l'héliographe Campbell – Stokes. Ce type d'appareil a été adopté comme étalon de référence pour tous les types d'héliographes par l'OMM depuis 1962.

• Principe et description

Une sphère de verre focalise les rayons solaires sur une bande de carton coloré (diagramme), comportant les lignes horaires. Cette focalisation entraîne la brûlure ou la décoloration du carton au point où se forme l'image du soleil. Le diagramme est placé de manière appropriée sur un support métallique incurvé concentrique à la sphère. La durée de l'insolation est déterminée d'après la longueur totale des parties brûlées (carbonisées).

L'héliographe Campbell – Stokes comprend une sphère de verre d'un diamètre de 10 cm environ et un support inclinable portant une coupelle hémisphérique où trois séries de rainures permettent de fixer la bande du diagramme. La coupelle hémisphérique est fixée à une distance telle que le foyer optique de la sphère se trouve sur la bande diagramme. On engage dans les rainures trois bandes selon la saison de l'année. Pour obtenir des résultats comparables, il est indispensable que la sphère et la coupelle hémisphérique soient confectionnées avec une grande précision et que la base soit conçue de façon que la sphère

puisse être aisément placée avec précision au centre de la coupelle. La coupelle porte une ligne centrale, gravée transversalement sur la surface intérieure. Le bloc à glissière comporte un dispositif permettant de régler la coupelle hémisphérique selon la latitude de la station.

Pour faciliter le réglage d'horizontalité et d'orientation après que la base réglable ait été fixée sur la base fixe, le support en arc est monté sur le socle au moyen de vis et d'écrous de réglage. Les bandes d'enregistrement sont en carton de bonne qualité ne s'allongeant pas sensiblement sous l'effet de l'humidité. Elles ont une couleur bleu moyen, qui absorbe le rayonnement solaire. On utilise trois types de bandes selon les saisons de l'année. L'héliographe doit être installé sur un support de béton carré, bien horizontal dans lequel on le scelle à l'aide de boulons appropriés, en un endroit dégagé de tout obstacle qui pourrait intercepter les rayons solaires à un quelconque moment du jour ou de l'année.

• **Réglages et entretien de l'appareil**

Lors de l'installation de l'héliographe, il est nécessaire de procéder aux réglages suivants :

- a. La base doit être parfaitement horizontale (la trace de la brûlure coïncide avec la ligne centrale de la bande).
- b. Le support en arc de cercle doit être réglé de manière à ce que la ligne centrale de la bande d'équinoxe soit dans le plan de l'équateur céleste. L'échelle de latitude marquée sur le bloc à glissière facilite cette opération.
- c. Le plan vertical, passant par le centre de la sphère, et la marque de midi sur le support doivent être dans le plan du méridien géographique. La meilleure façon de vérifier si un héliographe remplit la condition consiste à observer la tâche faite sur la bande par le soleil de midi apparent local. Si l'instrument est correctement orienté, cette tâche doit tomber sur la ligne de 12 heures de la bande.
- d. Nivellement de l'instrument. Après fixation de l'héliographe sur son support, procéder aux opérations suivantes :
 - desserrer les écrous six (6) au-dessus de la base réglable (5) ;
 - placer un niveau d'eau sur la base réglable dans la direction Est-Ouest au cas où la base réglable n'est pas horizontale agir sur l'écrou (8)
 - placer ensuite le même niveau d'eau sur la base réglable mais dans la direction nord-sud. Si nécessaire régler l'horizontalité de l'héliographe en agissant uniquement sur les écrous (8), vérifier l'horizontalité dans la direction Est Ouest.

- e. Orientation : l'orientation de l'héliographe doit être faite quand le soleil brille et à midi vrai. Pour l'obtention procéder comme suit :
 - déterminer le midi vrai, c'est-à-dire l'instant où le soleil passe au méridien du lieu ;
 - glisser une bande (diagramme) dans la rainure correspondant à la saison jusqu'à ce que le trait du repère 12 coïncide avec le repère de midi vrai de l'héliographe ;
 - desserrer les écrous de fixation de la base réglable (6) ;
 - à midi vrai faire tourner doucement la base réglable de manière à ce que l'image du soleil apparaisse exactement sur le trait de repère de 12 heures. En principe, la base réglable peut tourner autour de son axe vertical par rapport à la base fixe ;
 - après l'orientation vérifier l'horizontalité de l'instrument et ensuite serrer les écrous de fixation de la base réglable.
- f. Réglage de la sphère :
 - Desserrer la vise de blocage du support (9) de manière à ce que celui-ci puisse se déplacer dans la glissière.
 - resserrer la vise de blocage du support de la sphère
 - le réglage de la concentricité de la sphère par rapport à la coupelle hémisphérique s'effectue en usine. Il ne faut donc jamais modifier ce réglage.

Si tous les réglages ont été effectués de manière satisfaisante, la trace de carbonisation doit être parallèle à la ligne centrale. Une trace symétrique qui n'est pas parallèle à la ligne centrale pendant les autres saisons, indique un déplacement du centre de la sphère dans le plan par l'équateur

L'héliographe n'exige aucune intervention particulière autre que celle qui consiste à changer quotidiennement les bandes. Avant de mettre en place une nouvelle bande, il est bon d'enlever la poussière qui a pu se glisser dans les rainures. Il faut aussi, suivant les besoins nettoyer la sphère de verre. On la nettoie avec une peau de chamois ou avec un tissu qui ne peut pas la rayer.

La figure 13 représente une image de l'héliographe mesurant la durée d'insolation utilisé sur les sept (07) stations tchadiennes.



Figure 13: Instrument de mesure de la durée d'insolation du service de la météorologie nationale de N'Djamena (DGNM, 2017).

Ceux de nos stations sont de types Campbell-Stokes, ils permettent de mesurer avec une résolution de six minutes la durée d'ensoleillement quotidienne. Le principe consiste à focaliser les rayons solaires (grâce à la sphère en verre centrale) sur le diagramme sans que ce dernier ne s'enflamme. Une règle transparente permet ensuite d'apprécier la longueur de la trace de brûlure avec une résolution permettant de mesurer la durée d'insolation à 6 minutes près.

2.2. Mesure du rayonnement : Le pyranomètre

L'instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire parvenant sur une surface plane à partir d'un angle solide de deux (2) stéradians et dans le domaine spectral 0,3 à 3,0 μm est le pyranomètre. On s'en sert aussi quelque fois pour la mesure du rayonnement solaire global sur des surfaces inclinées, ou en position inversée pour la mesure du rayonnement solaire réfléchi. Un pyranomètre est un capteur de flux thermique utilisé pour la mesure de la quantité d'énergie solaire en lumière naturelle et est notamment utilisé en météorologie. Il permet la mesure de la puissance du rayonnement solaire total en watts par mètre carré. Il est sensible dans un domaine spectral de 300 à 2500 nanomètres [51] selon le filtre utilisé.

Les Pyranomètres ont habituellement comme récepteurs des éléments thermo électriques, photoélectriques ou bimétalliques. Exposés en permanence par tous les temps, ils doivent être robustes et capable de résister aux effets corrosifs de l'air humide (surtout à proximité de la mer). Le récepteur doit être hermétiquement scellé dans une monture et celle-ci doit être facilement démontable de manière que l'on puisse éliminer les condensations éventuelles. Lorsque le récepteur n'est pas scellé en permanence dans son enveloppe protectrice on place généralement une cartouche déshydratante dans la partie inférieure de l'instrument. Les caractéristiques à prendre en considération pour évaluer l'exactitude et la qualité des mesures fournies par un pyranomètre sont les suivantes :

- la sensibilité de l'instrument ;
- sa stabilité ;
- son temps de réponse ;
- ses réponses en cosinus et en azimut ;
- la linéarité de ses lectures ;
- sa réponse en température et sa réponse spectrale.

L'emplacement choisi pour installer un pyranomètre devrait être entièrement dégagé, libre de toute obstruction au-dessus du plan horizontal de l'élément sensible et, en même temps d'un accès aisé. S'il est impossible de trouver un terrain remplissant toutes ces conditions, il faut au moins qu'il n'y ait sur le site ou dans son voisinage aucun obstacle qui risquerait d'y projeter une ombre à une époque quelconque de l'année. Le pyranomètre ne devrait être placé ni à proximité d'un mur ou d'autres objets clairs pouvant réfléchir les rayons du soleil, ni dans le champ d'une source artificielle de rayonnement. Dans la plupart des stations, un toit plat constitue un bon emplacement pour l'installation du pyranomètre ; à défaut, il convient de poser l'instrument sur un socle exigé assez loin des bâtiments et autres obstacles. Dans la mesure du possible, il faudrait choisir le site de manière qu'il ne comporte aucun obstacle dont la hauteur soit supérieure à 5° , en particulier dans la gamme des azimuts comprise entre le lever et le coucher du soleil, et que les autres obstacles ne réduisent pas de plus de 0,5 stéradian l'angle solaire total.

Nous avons aussi utilisé dans cette thèse les données de rayonnement global de la station météo de type Vantage Pro2 Plus (cf. figure 15) qui comporte un pyranomètre (cf. figure 15.3C), un pluviomètre (cf. figure 15.2B), un anémomètre-girouette (cf. figure 15.1B), un thermomètre/hygromètre (cf. figure 15.6C). Cette station a été installée en mars 2017 au

centre national de recherche et de développement à N'Djamena. Deux années (2017 et 2018) de mesures quotidiennes ont été fournies pour bien mener ces travaux. Cette station est un modèle professionnel permettant de mesurer des données météorologiques tel que la température, la pluviométrie, l'humidité, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, la direction du vent et le rayonnement global courte longueur d'onde que nous avons utilisé dans cette thèse. Ce système est constitué des trois (03) parties suivantes :

- Un ensemble de capteurs extérieurs «ISS» comporte initialement cinq (05) capteurs (de température, d'humidité, de vent, de pression, de pluie et de rayonnement solaire) et est alimenté de façon autonome par une batterie d'accumulateurs, elle-même rechargée par un panneau solaire et transmettant les informations acquises avec une technologie «Sans fil». En plus des capteurs listés par la suite, il y a possibilité de rajouter un capteur pour la mesure d'ultraviolet (UV) et un autre pour la mesure du rayonnement solaire. La transmission des informations à la console (datalogger cf. figure 12.7D) s'effectue toutes les 2.5 secondes au moyen d'une onde radio dont la fréquence porteuse est fixée à 868 MHz. La modulation des données s'effectue grâce à la technologie FHSS (saut de fréquences utilisé par la norme WIFI).
- Une console d'affichage recevant, grâce à une technologie «Sans fil», les informations du module extérieur et possédant ses propres capteurs pour acquérir les données intérieures.
- Un système d'acquisition de données permettant un traitement de statistiques, le tracé de courbes et la génération d'historiques sur un ordinateur.



Figure 14: Pyranomètre de la station météo Vantage Pro2 [51].

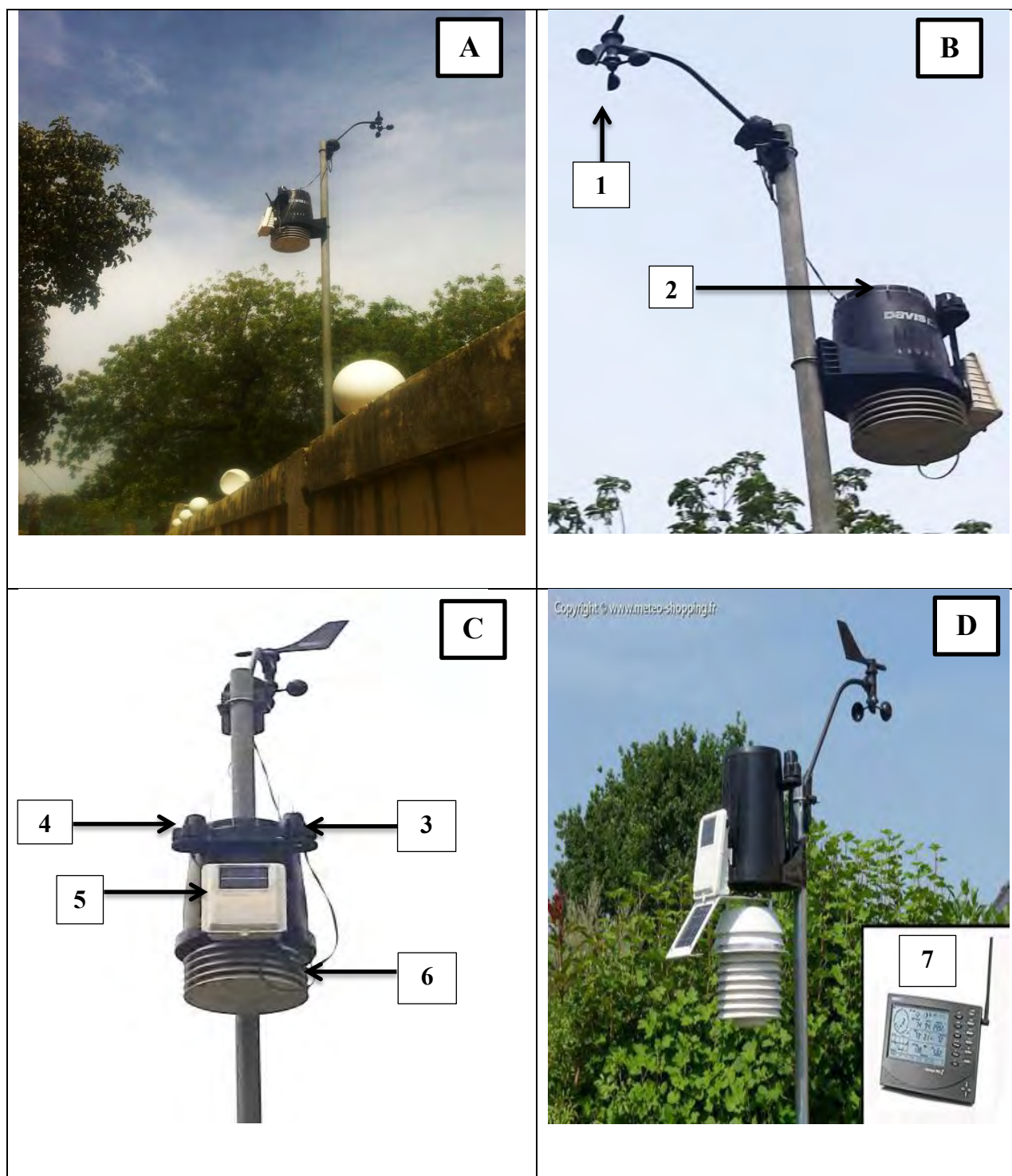


Figure 15: Station Vantage Pro2 Plus de mesures des paramètres météorologiques et du rayonnement solaire du CNRD de N'Djamena [51].

Il (figure 14) permet de mesurer le rayonnement solaire dans le spectre visible (400 à 1100 nm) et délivre une mesure de la puissance allant de 0 à 1800 W/m². La puissance solaire est utilisée dans le calcul de l'évapotranspiration, l'index de chaleur, le calcul de la durée d'ensoleillement journalier et l'évaluation du rendement des panneaux solaires. Un niveau à bulle est situé sur le côté du capteur pour un positionnement précis.

Il est également utilisé pour calculer la durée d'ensoleillement. L'élément sensible a été conçu afin d'obtenir une réaction précise avec compensation du cosinus. La diode photosensible en silicium fournit une bonne mesure du spectre solaire. Le capot de deux pièces réduit au minimum l'élévation de la température rayonnée par convection et empêche le piégeage des poussières et de l'eau. Inclut un câble de 0,6 m. Un niveau à bulle permet le positionnement parfait du capteur à l'horizontal. Un support pour capteurs de rayonnement permet le montage du capteur à côté du pluviomètre

Les stations météo Vantage Pro sont de très bonnes qualités, polyvalentes et évolutives. Elles répondent à tous vos besoins courants de mesures météorologiques, que vous soyez un professionnel ou un particulier en quête d'équipement de qualité. Le choix d'une bonne station météo passe par l'étude attentive des caractéristiques de chacune d'elles. Les principaux critères à retenir sont la précision des capteurs, l'intervalle de la prise des mesures, la consultation des données sur l'écran d'une console, les possibilités d'ouverture vers l'informatique à des fins d'analyse, de publication automatique sur Internet et pour terminer, les contraintes d'installation. Toutes nos stations Vantage Pro2 mesurent les paramètres à des intervalles variables en fonction du type de mesure.

Ce dispositif fonctionne 24h/24h. Un panneau solaire alimente le moteur du ventilateur dans la journée et recharge les batteries. La portée radio en espace libre est de 300 m. Elle comprend un enregistreur de données (datalogger) et un logiciel d'exploitation « WeatherLink ». L'enregistreur de données fonctionne en mode connecté à un ordinateur, il est possible de consulter en temps réel les données climatiques ou en mode non connecté, l'enregistreur collectera les données à un intervalle de 1, 5, 10, 15, 30, 60 ou 120 minutes. Une fois reconnecté à l'ordinateur vous pouvez transférer les données. Les enregistreurs de données sont disponibles en plusieurs versions : port USB pour PC et Macintosh, pour port série (RS-232) ou avec une connectique RJ-45 pour les liaisons Ethernet/IP. Pour que la station météorologique soit autonome, son alimentation en énergie est assurée par un panneau solaire photovoltaïque (cf. figure 15.5C) et elle est secourue par une pile au lithium.

L'informatique est le complément indispensable de votre station météo. Le stockage des données est assuré de plusieurs manières. Les consoles conservent l'historique des mesures durant plusieurs années, néanmoins pour un stockage plus fin, nous vous conseillons d'ajouter un enregistreur de données « Datalogger » et de transférer les données régulièrement dans un ordinateur PC ou Macintosh. L'autonomie des Datalogger Davis

Instruments est variable en fonction du pas d'enregistrement qui est paramétré par l'utilisateur. L'intervalle de mesure peut être de 1, 5, 10, 15, 30, 60 ou 120 minutes donnant une autonomie respective de 42 Heures, 8, 17, 26, 53, 106, ou 213 jours. Tous les modèles de datalogger sont fournis avec le logiciel WeatherLink. Le logiciel WeatherLink fonctionne sous Windows XP, Windows 7 et Windows 8. Une version pour Macintosh OS X est aussi disponible.

Tableau 1 : Eléments constituant les stations Vantage Pro2/Pro2 Plus

Ensemble capteurs	Références					
	6152CFR	6162CFR	6152FR	6153FR	6162FR	6163FR
Liaison par câble	☑	☑				
Liaison radio 868 MHz			☑	☑	☑	☑
Distance	Livree avec 30 m de câble, 300 m Max	Livree avec 30 m de câble, 300 m Max	300 m en champ libre et + avec répéteur	300 m en champ libre et + avec répéteur	300 m en champ libre et + avec répéteur	300 m en champ libre et + avec répéteur
Version Pro Plus (capteurs UV et solaire)		☑			☑	☑
Abri à convection naturelle pour capteurs de température et d'hygrométrie	☑	☑	☑		☑	
Abri à ventilation forcée au moyen d'une hélice pour capteurs de température et d'hygrométrie.				☑		☑
Anémomètre	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Girouette	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Pluviomètre	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Thermomètre	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Hygromètre	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Console						
Console câblée	☑	☑				
Console radio			☑	☑	☑	☑
Afficheur à cristaux liquide	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Température intérieure	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Humidité intérieure	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Pression barométrique	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Mode répéteur			☑	☑	☑	☑
Logiciel interne de la console en Français	☑	☑	☑	☑	☑	☑

Tableau 2 : Caractéristiques techniques des capteurs

	FONCTION	Standard	Capteur nécessaire	Résolution	Plage	Précision +-
Pression barométrique	Pression barométrique (Élévation : -300 à +4570 m)	✓	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	0.1 hPa, mm Hg	540 à 1100 hPa, 410 à 820 mm Hg	1.0 hPa, 0.8 mm Hg
	Tendance barométrique (3 heures)	✓		Changement >= 2hPa, 1.5 mm Hg = rapide; >= 0,7 hPa, 0.5 mm Hg = lent	5 positions de la flèche : Montée (rapide ou lente), constante, ou descente (rapide ou lente)	
ET	Évapotranspiration		Radiation solaire, thermo/hygromètre, ou ISS	0.1 mm	0 à 1999,9 mm	5 %
Humidité & point de rosée	Humidité intérieure	✓	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	1 %	1 à 100 %	3 % RH
	Humidité extérieure	✓	Capteur température/humidité ou ISS	1 %	1 à 100 %	3 % RH
	Point de rosée intérieur	✓	Température/humidité console	0,1°C	-50° à +60°C	1.5°C
	Point de rosée extérieur	✓	Température/humidité ISS	1°C	-76° à +54°C	1.5°C
	Extra humidité		Température/humidité	1%	0 à 100 %	3% RH
Humectation	Humectation		Humectomètre	1	0 à 15	0.5
Précipitation	Précipitation	✓	Pluviomètre	0.2 mm	0 à 6553 mm	4 %
	Précipitation d'orage	✓	Pluviomètre	0.2 mm	0 à 6553 mm	4 %
	débit de la pluie	✓	Pluviomètre	0,1 mm/hr	0 à 2540 mm/h	5 % < 127 mm/hr
Humidité du sol	Humidité du sol		Humidité de sol	1 cb	0 to 200 cb	
Rayonnement solaire	Puissance / énergie solaire		Pyranomètre	1 W/m2	0 à 1800 W/m2	5 %
Température	Température intérieure	✓	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	0,1°C	0°C à 60°C	0,5°C
	Température extérieure	✓	Capteur de température, sonde de température, capteur thermo/hygromètre, ou ISS	0,1°C	-40°C à + 65°C	0.5°C
	Température extra		Capteur ou sonde de température	1°C	-40° à +65°C	0.5°C
Température apparente	Index de chaleur	✓	Capteur Thermo/hygromètre ISS (extérieur)	1°C	-40° à +74°C	1.5°C
	Index temp - humidité - soleil - vent		Capteur de radiation solaire, anémomètre & thermo/hygromètre ou ISS	1°C	-68° à +74°C	2°C
Heure et date	Heure	✓	Inclut dans les consoles n°6312 ou 6316	1 min	12/24 heures	8 sec./mo.
	Date	✓		Jour/mois	année	8 sec./mo.
Radiation UV	Index UV		Capteur rayonnement UV	0.1 index	0 à 16 index	5 %
	Dose UV		Capteur rayonnement UV	0.1 MEDs	0 à 199 MEDs	5 %
Vent	Direction du vent	✓	Girouette	1°	0° à 360°	3°
	Rose des vents	✓	Girouette	22.5°	division en 16 points	
	Vitesse du vent (grandes coupelles)	✓	Anémomètre	0.1 m/s-1 km/h	1 à 80 m/s, 1 à 320 km/h	5 %
	Parcours du vent	✓	Anémomètre	0.01 km	sans limite	5%

Les données in situ utilisées dans cette thèse sont issues des instruments mentionnés précédemment. Il s'agit de la durée d'ensoleillement et de rayonnement global. Outre ces données, nous avons aussi utilisé les données de précipitation, d'humidité, de température (moyenne, maximale et minimale). Pour chacune des sept (07) stations au sol (voir figure 11), les mesures journalières d'insolation (au lever et au coucher du soleil) sont mesurées à l'aide d'un héliographe de Campbell-Stokes, les autres paramètres étant mesurés par une station météorologique classique. Les données de la durée d'insolation, d'humidité, de température et de précipitation sont fournies par la station météo nationale (DGMN) et celles du rayonnement global par le centre national de recherche et développement (CNRD). L'utilité de ce système est que toutes les stations referment une série temporelle mensuelle de bonne qualité sur la période considérée.

3. Présentation du code de transfert radiatif STREAMER

Le code STREAMER développé par Key et Schweiger (1998) [52] est un modèle simple et rapide qui permet de simuler le rayonnement arrivant à la surface et aussi d'effectuer le bilan à la surface. Dans ce modèle, les termes du bilan radiatif sont traités séparément à des bandes spectrales différentes. Il s'agit du rayonnement solaire incident calculé à des longueurs d'ondes allant de 0.4 à 0.8 μm contenues dans le spectre du visible et du rayonnement infrarouge tellurique compris entre 0.8 et 500 μm . En effet, le code STREAMER calcule les luminances et les flux en découpant l'atmosphère en plusieurs couches sur toutes les directions. Ces quantités sont calculées sur des bandes étroites et sur tout le spectre solaire puis pour 25 niveaux de l'atmosphère répartis entre la surface et le sommet de l'atmosphère. Ce code utilise six (06) modèles d'aérosols prédéfinis sous les termes d'aérosol troposphérique, maritime, rural, brume arctique (arctic haze), de combustion (smoke) et urbain pour simuler le rayonnement à la surface. Ces modèles ont été créés à l'aide d'un code de Mie qui permet de générer les paramètres optiques de la particule. Ainsi, chaque modèle d'aérosols prédéfini dans le code Streamer contient les coefficients d'extinction, d'absorption et d'asymétrie de la particule considérée dans tout le spectre solaire. Par ailleurs, l'absorption des principaux gaz (H_2O , O_3 , CO_2 , O_2) dans le spectre visible est incluse mais, elle peut être omise dans les calculs. La surface peut être considérée comme une surface lambertienne avec une réflexion isotrope ou non via sa fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle [53].

4. Présentation des données MODIS

Les données atmosphériques (épaisseur optique de l'aérosol à 550 nm et eau précipitable) qui servent d'entrée au modèle Streamer et d'outils d'inter-comparaison sont dérivées du capteur MODIS depuis l'espace. MODIS est un capteur transporté par les satellites TERRA depuis décembre 1999 et Aqua en avril 2002. TERRA balaye la surface de la terre du nord au sud autour de l'équateur le matin vers 10h30 tandis qu'Aqua se produit le soir vers 10 heures: 30 heures sur une orbite orientée sud-nord de l'équateur [54]. MODIS possède 36 bandes spectrales qui lui permettent de fournir des mesures sur l'atmosphère, la terre et l'océan, dont 7 sont utilisées pour étudier les aérosols (466, 553, 644, 855, 1243, 1632 et 2119 nm). En outre, il utilise différents algorithmes pour inverser les propriétés des aérosols sur la terre [55]

et sur les mers [56], où les mesures sont effectuées avec une résolution spatiale allant de 1 à 250 km et une résolution temporelle de 1 à 2 jours. Pour notre étude, nous utilisons les inversions MODIS-Terra et MODIS-Aqua Deep-Blue à 550 nm et disponibles sur le site Giovanni de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). En effet, l'algorithme Deep Blue prend en compte les masques de nuages, le modèle aérosol et la réflexion de surfaces brillantes [54, 57]. Cela permet d'éliminer les contaminations dues au reflet des surfaces brillantes et d'améliorer les observations qualifiées au niveau 2 dans des zones comme le désert du Sahara, les régions arides, semi-arides et urbaines où la réflectivité est très importante [58].

5. Présentation des données de réanalyse ERA5

Après de nombreuses années de recherche et beaucoup de préparation technique, la production du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT/ECMWF), une nouvelle analyse pour remplacer ERA-Interim a commencé. ERA5 [59] sera la cinquième génération des réanalyses atmosphériques du CEPMMT du climat mondial, qui a commencé avec les réanalyses FGGE produites dans les Années 1980, suivies d'ERA-15, ERA-40 et plus récemment, ERA-Interim.

ERA5 est la dernière analyse climatique réalisée par le CEPMMT. Elle fournit des données horaires sur de nombreux paramètres de l'atmosphère, de la surface des terres et de la mer, ainsi que des estimations de l'incertitude.

Les données ERA5 sont disponibles sur des grilles de latitude-longitude régulières à une résolution de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, avec des paramètres atmosphériques sur 37 niveaux de pression.

La réanalyse ERA5 sera achevée d'ici à fin 2019, date à laquelle l'ensemble de données couvrira la période de 1950 à aujourd'hui. La réanalyse continuera d'être étendue dans le temps, avec des mises à jour mensuelles du jeu de données ERA5 publiées dans un délai de trois mois à compter du temps réel.

Les réanalyses fournissent une analyse numérique description du climat récent par combiner des modèles avec des observations. Ils ont été précieux pour de nombreux utilisateurs dans les États membres et dans le monde et ont toujours été proches associées à l'excellence des produits de prévision du centre. La réanalyse est maintenant une contribution clé du

CEPMMT à la mise en œuvre du programme financé par l'union européen (UE) service copernicus sur le changement climatique. Les champs d'analyse horaire seront disponibles à une résolution horizontale de 31 km sur 139 niveaux, de la surface jusqu'à 0.01 hPa (environ 80 km).

Tous les produits de données ERA5 comprendront informations sur les incertitudes, qui sera fourni pour chaque paramètre à intervalles de 3 heures et à l'horizontale résolution de 62 km. Beaucoup de nouveaux paramètres tels que le vent à 100 mètres, la vitesse et la direction, sera disponible dans le cadre de la sortie. Une base de données contenant toutes les observations ingérées, ainsi que des informations détaillées sur comment ils sont utilisés, seront disponibles et accessible aux utilisateurs. Dans le cadre de cette thèse nous utilisons les données de rayonnement global sur le Tchad en 2017 et 2018. Ce sont des données toutes les 3h avec une résolution de 25 km.

6. Méthode de calcul du potentiel d'énergie solaire

➤ Estimation du rayonnement solaire sur un plan horizontal

Le rayonnement solaire disponible sur un plan horizontale est donné par l'équation ci-dessous [60, 61].

$$I = 1370. e^{\left(-\frac{TL}{(0.9+9.4.\sin(h))}\right)} \quad (20)$$

TL désigne le facteur de trouble de Link qui peut être calculé par la relation (21) et h la hauteur du soleil.

$$TL = 2.4 + 14.6\beta + 0.4 (1 + 2\beta) \ln (P_V) \quad (21)$$

β est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend les valeurs suivantes selon les lieux :

$\beta = 0.05$ en zone rurale ; $\beta = 0.1$ en zone urbaine ; $\beta = 0.2$ en zone industrielle et polluée.

P_V est la pression partielle de vapeur d'eau, exprimée en *mmHg* et donnée par l'expression (22) suivante :

$$P_V = \frac{760}{101325} (P_{at} - P_{sec}) = 0.0075(P_{at} - P_{sec}) \quad (22)$$

Dans cette expression P_{at} désigne la pression atmosphérique en Pascal et P_{sec} la pression de l'air sec qui équivaut à $P_{sec} = 1.01222 \cdot 10^5 Pa$. Par ailleurs, le facteur de trouble de Link peut être déduit par une fonction simple dépendant du coefficient de trouble atmosphérique et de la tension de vapeur (t) au sol [62] :

$$TL = 1.6 + 16\beta + 0.5 \ln(t) \quad (23)$$

Rappelons que la hauteur d'eau condensable W exprimée en cm ou g/cm^2 est reliée à la tension de vapeur (t) au sol par une formule empirique de Hahn donnée par l'équation (24). Ainsi, on appelle hauteur d'eau condensable, la hauteur d'eau liquide qui serait recueillie par cm^2 si toute la vapeur d'eau était condensée. Elle varie assez fortement suivant la latitude, la saison et l'humidité relative.

$$W(cm) = 0.17t \quad (24)$$

Les éclairissements solaires direct (I_b) et diffus (I_d) sur une surface horizontal sont donnés par les formules (25) et (26) respectivement.

$$I_b = I \cdot \sin(h) \quad (25)$$

Avec

I : Rayonnement sur le plan normal

$$I_d = 54.8 \sqrt{\sin(h)} \cdot [TL - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (26)$$

Pour avoir l'irradiation solaire globale (G_0 : $MJ/m^2 \cdot jour$) sur une surface horizontale à la limite supérieure de l'atmosphère on intègre l'expression précédente (km) sur l'intervalle d'un jour (du lever au coucher du soleil) [44], ce qui donne le résultat suivant.

$$G_0 = \frac{24I_{cs}}{\pi} * \left[1 + 0.0033 * \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] * Z \quad (27)$$

n : est le jour de l'année (c.à.d. $n=1$ pour le 1^{er} janvier) Le paramètre (Z) est donné par.

$$Z = \left(\cos(L) \cos(\delta) \sin(w) + \frac{\pi}{180} * w * \sin(L) \sin(\delta) \right) \quad (28)$$

On remarque que l'irradiation solaire globale (G_0) sur une surface horizontale en dehors de l'atmosphère dépend de la constante solaire (I_0), de la latitude du lieu considéré (L), de la déclinaison (δ) et de l'angle horaire (ω).

Ainsi, l'éclairement global I_g sur un plan horizontal est la somme du rayonnement direct et diffus :

$$I_g = I_b + I_d \quad (29)$$

Où

I_g : Rayonnement solaire global sur une surface horizontale (W/m^2)

I_d : Rayonnement solaire diffus mesuré (W/m^2)

I_b : Rayonnement solaire direct mesuré (W/m^2)

➤ Calcul du potentiel d'énergie solaire à partir du rayonnement mesuré

Le rayonnement solaire global utilisé pour notre étude est mesuré par la station du CNRD de N'Djamena et le potentiel d'énergie solaire disponible sur une surface horizontale est calculé à partir de l'équation (30) [63].

$$E_g = \int_{(LS)}^{(CS)} I_g(t) * dt \quad (30)$$

- E_g : potentiel global sur une surface horizontale ($\text{kWh/m}^2/\text{j}$)
- LS : heure de lever du soleil.
- LC : heure de coucher du soleil.

7. Traitement des données in-situ de la durée d'insolation et rayonnement

Tous les traitements de données ont été réalisés à l'aide du support informatique, sur la feuille de calcul EXCEL 2010. Après le traitement du fichier Excel des données des durées d'insolation. En commençant par le calcul du cumul des heures par année de chaque station, la moyenne mensuelle des années de chaque station, la moyenne de cumuls des heures par année de chaque station et la moyenne mensuelle de toutes les stations du Tchad. Pour le traitement numérique des données, la caractéristique de valeur centrale la plus utilisée, la moyenne arithmétique a été sollicitée pour le calcul des valeurs régionales. Sa formule est :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (27)$$

Après, nous avons eu calculé les anomalies de la durée d'insolation et celles des autres paramètres météorologiques par les formules suivantes :

Pour la durée d'insolation, les humidités relatives et les températures, nous avons utilisé :

$$IA = X_i - \bar{X} \quad (28)$$

Pour les précipitations, nous avons utilisé la relation des indices climatologiques. Il existe dans la littérature plusieurs types d'indices climatiques. Nous avons utilisé ceux recommandés par l'Organisation de la Météorologie Mondiale (OMM) [64] et la communauté scientifique internationale. L'étude de la variabilité climatique a été faite à partir de l'anomalie réduite. Cet indice joue un rôle très important dans la détermination des variations saisonnières et s'exprime par :

$$\Delta X = \frac{X_i - \bar{X}_i}{\sigma_i} \quad (29)$$

où X_i représente le total annuel de l'année i pour une station, \bar{X}_i la moyenne annuelle des précipitations pour la station et σ_i l'écart type des totaux annuels. Cet indice détermine une variable centrée réduite [65]. Ainsi, la moyenne interannuelle d'une série correspond à l'indice nul (0).

Cet indice, notée ΔX pour la pluie, encore appelé SPI (Standardized Precipitation Index) permet de déterminer le déficit des précipitations en un lieu donné pendant un temps déterminé [66]. Le SPI peut résulter de l'ajustement de longues séries de cumuls de données de précipitations sur des périodes appropriées, à une distribution statistique (e.g. Gamma). Les valeurs négatives du SPI correspondent à des périodes sèches alors qu'à l'opposé les valeurs positives indiquent des périodes humides. Le tableau 3 présente la classification de l'indice standardisé des précipitations [67]. Des valeurs de SPI inférieures à -0,99 correspondent à un phénomène de sécheresse. La sécheresse est d'autant plus intense que le SPI est négatif.

Tableau 3 : Classification de l'indice SPI [67]

Valeur du SPI	Intensité de la sécheresse
0 à -0,99	Proche de la normale
-1 à -1,49	Modérée
-1,5 à -1,99	Sévère
≤ -2	Extrêmement sévère

A partir de la relation (30) de la page 48 et des données in-situ du rayonnement global issu du pyranomètre entre 2017 et 2018 et qui sont prélevées journalièrement à des pas de 15 minutes. Nous avons utilisé un programme sous Matlab pour déterminer le potentiel solaire global journalier.

CHAPITRE 3 : VARIATIONS DE LA DUREE D'ENSOLEILLEMENT ET SON INTERACTION AVEC LES PARAMETRES METEOROLOGIQUES ENTRE 1950 ET 2010 AU TCHAD

1. Contexte de l'étude

Depuis 1950, le Tchad dispose des stations de mesure d'insolation sur plusieurs stations pour des études de prévisions météorologiques, agrométéorologiques et climatologiques. La connaissance de la qualité, de l'intensité de la radiation solaire en un lieu et de ses variations journalières, mensuelles ou annuelles doit être complétée par celle de sa durée et de sa fréquence. La durée d'insolation est utilisée dans l'agriculture (assure la fonction de la photosynthèse sur les plantes), le tourisme (beau temps d'un paysage), etc.

Avant, il était plus facile d'effectuer des mesures d'insolation que des mesures du rayonnement. En effet, les mesures du rayonnement utilisent des pyranomètres, appareils plus sophistiqués et dont l'étalonnage très délicat doit être effectué régulièrement. De plus, les enregistrements se faisaient graphiquement et le dépouillement par planimétrie était très long. Actuellement, on dispose de compteurs intégrateurs à lecture directe et l'enregistrement de données peut se faire sur bande magnétique, ce qui simplifie le travail mais coûte cher et demande une certaine maintenance. C'est pour ces raisons, qu'il était préférable d'implanter de simples héliographes surtout dans les régions à faible environnement technique, comme dans le Sahel. De ce fait, il y a actuellement plus de stations équipées en héliographes qu'en pyranomètres.

Ce qui intéresse les utilisateurs de l'énergie solaire, (agriculteurs pour leurs cultures, architectes pour le chauffage ou la climatisation solaire) est la quantité d'énergie disponible au sol, donc le rayonnement global. C'est pourquoi, la relation entre l'insolation, facilement mesurée, et le rayonnement disponible est intéressante.

Diverses relations empiriques ont été proposées suivant la région pour estimer le rayonnement à partir de la mesure de l'insolation [68]. Nous retiendrons la formule d'Angström qui est assez universelle et qui relie par une fonction affine, insolation et rayonnement.

$$\frac{G}{G_0} = a + b * \frac{S}{S_0} \quad (30)$$

Où $\frac{G}{G_0}$ est le rapport du rayonnement global solaire G mesuré au sol, au rayonnement solaire direct extraterrestre G_0 sur une surface horizontale et $\frac{S}{S_0}$ est la fraction d'ensoleillement définie

par le rapport de la durée d'insolation mesurée S à la durée maximale d'ensoleillement S_0 calculée pour ce jour et ce lieu.

Les paramètres a et b sont les coefficients de l'ajustement par corrélation linéaire entre $\frac{G}{G_0}$ et $\frac{S}{S_0}$. Ils sont des coefficients de correction qui sont reliés, respectivement à l'épaisseur des nuages et au trouble atmosphérique. Ils sont liés à la latitude (Φ) selon les relations suivantes :

$$a = 0.37022 - 0.00313.\Phi \quad (31)$$

$$b = 0.32029 + 0.00506.\Phi \quad (32)$$

G_0 et S_0 sont calculés à partir des facteurs géométriques (latitude Φ) et astronomiques (déclinaison du soleil δ et distance terre-soleil) par les formules N°4 de la page 23 (S_0) et N°27 de la page 47 (G_0) [69].

La lumière du soleil est un facteur clé dans la plupart des processus climatiques, par exemple bilan radiatif de la terre et cycle hydrologique [70]. L'heure d'ensoleillement est le paramètre d'influence le plus important du processus d'évapotranspiration [71, 72]. Ainsi, les variations de la durée d'ensoleillement peuvent perturber le cycle hydrologique en réduisant l'évaporation, entraînant une réduction des précipitations et des rendements agricoles dans certaines zones. Globalement, la durée de l'ensoleillement est utilisée depuis des décennies dans de nombreuses applications différentes. Elle est appliquée dans des secteurs tels que le tourisme, la santé publique, l'agriculture, la végétation et l'énergie solaire [73 - 75]. De plus, avec le changement climatique mondial dramatique de ces dernières années, la variation de la durée d'ensoleillement a suscité beaucoup d'intérêt [76, 77]. Par exemple, la durée d'ensoleillement a diminué dans le nord et l'est de l'Autriche au cours des 30 années 1960-1989, tandis qu'une augmentation remarquable de la durée d'ensoleillement a été observée en haute montagne [78]. En Europe occidentale, la durée d'ensoleillement annuel a globalement diminué depuis les années 1950 jusqu'au début des années 1980, puis s'est redressée au cours des deux prochaines décennies [79]. Cependant, peu d'études ont été effectuées sur la durée d'ensoleillement en Afrique dans des pays comme le Tchad, malgré son fort potentiel solaire. En effet, la durée d'ensoleillement a une relation assez directe avec le rayonnement solaire reçu à la surface. Par conséquent, la connaissance de la variabilité de l'insolation représente un facteur déterminant pour la conception, le dimensionnement, l'évaluation des performances et la gestion énergétique des systèmes de conversion d'énergie renouvelable pour les pays dépourvus de mesure du rayonnement solaire. Ce travail est axé sur le Tchad,

pays situé entre le Sahel et l'Afrique centrale avec comme objectif d'évaluer la durée d'insolation à long terme. Son climat est caractérisé par un type continental chaud et sec. Du nord au sud du Tchad, nous observons une succession de climats sahariens au nord, sahéliens au centre et soudanais au sud [80, 81]. Comme la plupart des pays sahéliens, le Tchad a connu une sécheresse intense du début des années 1970 à la fin des années 1980. Cette sécheresse s'est traduite par un déficit pluviométrique qui a eu un impact négatif sur l'agriculture et l'économie de la région [82, 91]. L'une des principales questions est de savoir si les fluctuations du climat sahélien (sécheresse des années 70 et changement climatique mondial) ont eu un impact sur la durée d'ensoleillement.

2. Caractérisation et tendances saisonnière (annuelle) de la durée d'ensoleillement entre 1950 et 2010

Dans cette étude, nous avons subdivisé le Tchad en trois (03) zones en fonction des stations de mesures existantes dans chaque zone climatique. Par conséquent, la zone nord est composée d'une station (Faya-Largeau), la zone centrale de trois (03) stations (Abéché, Amti-man et N'Djamena) et la zone sud de trois (03) autres stations (Sarh, Moundou et Pala). Pour chaque zone, nous faisons la moyenne des données de différentes stations afin d'obtenir des données par zone climatique. De même que, les données représentant l'ensemble du pays sont calculées à partir de la moyenne des trois (03) zones climatiques. Des calculs d'anomalies (sur la période considérée) ont été effectués pour tous les paramètres, à l'exception des précipitations pour lesquelles nous avons utilisé l'indice de précipitation standardisé [92, 93].

2.1. Caractérisation annuelle de la durée d'ensoleillement

Nous commençons par illustrer sur la figure 16 la répartition annuelle de la durée d'ensoleillement entre 1950 et 2010 au Tchad. Les figures 16a, b, c et d représentent respectivement les zones nord, centre, sud et l'ensemble du pays (Tchad).

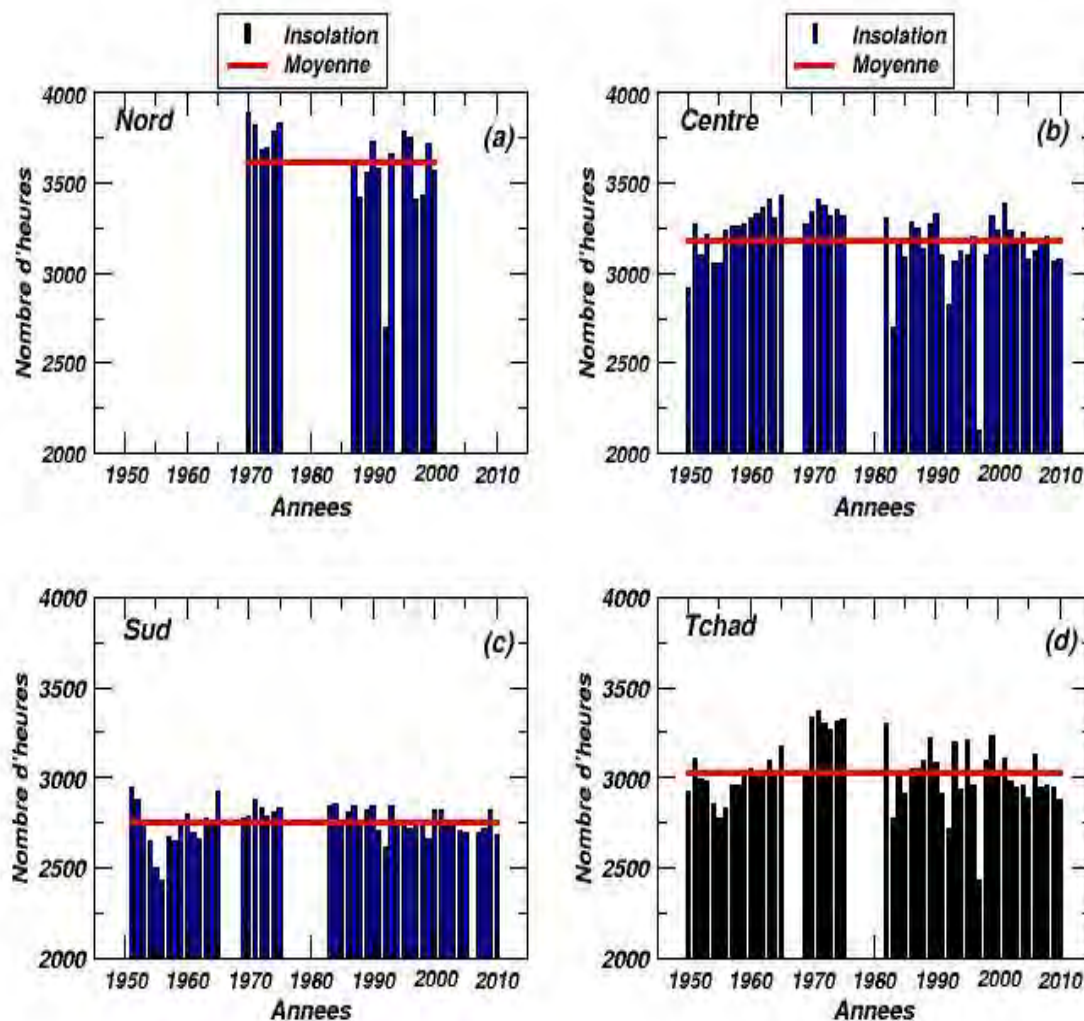


Figure 16: Distribution annuelle de la durée d'insolation au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.

Le nord du Tchad (figure 16.a) représenté par la station de Faya-Largeau située dans le désert se caractérise par un fort ensoleillement annuel avec une moyenne annuelle de l'année (3612.33 h/an). En effet, cette région est l'une des régions les plus ensoleillées au monde. De 1970 à 1975, au cours de la grande sécheresse du Sahel, l'ensoleillement dans cette partie du pays est supérieur à la moyenne annuelle avec un maximum de 3889.28 h/an pour l'année 1970. Il diminue ensuite progressivement de 1987 à 1992 et augmente légèrement en 1993, 1995, 1996 et 1999. Cependant, les années 1988 et 1992 sont les moins ensoleillées de la série avec des valeurs inférieures à 2703.17 h/an, surtout pour l'année 1992. Le centre (figure 16.b) composé des stations Abéché, N'Djamena et Amti-man, se caractérise par une forte insolation pendant les années sèches (de 1960 à 1975) supérieure à la moyenne. Depuis 1983, il y a eu une légère diminution jusqu'en 2000 et une augmentation progressive entre 2001 et

2005 et enfin une autre baisse par rapport à 2010. Cette zone sahélo-soudanienne a bénéficié de plus de 3411.94 h/an de soleil en 1971 (année sèche). Cependant, nous notons qu'en 1983, une tendance à la baisse avec des valeurs inférieure à 2125.48 h/an ensuite en 1997. Dans le sud du pays (figure 16.c), l'ensoleillement est important entre 1951 et 1984 (supérieur à la moyenne) avec un maximum de 2947.38. h/an en 1951. Il varie autour de la moyenne entre 1954 et 1958. Cependant, le minimum en insolation (2430.85 h/an) est noté en 1958 pendant les années humides. La moyenne d'ensoleillement au Tchad est représentée à la figure 16.d. L'insolation est supérieure à 3031 h/an de 1959 à 1975, avec un maximum de 3 269.44 h/an en 1971. Toutefois, la tendance à la baisse commence entre 1992 et 1997, avec des valeurs proches de 2427.64 h/an.

2.2. Caractérisation mensuelle et saisonnière de la durée d'ensoleillement

La figure 17 illustre la répartition mensuelle de la durée d'ensoleillement en heure par jour entre 1950 et 2010, respectivement au nord (figure 17.a), au centre (figure 17.b), au sud (figure 17.c) et une moyenne pour le pays tchadien (figure 17.d). Au nord du pays, l'ensoleillement est d'environ 10 h/j chaque mois. Nous notons une distribution mensuelle homogène en toute saison. Cependant, les minima sont notés en mars et septembre avec des valeurs inférieures à 9.3 h/j. Contrairement au nord, la durée d'ensoleillement au centre du pays suit une saisonnalité très marquée. Les maxima sont observés pendant la saison sèche entre octobre et mai, dépassant 9.85 h/j et les minima pendant la saison des pluies entre juin et septembre. Le minimum est enregistré au mois d'août avec des valeurs inférieures à 6.73 h/j. De même qu'il existe une saisonnalité marquée de la durée d'ensoleillement dans le sud avec des maxima (supérieurs à 9 h/j) pendant la saison sèche et des minima pendant la saison des pluies (valeurs inférieures à 5.68 h/j) en août.

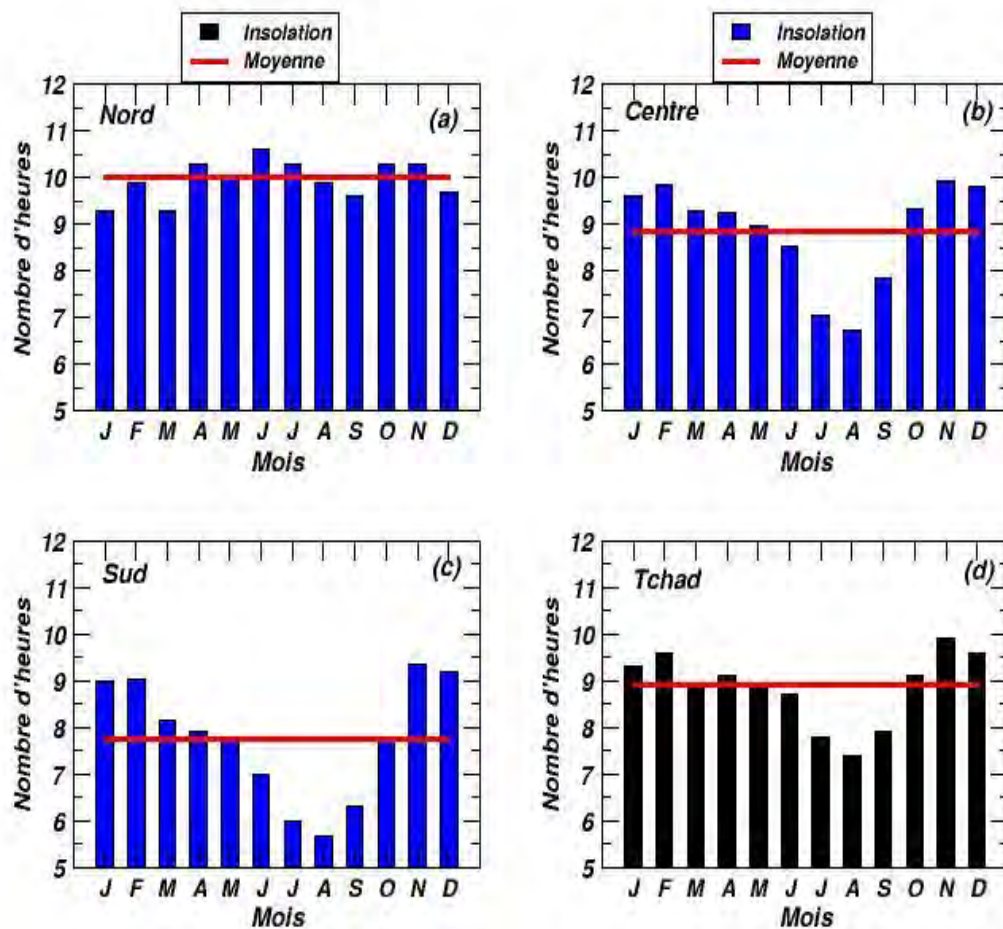


Figure 17: Distribution mensuelle de la durée d'insolation au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.

La figure 17.d résume la répartition mensuelle de l'ensoleillement sur le Tchad de 1950 à 2010. Elle montre une saisonnalité marquée de la répartition de l'ensoleillement, avec les maxima pendant la saison sèche (d'octobre à mai) et les minima pendant la saison des pluies de juin à septembre. Le pic est enregistré en novembre et février avec des valeurs autour de 9 h/j alors que les minima sont relevés pendant la saison des pluies en juillet et août avec des valeurs inférieures à 7.4 h/j.

Le tableau 4 résume le montant annuel et mensuel de la durée d'ensoleillement dans les différentes régions du pays et une moyenne pour l'ensemble du pays. Chaque année, le Tchad reçoit plus de 3031 ± 176 heures d'ensoleillement correspondant à 8.9 heures par jour. De même, on note un fort gradient entre le nord et le sud. Par exemple, l'insolation quotidienne est de 10.0 ± 0.41 heure dans le nord, 8.85 ± 1.1 heure dans le centre et 7.75 ± 1.28 heure dans le sud du pays.

Tableau 4: Insolation annuelle et mensuelle au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.

Insolation	Tchad	Nord	Centre	Sud
Insolation Annuelle moyenne (h/an)	3031 ± 176	3612.33 ± 261.18	3185.50 ± 208.78	2753.39 ± 95.92
Insolation mensuelle moyenne (h/j)	8.9 ± 0.8	10.0 ± 0.41	8.85 ± 1.1	7.75 ± 1.28

2.3. Tendance des anomalies moyennes de la durée d'insolation entre 1950 et 2010 au Tchad

Pour mieux mettre en évidence les différentes périodes climatiques en termes de variabilité de l'ensoleillement au Tchad, nous représentons sur la figure 18 l'anomalie annuelle de la durée d'insolation entre 1950 et 2010.

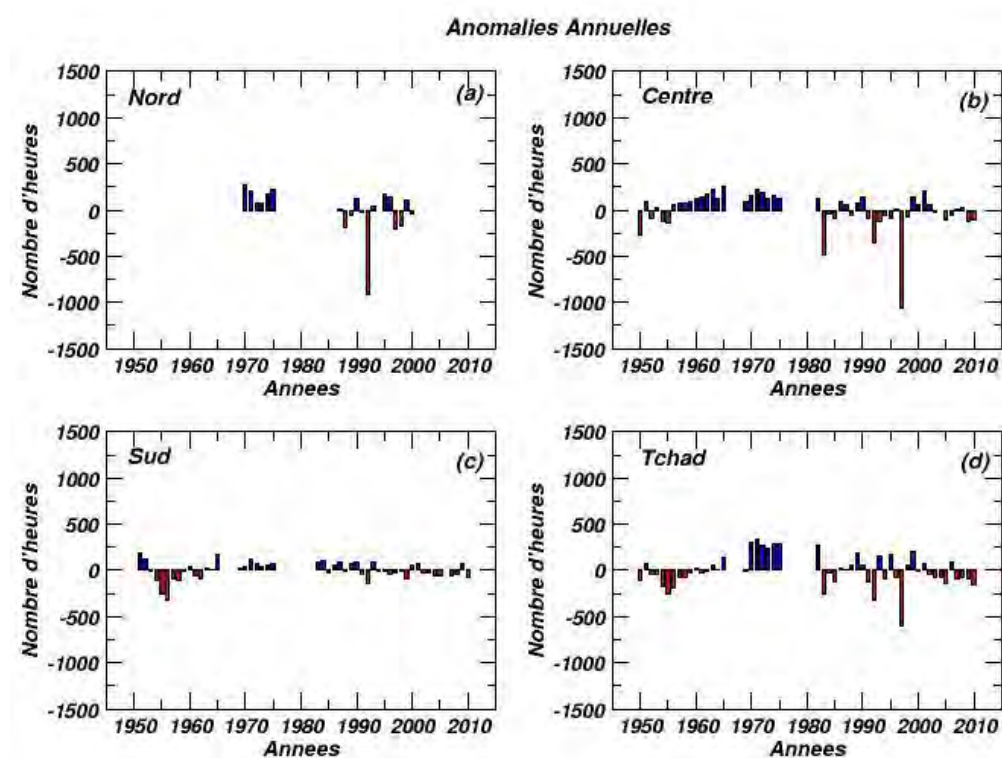


Figure 18: Tendance des anomalies de la durée d'insolation au Tchad. Représentation en a) Nord, b) Centre, c) Sud et d) Moyenne sur le Tchad entre 1950 et 2010.

Les figures 18.a, b, c et d représentent respectivement l'anomalie annuelle au nord, au centre, au sud et pour tout le pays (Tchad). Ces chiffres montrent clairement une variabilité de l'ensoleillement en fonction des périodes climatiques dans la région du Sahel. Ils montrent

l'existence de trois grandes périodes en termes d'insolation. Premièrement, nous enregistrons des anomalies négatives (-23.74h/an) de 1950 à 1970 correspondantes aux années humides au Tchad et dans tout le Sahel. Ensuite, la période de 1970 à 1990 correspondant à la grande sécheresse qui a sévi dans toute la région. Cette période se manifeste par des anomalies positives (73.12 h/an) en insolation partout au Tchad. Et enfin, la période de 1990 à 2010 appelée période de retour des précipitations est caractérisée par une variabilité annuelle très marquée de la durée d'ensoleillement. Au cours de cette période, les anomalies positives et négatives se succèdent d'année en année.

Le tableau 5 récapitule les anomalies d'insolation pour chaque période et pour les différentes régions du Tchad. On remarque les effets du gradient nord-sud mais également des trois périodes climatiques sur la durée d'ensoleillement. Par exemple, l'anomalie varie de -23.47 h/an pendant la période humide à 73.12 h/an pendant la grande sécheresse et à -43.53 h/an pour la période de retour.

Tableau 5: Anomalies annuelles au Tchad (Nord, Centre, Sud et moyenne sur le Tchad) entre 1950 et 2010.

Périodes	Tchad (h/an)	Nord (h/an)	Centre (h/an)	Sud (h/an)
Humide	-23.47	NA	-16.04	-24.92
Sèche	73.12	76.92	47.72	42.56
Retour	-41.53	-85.45	-87.13	-12.63

3. Effet de la variabilité saisonnière des paramètres météorologiques sur la durée d'insolation

3.1. Impact des précipitations sur la durée d'insolation

Afin d'évaluer l'impact annuel des paramètres météorologiques sur la durée d'ensoleillement, nous analysons d'abord l'indice de précipitations normalisé (SPI en anglais) au Tchad de 1950 à 2010. La figure 19 présente les anomalies annuelles d'insolation (figure 19.b) et de précipitations (indice SPI de la figure 19.a) de 1950 à 2010 sur le Tchad. L'indice SPI (Figure 19.a) montre que le Tchad a connu trois grandes périodes climatiques en termes de précipitations. Premièrement, le Tchad et le Sahel ont connu une période très humide de 1950 à 1970.

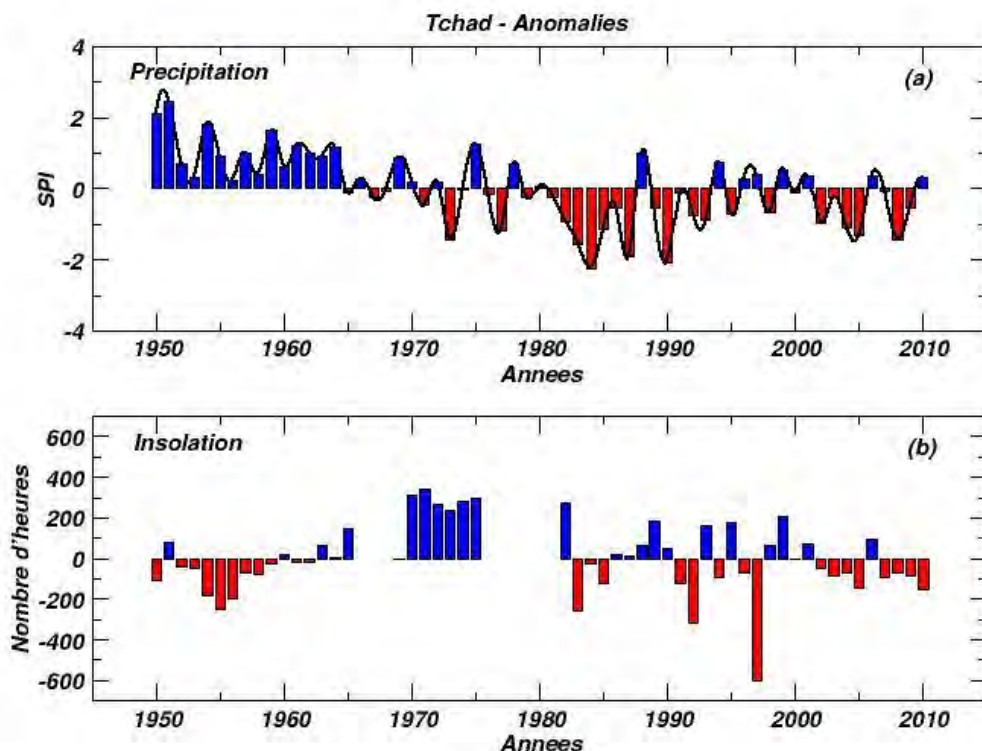


Figure 19: Anomalies annuelles de la durée d'insolation et des précipitations entre 1950 et 2010 au Tchad.

Cela s'est manifesté au Tchad par un SPI positif (voir Figure 20.a) de 1950 à 1970. Par conséquent, la durée d'ensoleillement était plus restreint pendant cette période humide avec des anomalies négatives autour de -200 heures par an. Ensuite, la région a connu une sécheresse sans précédent entre 1970 et 1990 [94,95]. Cette soudaine diminution des précipitations a touché l'ensemble du Sahel, ce qui est en fait le signal climatique le plus puissant que la terre ait reçu depuis l'existence de mesures météorologiques [96, 97]. Cette période sèche a entraîné une augmentation de la durée d'ensoleillement de 1970 à 1990. Durant cette période, le Tchad gagne en moyenne plus de 250 heures par an. Les deux dernières décennies (1990 à 2010) se caractérisent par un retour plus ou moins important des pluies. En effet, il existe une très forte variabilité interannuelle des SPI d'année en année. De même, la durée d'ensoleillement varie d'une année à l'autre au cours de cette période.

3.2. Impact de l'humidité relative et interaction avec les températures

La figure 20 illustre les anomalies d'humidité relative, de température moyenne, de température maximale et de température minimale entre 1950 et 2010 au Tchad. Nous notons que l'humidité relative suit la même tendance que la durée d'ensoleillement.

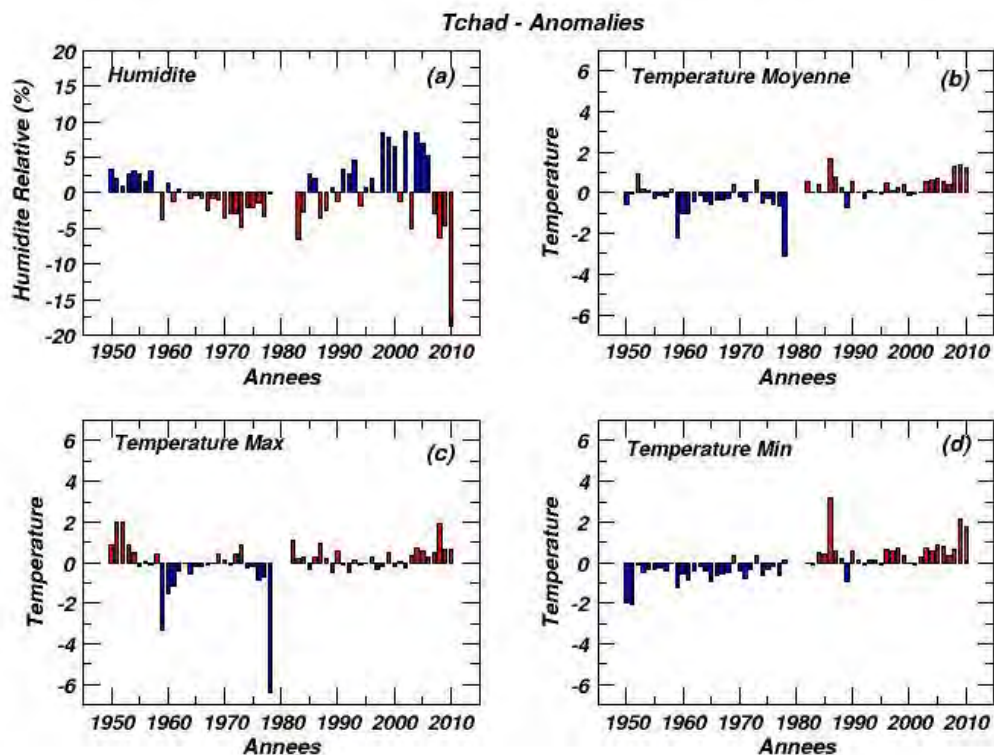


Figure 20: Tendances des anomalies annuelles de la température (moyenne, minimale et maximale) et de l'humidité relative entre 1950 et 2010 au Tchad.

En effet, l'insolation est un paramètre qui dépend de l'humidité relative et donc de la couverture nuageuse. Nous reconnaissons la signature des trois grandes périodes climatiques du Tchad. En fait, les anomalies positives de l'humidité relative (figure 20.a) sont notées entre 1950 et 1970. De 1970 à 1990, l'humidité relative diminue de plus de 5% par an. Et au-delà des années 1990, les anomalies fluctuent d'année en année. Cependant, les températures (moyenne, maximale et minimale) ne suivent pas la même tendance avec l'ensoleillement et les précipitations. Ici, seules deux périodes en termes de changement sont notées. La période de 1950 à 1990 est une période d'anomalies négatives. A partir des années 1990, on note une augmentation continue des températures au Tchad. Ainsi, on peut dire que l'augmentation des températures au Tchad n'est pas synonyme d'augmentation de la durée d'insolation. En fait, la variabilité des températures au cours des dernières décennies est principalement due au changement climatique à l'échelle globale.

Le tableau 6 résume l'impact de ces trois grandes périodes d'ensoleillement sur les différents paramètres météorologiques au Tchad. Globalement, l'anomalie de l'humidité relative passe de 0.32% pendant la période humide à -1.39% pendant la grande période de sécheresse et à 1.02% pendant la période de retour. De même, l'anomalie des précipitations passe de 0.83 mm en période humide à -0.56 mm en période de grande sécheresse et à -0.28 mm en période de retour.

Tableau 6: Impact de trois (03) périodes d'ensoleillement sur les différents paramètres météorologiques au Tchad.

Périodes	Humidité (%)	Température_Max (°C)	Température_Min (°C)	Température_Moy (°C)	Précipitation (mm)
Humide	0.32	-0.02	-0.6	-0.3	0.83
Sèche	-1.39	-0.22	0.1	-0.09	-0.56
Retour	1.02	0.3	0.6	0.39	-0.28

Entre la période humide et la période sèche, il y a une augmentation des températures moyennes et minimales; et une augmentation de la température maximale. Ces changements sont probablement dus à la variabilité climatique à l'échelle régionale. Cependant, entre la période sèche et le retour, les températures augmentent considérablement. Ces augmentations sont dues au changement climatique à l'échelle mondiale et n'ont donc pas d'impact important sur la durée d'ensoleillement.

4. Bilan et conclusion

L'objectif de cette partie était d'évaluer la variabilité de la durée de l'insolation et son interaction avec des paramètres météorologiques tels que la température de surface, les précipitations et l'humidité relative au Tchad de 1950 à 2010. En moyenne, le Tchad reçoit plus de 3031 ± 176.33 heures par an. Cela correspond à 8.9 ± 0.8 heures par jour. De même, il existe un fort gradient entre le nord et le sud du pays. Par exemple, l'insolation quotidienne est d'environ 10 ± 0.41 heure dans le nord, 8.85 ± 1.1 heure dans le centre et 7.75 ± 1.8 heure dans le sud du pays. De plus, il existe une saisonnalité marquée de la durée d'ensoleillement avec des maxima en saison sèche et des minima en saison des pluies. L'étude des anomalies met en évidence trois grandes périodes en termes de durée d'insolation. Il y a tout d'abord la période où les anomalies de durée d'insolation étaient négatives (appelées période humide) entre 1950 et 1970. En effet, pendant cette période, le Tchad et l'ensemble de la région

sahélienne étaient humides. De 1970 à 1990, la région a subi une grave sécheresse qui a entraîné une augmentation de la durée de l'insolation au Tchad. Enfin, la période de retour dite période de 1990 à 2010 est caractérisée par des fluctuations rapides (d'année en année) de la durée d'insolation. Ces travaux ont également montré que la durée d'insolation avait une relation assez corrélée avec les précipitations et l'humidité relative. Cela montre le caractère régional de ces trois paramètres qui sont: la durée d'insolation, les précipitations et l'humidité relative. Cependant, la relation entre les températures et la durée de l'insolation est assez équivoque, en particulier pendant la période de retour des pluies entre 1990 et 2010. Pendant cette période, les températures augmentent rapidement avec l'émergence de vagues de chaleurs régulières, principalement en raison des changements climatiques globaux.

CHAPITRE 4 : OBSERVATION ET SIMULATION DU POTENTIEL D'ENERGIE SOLAIRE A N'DJAMENA AU TCHAD

1. Approche et objectifs

Depuis plus d'un siècle, le Tchad effectue des observations météorologiques au niveau national et également les archives de la direction des ressources en eau et de la météorologie (DREM) ont indiqué que les observations météorologiques et les mesures hydrologiques ont débuté dans les années 1900. Ces observations ont d'abord concerné les hauteurs des cours d'eau (Laï, 1903) et ensuite celles relatives au climat (Fort Lamy, 1904) [98].

Les principaux intervenants en matière d'observation systématique et de recherche sur le climat au Tchad que sont l'agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA), la direction des ressources en eau et de la météorologie (DREM), le réseau d'observation des pâturages naturels (ROPN) et la direction de la connaissance du domaine hydraulique (DCDH).

La République du Tchad a bénéficié d'une station de réception d'imagerie satellitaire dénommée Météosat de seconde génération (MSG) logé au bloc technique de l'ASECNA. Cette station couvre l'ensemble du territoire national. La recherche au Tchad est encore à l'état embryonnaire, mais il existe des institutions dont le champ d'activités touche plus ou moins l'évolution du climat. Et il s'agit des principales institutions orientées vers la recherche et l'observation systématique de façon variée on a : l'institut tchadien de recherche agronomique pour le développement (ITRAD), l'institut national de sciences humaines (INSH), le laboratoire de recherches vétérinaires et zootechniques (LRVZ), le pôle régional et de recherche appliquées au développement des savanes en Afrique centrale (PRASAC), le centre national d'appui à la recherche (CNAR), les universités de N'Djaména [99].

La direction générale de la météorologie nationale (DGMN) est l'entité nationale chargée de la production des produits et services météorologiques/climatologiques. En termes de produits et services météorologiques/climatologiques actuels élaborés et mis à la disposition des utilisateurs finaux et des partenaires par la DGMN, on dénombre :

- 22 stations synoptiques et 08 stations climatologiques qui selon le classement normé de l'organisation météorologique mondiale (OMM) sont souvent placées au niveau des aéroports et aérodromes pour les besoins immédiats de la navigation aérienne. Les paramètres météorologiques issus de ces types de stations sont : la température, la pluie, les vents, l'humidité, la pression atmosphérique et des mesures visuelles telles que la poussière, les types de nuages. Les informations et données météorologiques mesurées sont échangées en temps réel, au niveau mondial, à travers le système mondial de transmission (SMT) de l'OMM.

- 28 stations Agrométéorologiques de même types que les stations secondaires (climatologiques), dont la fréquence d'observations se diffèrent, dans ce type de station, on relève en plus de paramètres mesurés dans les stations climatologiques, les informations sur la phénologie des cultures;
- 153 postes pluviométriques qui relèvent uniquement les hauteurs des pluies tombées dans les localités où ils sont installés.

Les rapports de deux récentes missions de la DGMN (juin 2015 et janvier 2016) font apparaître que l'on assiste à la fermeture d'au moins deux (02) stations d'observations par an et pour plusieurs causes dont les principales sont : le manque d'équipement et/ou le manque d'observateur [100].

Compte tenu des sources d'énergies fossiles tarissables et de leur caractère très polluant, de nombreuses applications solaires connaissent le jour. C'est le cas des systèmes solaires photovoltaïques et thermiques dont le fonctionnement et le rendement sont principalement basés sur la disponibilité du rayonnement solaire. En effet, le continent africain est l'un des plus importants endroits du gisement solaire au monde où les maxima en ensoleillement sont observés au niveau des zones désertiques, notamment la partie nord (le Sahel et le Sahara) et australe (le Kalahari). A cet effet, une étude de la NASA conduite entre 1983 et 2005 dans le Sahara place la région d'Agadem au Niger en deuxième position des régions les plus ensoleillées du globe avec un ensoleillement moyen annuel de $6.92 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ [101]. En plus, la connaissance du potentiel d'énergie solaire pour un site donné est un paramètre très capital pour le développement des recherches scientifiques, technologiques et économiques des systèmes solaires (photovoltaïques, thermiques, biomasse). Cependant, une grande partie de ce rayonnement est atténuée par l'atmosphère soit par absorption ou diffusion par les aérosols, les gaz à effet de serre, les molécules et la vapeur d'eau. Dans le cas du Sahel sous forte influence des poussières désertiques, cette atténuation peut être attribuée aux aérosols qui ont un effet direct sur le rayonnement solaire. Ainsi, la variation de ces particules dans l'atmosphère a un impact notable sur la quantité du rayonnement solaire incident à la surface de la terre. Ceci influence directement le fonctionnement des systèmes solaires qui constituent une alternative au déficit énergétique dans certaines localités comme le Tchad.

Dans cette partie de la thèse, nous proposons d'une part d'évaluer le potentiel d'énergie solaire global à N'djaména (2017-2018) les mesures du pyranomètre et d'autre part d'utiliser

le code de transfert radiatif STREAMER pour simuler les potentiels direct normal et diffus. L'originalité de cette étude réside dans le fait, que le CNRD a fait installer pour la première fois au Tchad un pyranomètre mesurant le rayonnement global à N'Djaména dans le cadre d'un partenariat avec l'INSA de Lyon (France). C'est ainsi qu'en Mars 2017 fut installé un instrument du type Vantage Pro2 Plus qui se trouve au sein du centre national de recherche et de développement de N'Djaména (15°02'N, 12°08'E, 294 m) capital du Tchad dont deux années de mesure (2017 et 2018) nous ont été fournies. De ce fait, vu les caractéristiques de l'instrument de mesure, nous disposons que des mesures de rayonnement global. C'est dans cette optique que nous sommes amenés à utiliser le code transfert radiatif STREAMER pour simuler les autres composantes du rayonnement en l'occurrence le rayonnement diffus et le direct normal non mesurés par le pyranomètre.

2. Variabilité saisonnière du potentiel d'énergie solaire global à N'Djaména

La figure 21 représente l'évolution mensuelle de l'irradiation globale mesurée entre 2017 et 2018 à N'Djaména.

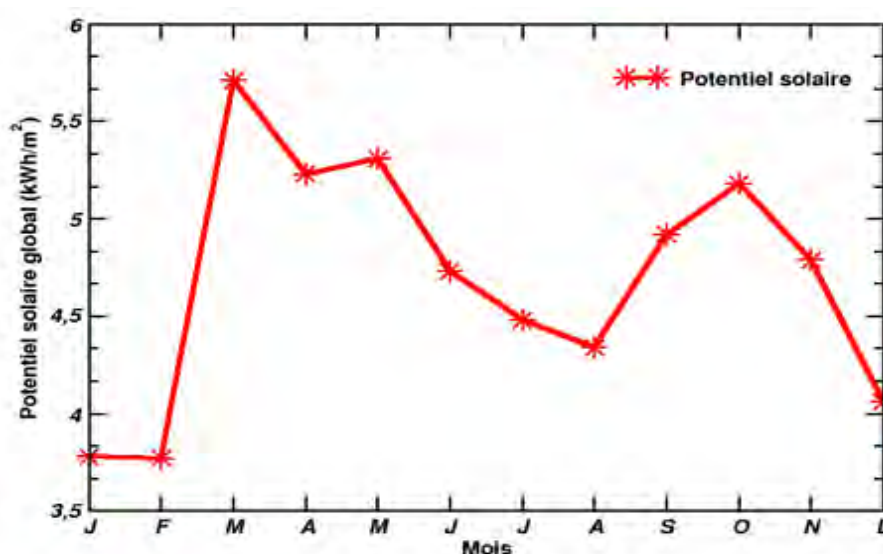


Figure 21: Moyenne mensuelle du potentiel d'énergie solaire global mesuré en kWh/m²/j à N'Djaména entre 2017 et 2018.

Premièrement, il existe une variabilité saisonnière significative du potentiel solaire global à N'Djaména. Les maxima sont observés pendant la saison sèche, c'est-à-dire au printemps (de mars à mai) avec des valeurs autour de 5.42 kWh/m²/j et en automne (de septembre à novembre) avec des valeurs de 4.97 kWh/m²/j, certainement liées à une activité solaire forte. Ensuite, les minima sont observés en hiver de décembre à février (probablement en raison de la hauteur du soleil) et en été de juin à août en raison de la couverture nuageuse et de la

présence de poussière. Ces minimums en hiver correspondent à des valeurs variant entre 3.87 kWh/m²/j et en été (saison des pluies) d'environ 4.60 kWh/m²/j. En résumé, le mois le plus favorable en terme de potentiel solaire global est le mois de mars en printemps avec des valeurs autour de 6 kWh/m²/j et le mois le moins favorable est janvier avec une valeur de 3.87 kWh/m²/j. Globalement, la moyenne annuelle de potentiel solaire disponible est de 4.71 kWh/m²/j pour l'énergie globale sur un plan horizontal à N'Djamena de 2017 à 2018. Les fluctuations saisonnières du potentiel solaire global à N'Djamena sont probablement dues à la les propriétés d'absorption d'éléments atmosphériques tels que les aérosols, les nuages, les gaz et la vapeur d'eau ainsi que de l'activité du soleil (insolation et hauteur du soleil).

3. Effets saisonniers de l'épaisseur optique des aérosols, de la vapeur d'eau et de la durée d'insolation sur le potentiel solaire global

Pour évaluer l'impact des paramètres atmosphériques et de l'insolation sur le potentiel mensuel de l'énergie solaire, nous effectuons des comparaisons qualitatives. La figure 22 illustre l'évolution saisonnière du potentiel solaire global par rapport à l'insolation (figure 22.a), à l'épaisseur optique des aérosols (AOD) (figure 22.b) et à l'eau précipitable (figure 22.c) de 2017 à 2018 à N'Djamena.

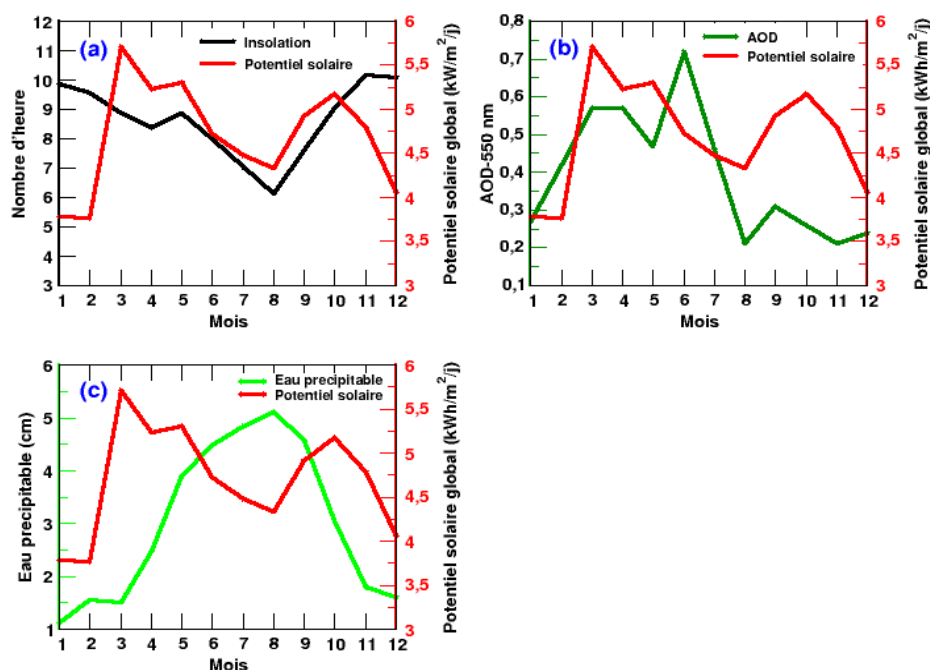


Figure 22: Effets qualitatifs de l'insolation (a), de l'épaisseur optique des aérosols (b) et de l'eau précipitable (c) sur le potentiel solaire global à N'Djamena entre 2017 et 2018.

Globalement, nous notons que la durée de l'insolation (figure 22.a) suit les mêmes tendances que le potentiel solaire sauf en hiver (de décembre à février). En effet, les tendances à la hausse sont visibles dans ces deux courbes de mars à août. De même, nous notons une tendance décroissante de ces deux paramètres d'août à novembre. Le minimum de potentiel solaire et d'insolation enregistré pendant la saison des pluies (spécialement en août) est principalement due à la couverture nuageuse. Cependant, les pics d'insolation enregistrés en hiver (de novembre à février) ne sont pas corrélés au potentiel solaire. Pendant cette saison, on note les valeurs les plus basses du potentiel solaire alors que ce sont les jours les plus longs en termes de rayonnement solaire. Cela peut être dû à la position haute du soleil (hauteur solaire) qui entraînerait une diminution du rayonnement à la surface.

La figure 22.b illustre l'évolution saisonnière du potentiel solaire mesuré et de l'épaisseur optique des aérosols (AOD en anglais) issus du capteur MODIS à 550 nm à N'Djamena. Cette figure montre que l'AOD est principalement liée au potentiel solaire durant l'automne d'août à décembre. En effet, les minimums en AOD correspondent à une augmentation du rayonnement au cours de cette saison. Cependant, pour les autres saisons, nous notons que les principaux paramètres influant sur l'irradiation sont autres que les aérosols uniquement.

La figure 22.c illustre l'évolution saisonnière du potentiel solaire mesuré et l'eau précipitable provenant du capteur MODIS à N'Djamena. Nous observons que ce paramètre est fortement corrélé au potentiel solaire sauf en hiver (décembre à février) à N'Djamena. La présence de nuages dans l'atmosphère a tendance à réduire considérablement le rayonnement, particulièrement en août.

En résumé, on peut dire que l'insolation, les aérosols et les nuages sont des paramètres qui influencent le rayonnement solaire incident. La combinaison des effets de ces trois paramètres permet de mieux évaluer le potentiel solaire de février à novembre. Cependant, les valeurs de potentiel solaire les plus basses enregistrées en hiver (de décembre à février) pourraient être dues à l'activité du soleil.

4. Validation diurne du rayonnement global simulé par le code de transfert radiatif STREAMER à N'Djaména

Le pyranomètre installé à N'Djamena ne mesure que le rayonnement global. Ainsi, pour obtenir les autres composantes (direct normal et diffus) du rayonnement à N'Djamena, nous utilisons le modèle de transfert radiatif STREAMER. D'abord, nous validons ce modèle avec les observations disponibles (rayonnement global) à N'Djamena. Pour cela, différents types de journées ont été identifiées et choisis à N'Djamena. Pour chaque type de journées (claire, nuageuse et poussiéreuse), deux jours ont été choisis en 2018 et les flux correspondants (diffus et direct normal) ont été stimulés par le code STREAMER.

Les données d'entrée du modèle STREAMER pour les journées considérées (claire, mixte et polluée) sont présentées dans le tableau 7. Ces données ont été renseignées sur la base des observations satellitaires MODIS et des mesures in situ du CNRD de N'Djamena. Elles concernent la température (T), l'albédo et l'émissivité (E) de surface, la quantité d'ozone (O_3), la fraction de vapeur d'eau (Wp en anglais) ainsi que l'épaisseur optique des aérosols (AOD) du jour. Quant aux autres composants gazeux (CO_2 , CH_4 , N_2O), ils sont déjà pris en compte dans la construction du modèle [102]. Sachons que le forçage des nuages n'est pas pris en compte dans le calcul du flux solaire à la surface du sol. Par exemple, pour la date du 19 octobre 2018. Nous avons 29°C de température, 0.23 d'albédo, l'émissivité du sol est de 0.96, l'ozone est 254.24 à N'Djamena, la fraction de vapeur d'eau est de 2.17 cm et l'épaisseur optique de l'aérosol de 0.017, comme paramètre d'entrée du modèle STREAMER. On obtiendra en sortie l'irradiation solaire correspondante à cette journée (claire). En remarque, les paramètres comme la température, la fraction de vapeur d'eau et l'épaisseur optique des aérosols sont variables en fonction de la journée considérée.

Tableau 7: Les paramètres d'entrée du modèle STREAMER

Date	Température (°C)	Albédo	Emissivité	Ozone	Wp (cm)	AOD	Journée
19/10/2018	29	0.23	0.96	254.24	2.17	0.017	Claire
27/12/2018	28.5	0.23	0.96	254.24	1.97	0.018	Claire
29/03/2018	32	0.23	0.96	254.24	2.75	2.87	Poussiéreuse
01/04/2018	30.2	0.23	0.96	254.24	3.75	2.04	Poussiéreuse
23/08/2018	28	0.23	0.96	254.24	5.82	0.03	Nuageuse
24/08/2018	27.5	0.23	0.96	254.24	5.7	0.15	Nuageuse

Nous représentons sur les figures 23.a et 23.c le cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux journées claires (sans aérosol) en 2018.

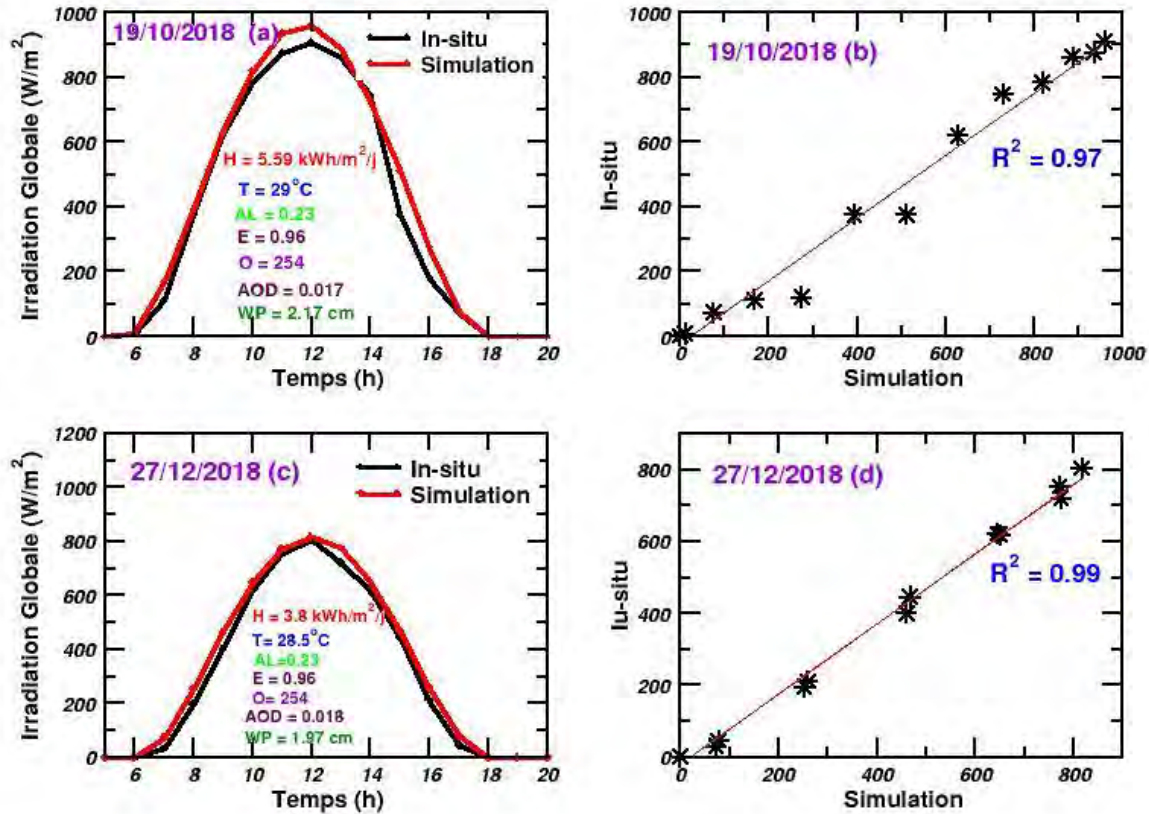


Figure 23: Cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux (02) jours clairs (sans aérosols) du 19 octobre (a) et 27 décembre 2018 (c) à N'Djamena. Les droites de régression linéaire entre la mesure et la simulation sont montrées sur les graphes (b) et (d) respectivement pour le 19 octobre et le 27 décembre.

Pour les cas de ciel dégagé, les jours sélectionnés sont le 19 octobre (avec une épaisseur optique de 0.017 et une fraction de vapeur d'eau de 2.17 cm pour un potentiel global de 5.59 kWh/m²/j) et le 27 décembre (avec une épaisseur optique de 0.0187, une fraction de vapeur d'eau de 1.97 cm pour un potentiel global de 3.8 kWh/m²/j). On constate que, le modèle STREAMER simule parfaitement l'observation à N'Djamena pour ces jours sans aérosol. Les coefficients de corrélation supérieurs à 98% (figures 23.b et 23.d) confirment la fiabilité de ce modèle pour ces types de journées.

Ensuite, les comparaisons pour les jours poussiéreux sont illustrées sur les figures 24.a, b, c et d. Pour les cas de jours poussiéreux, les jours sélectionnés sont le 29 mars (avec une épaisseur optique de 2.87, une fraction de vapeur d'eau de 2.75 cm et un potentiel global de 2.18 kWh/m²/j) et le 1^{er} avril (avec une épaisseur optique de 2.05, une fraction de vapeur d'eau de 3.75 cm et un potentiel global de 3.58 kWh/m²/j). Ici, le paramètre pertinent est l'épaisseur optique des aérosols (AOD). Même en cas d'évènements de poussière, le modèle de streamer arrive à très bien simuler l'observation avec des coefficients de corrélation supérieurs à 98%.

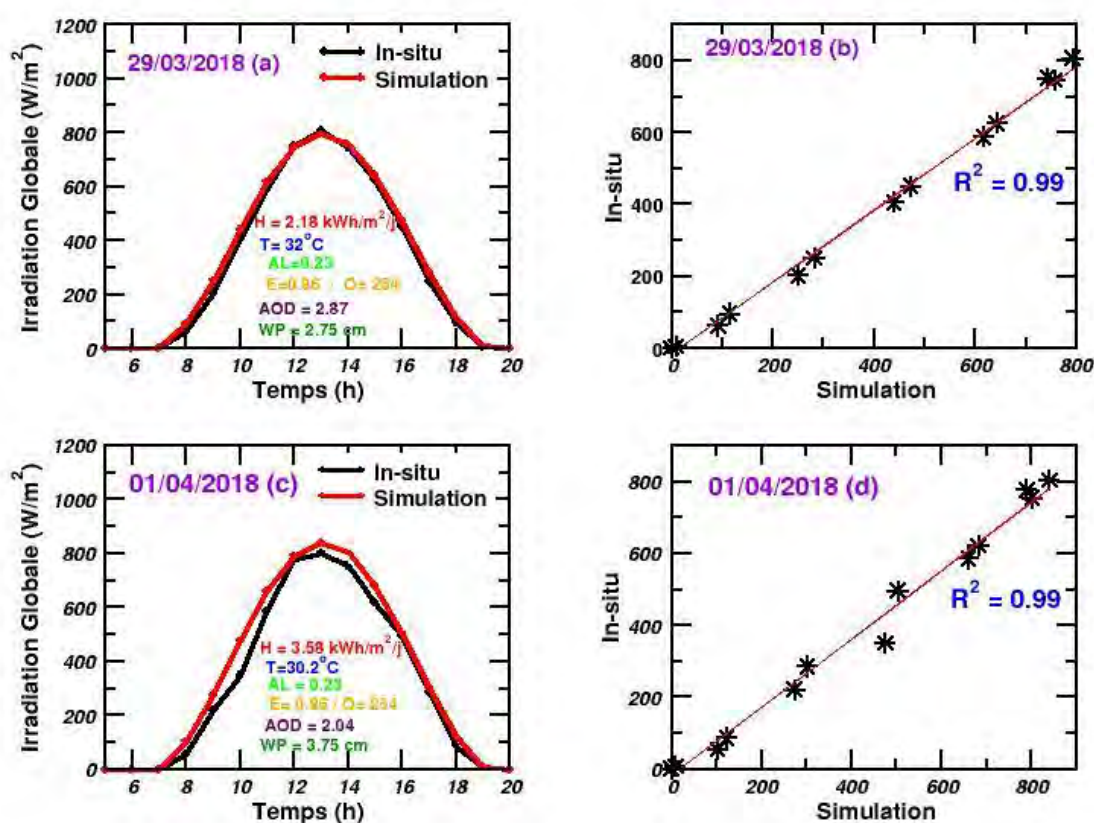


Figure 24: Cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux (02) jours poussiéreux (maximum d'ADO) du 29 mars (a) et du 1^{er} avril 2018 (c) à N'Djamena. Les droites de régression linéaire entre la mesure et la simulation sont montrées sur les graphes (b) et (d) respectivement pour le 29 mars et 1^{er} avril.

Et enfin, les mêmes comparaisons sont faites pour les jours nuageux dans les figures 25.a, b, c et d. Pour les cas ciel nuageux, les jours choisis sont le 23 août (avec une épaisseur optique

de 0.03, une fraction de vapeur d'eau de 5.82 cm et un potentiel global de 4.14 kWh/m²/j) et le 24 août (avec une épaisseur optique de 0.15, une fraction de vapeur d'eau de 5.70 cm et un potentiel global de 5.82 kWh/m²/j). Ici, le paramètre pertinent est l'eau précipitable (Wp). En ce qui concerne ces journées nuageux, le modèle simule aussi très bien l'observation avec des scores de 98%. Cependant, le modèle a du mal à représenter des passages rapides de nuages tels que celui qui est passé entre 12 h et 13 h le 23 août 2018 (Cf. figure 25.a).

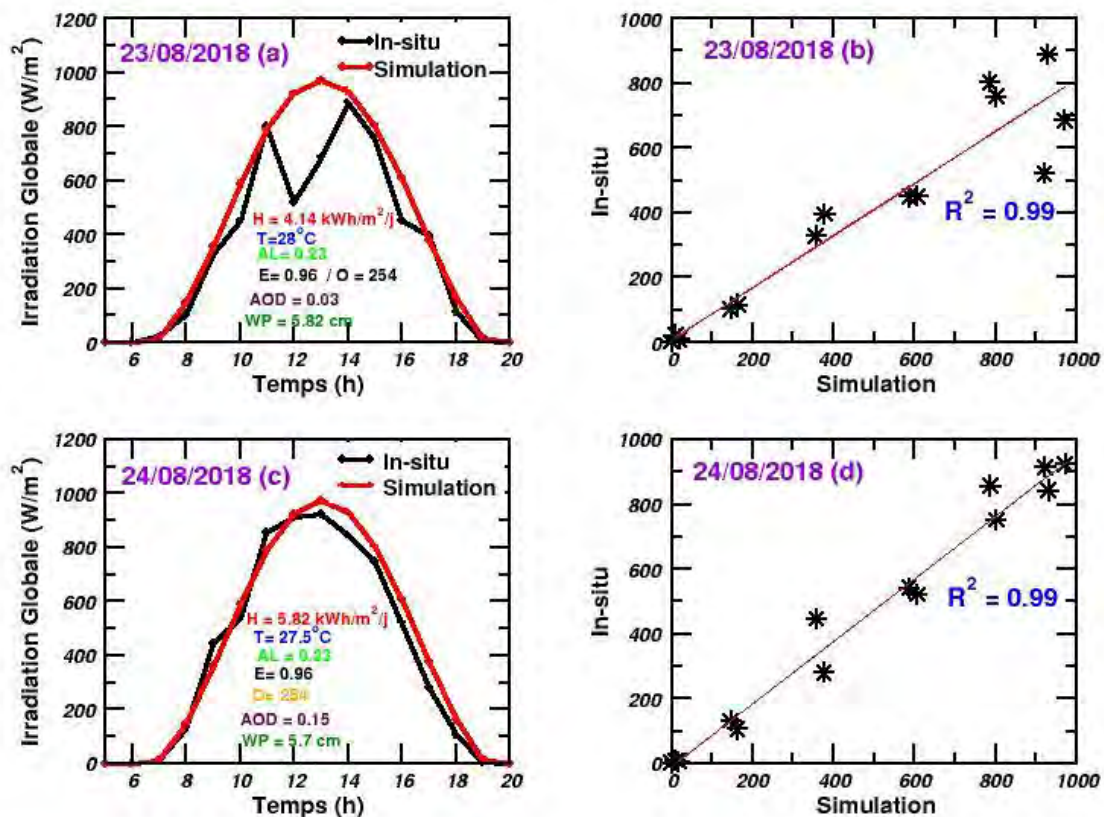


Figure 25: Cycle diurne du rayonnement solaire global simulé (rouge) et observé (noir) pendant les deux (02) jours nuageux (maximum d'eau précipitable) du 23 août (a) et du 24 août 2018 à N'Djamena. Les droites de régression linéaire entre la mesure et la simulation sont montrées sur les graphes (b) et (d) respectivement pour le 23 août et 24 août.

En résumé, nous pouvons dire que le modèle a été validé par les observations avec des coefficients de corrélation supérieurs à 98% pour le potentiel global. Nous pourrions ensuite faire confiance à ce modèle pour simuler le potentiel direct normal et diffus pour lequel nous ne disposons pas encore d'observation in-situ au Tchad.

5. Utilisation du code STREAMER pour évaluer l'impact des aérosols et de la vapeur d'eau sur le rayonnement global, direct normal et diffus à N'Djaména

Dans cette partie, nous utilisons le modèle STREAMER pour simuler l'irradiation directe normale et diffuse. Pour cela, seules les journées poussiéreuses et nuageuses sont utilisées pour évaluer l'impact des aérosols et des nuages sur ces rayonnements. Pour chaque jour, deux simulations ont été réalisées, une première (avec aérosol ou avec nuage) et une seconde (sans aérosol ou sans nuage).

La figure 26 présente les simulations de potentiel solaire diffus (à gauche) et direct (à droite) pour les deux journées poussiéreuses respectivement le 29 octobre (a et b) et le 1^{er} avril (c et d). Deux simulations sont effectuées pour chacune de ces deux journées une sans aérosol (avec une épaisseur optique de 0) et une autre avec une épaisseur optique de 2.87 (et/ou de 2.05) mesurée par le capteur MODIS au-dessus de N'Djamena. Cette figure montre que l'augmentation de l'aérosol (AOD) entraîne une diminution de l'irradiation directe normale (b) et une augmentation de l'irradiation diffuse (a).

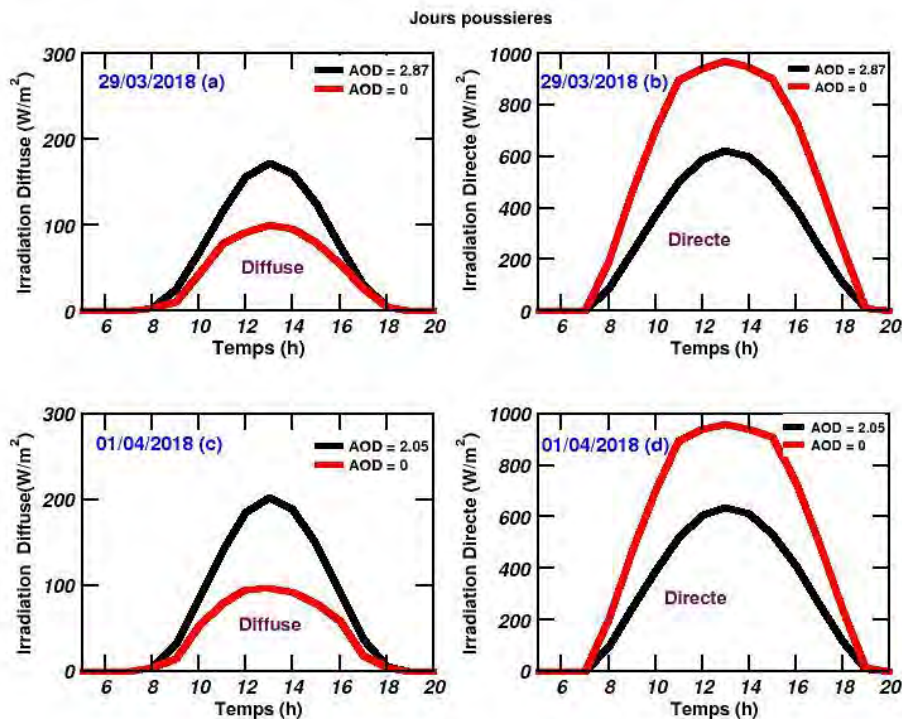


Figure 26: Simulation diurne des flux diffus et direct avec le code STREAMER en faisant varier la valeur de l'AOD pour 29 mars (AOD=0 en rouge et AOD = 2.87 en noir) et 1er avril (AOD = 0 en rouge et AOD = 2.05 en noir).

Le tableau 8 résume l'impact de la présence d'aérosol (AOD) sur le potentiel diffus, direct normal et global pour le 1^{er} avril 2018 à N'Djamena. Globalement, si l'AOD passe de 0 (sans aérosol) à 2.05, le potentiel solaire global diminue de 3.17 kWh/m²/j, le diffus augmente de 0.52 kWh/m²/j et le directe normale diminue de 3.33 kWh/m²/j. Ces aérosols sont généralement composés de poussières désertiques au Tchad et tendent à rétrodiffuser le rayonnement vers l'espace.

Tableau 8: Effet quotidien de la poussière sur le potentiel solaire disponible (direct, diffus et global) pour la journée du 1er avril 2018 à N'Djamena.

Date	Potentiel direct (kWh/m ² /j)	Potentiel diffus (kWh/m ² /j)	Potentiel global (kWh/m ² /j)
2018/04/01 (AOD = 0)	7.78	0.60	8.47
2018/04/01 (AOD = 2.5)	4.45	1.12	5.57
Différence	3.33	-0.52	3.17

La figure 27 montre les simulations de potentiel solaire diffus (à gauche) et direct (à droite) pour les deux journées nuageuses respectivement les 23 août (a et b) et le 24 août (c et d). Deux simulations sont effectuées pour chacune des deux journées: une sans nuage c'est-à-dire pas d'eau précipitable (Wp de zéro) et une autre avec l'eau précipitable (Wp de 5.82 cm et Wp de 5.7cm) quotidienne mesurée par le capteur MODIS au-dessus de N'Djamena. Cette figure montre que l'augmentation d'eau précipitable provoque une diminution de l'irradiation directe normale (b) et une augmentation de l'irradiation diffuse (a). Par exemple, pour le jour du 23 août 2018, la présence de poussière (Wp = 5.82 cm) a entraîné une diminution de 0.73 et de 1.74 kWh/m²/j, respectivement, pour le potentiel direct normal et global. L'eau précipitable entraîne également une augmentation du potentiel diffus de 0.89 kWh/m²/j.

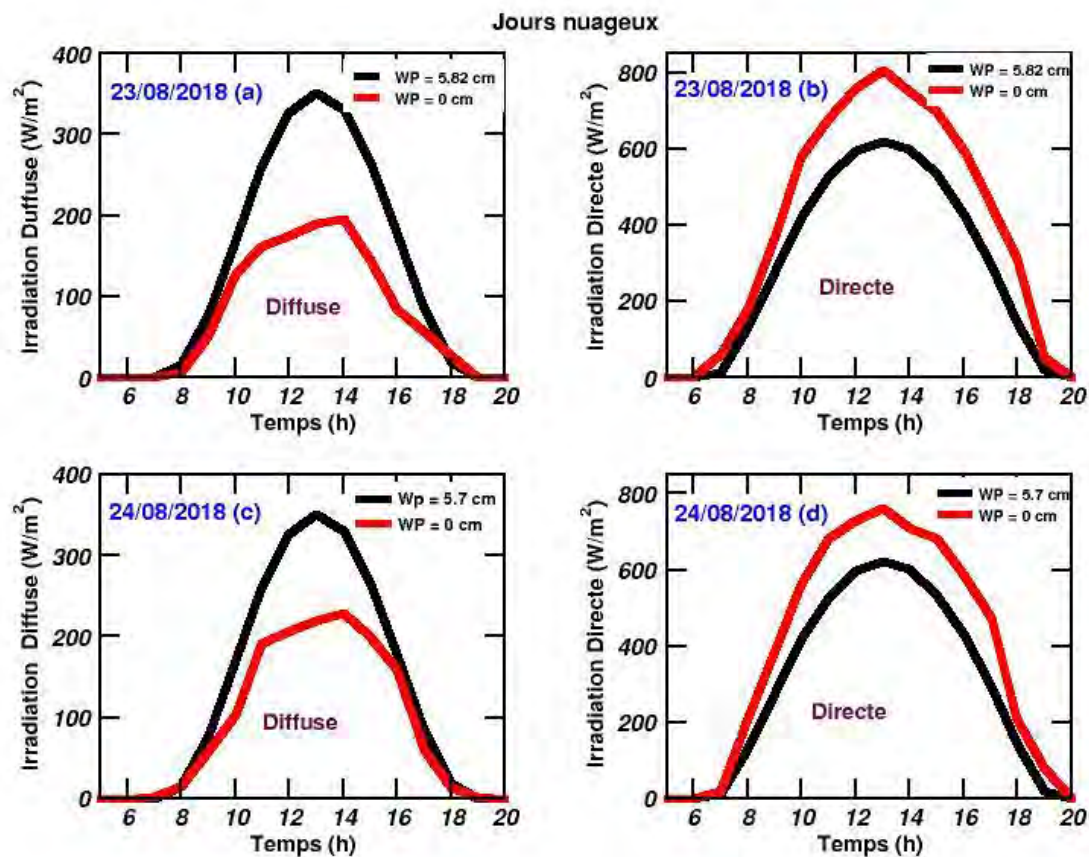


Figure 27: Simulation du cycle diurne des flux direct (droite) et diffus (gauche) avec le code STREAMER en faisant varier la valeur de la vapeur d'eau pour le 23 août ($W_p = 0$ cm en rouge et $W_p = 5.28$ cm en noir) et 24 août ($W_p = 0$ cm en rouge et $W_p = 5.7$ cm en noir).

Le tableau 9 résume l'impact des nuages sur le potentiel diffus, direct et global pour le 23 août 2018 à N'Djamena. Globalement, si l'eau précipitable passe de 0 à 5.82 cm, le potentiel solaire global diminue de $0.73 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$, le diffus augmente de $0.89 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$, et la diminution du direct normal de $1.74 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$. Ces nuages sont généralement composés de vapeur d'eau qui tendent à rétrodiffuser le rayonnement vers l'espace. Ces nuages convectifs (présents pendant la saison des pluies) réfléchissent le rayonnement incident vers l'espace, réduisant ainsi l'énergie solaire disponible à la surface de la terre.

Tableau 9: Effet quotidien de la présence des nuages sur le potentiel solaire disponible (direct, diffus et global) le 23 aout 2018 à N'Djamena.

Date	Potentiel direct (kWh/m ² /j)	Potentiel diffus (kWh/m ² /j)	Potentiel global (kWh/m ² /j)
2018/08/23 (Wp = 0 cm)	6.35	1.19	7.42
2018/08/23 (Wp = 5.82 cm)	4.61	2.08	6.69
Différence	1.74	-0.89	0.73

6. Bilan et conclusion

Cette étude consiste à évaluer le potentiel d'énergie solaire disponible par des observations et des simulations à N'Djamena au Tchad. Les observations ont permis d'évaluer le potentiel global avec une moyenne annuelle de 4.71 kWh/m²/j. La saison la plus favorable (en termes de potentiel global) va de mars à novembre. Cependant, l'hiver (de décembre à février) se caractérise par un minimum de 3.86 kWh/m²/j de potentiel solaire global. Ensuite, le code de transfert radiatif STREAMER a été validé par les mesures du rayonnement global à N'Djamena avec un coefficient de corrélation supérieur à 98%. Puis, le code STREAMER a été utilisé pour simuler l'irradiation directe normale et diffuse sur plusieurs types de journées. Un examen de l'influence de la poussière (ou des nuages) sur le rayonnement solaire basé sur des cas de quatre (04) journées sélectionnés indique une diminution significative du potentiel solaire direct et global en présence de poussière ou de nuage. Par exemple, pour le 1^{er} avril 2018, la présence de poussière avec une épaisseur optique égale à 2.05 a entraîné une diminution de 3.33 et 3.17 kWh/m²/j, respectivement, pour le potentiel direct normal et global. Cette poussière a également entraîné une augmentation du potentiel diffus de 0.52 kWh/m²/j. Pour le 23 août, la présence des nuages (avec une vapeur d'eau égale à 5.82 cm) entraîne une diminution de 1.74 et 0.73 kWh/m²/j, respectivement, pour le potentiel direct normal et global dont une augmentation de 0.89 kWh/m²/j du potentiel diffus.

CHAPITRE 5 : UTILISATION DES REANALYSES ERA5 POUR REPRESENTER LE POTENTIEL D'ENERGIE SOLAIRE AU TCHAD EN 2018

1. Introduction

Pour représenter le potentiel d'énergie solaire sur toute l'étendue du territoire tchadien, nous utilisons les réanalyses atmosphériques ERA5 du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT/ECMWF). Pour cela, les principales zones climatiques du Tchad ont été identifiées. La figure 28 représente la carte du Tchad avec ces dernières en fonction du régime pluviométrique (isohyètes) [103].

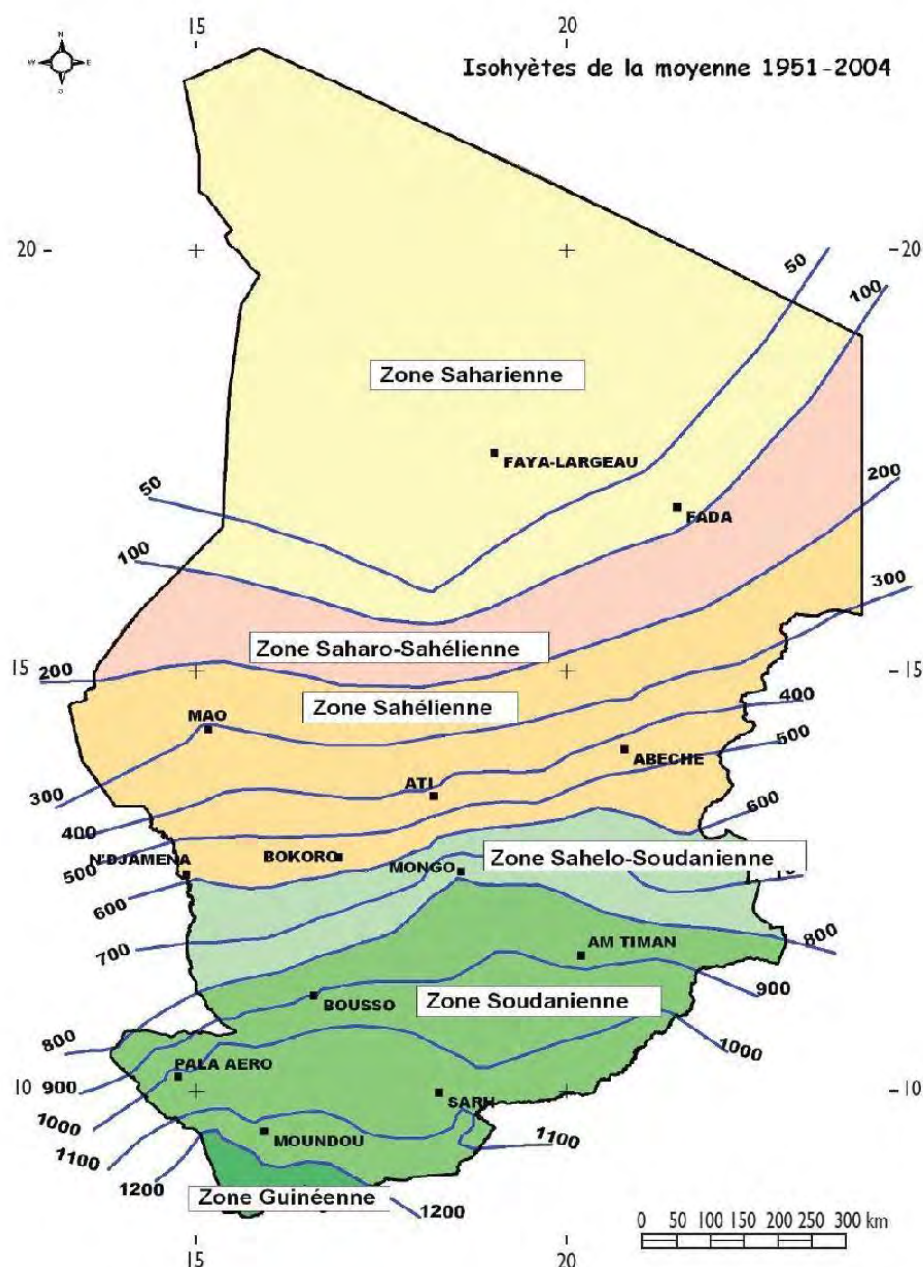


Figure 28: Carte climatique et pluviométrique du Tchad [103]

En parcourant le pays du Nord au Sud, on passe par une succession de six (06) zones climatiques avec des caractéristiques différentes. D'abord, il y'a la zone saharienne qui est située en région désertique et caractérisée par une faible pluviométrie (50 à 100 mm) par an. Ensuite, la zone saharo-sahélienne (zone de transition) reçoit entre 100 mm et 200 mm par an. Après, la zone sahélienne est caractérisée par une pluviométrie annuelle entre 200 et 600 mm de pluies réparties de juin à septembre. La quatrième zone est une zone de transition entre la zone sahélienne et soudanienne (sahélo-soudanienne). Sa pluviométrie varie entre 600 mm et 800 mm par an. L'avant dernière zone est la zone soudanienne avec 800 à 1 000 mm de précipitations annuelles entre avril et octobre. Et enfin la zone soudano-guinéenne située à l'extrême sud, de tendance agricole à agro-pastorale, avec une pluviométrie variant entre 1000 et 1200 mm par an.

L'approche utilisée dans cette partie de la thèse, consiste à choisir des localités représentatives dans chacune des six (06) zones climatiques. Le tableau 6, représente les localités choisis pour chaque zone climatique. Nous avons choisi au minimum 2 localités par zone climatique. On a eu au total vingt (20) localités sur lesquels, une étude poussée sera effectuée. Premièrement, nous avons la zone saharienne, qui est constituée de quatre (04) localités, qui sont entre et autre Aouzou (17.42°N, 21.82°E), Zouar (16.25°N, 20.45°E), Ounianga-Kébir (20.5°N, 19.06°E) et Faya-Largeau (19.10°N, 17.93°E). Ensuite, la zone saharo-sahélienne est composée de deux (02) localités qui sont Salal (17.22°N, 14.84°E) et Arada (20.67°N, 15.02°E). La troisième zone (sahélienne) compte quatre (04) localités qui sont Mao (15.31°N, 14.12°E), Abéché (20.83°N, 13.84°E), Ati (18.33°N, 13.22°E) et N'Djamena (15.07°N, 12.13°E). La zone sahélo-soudanienne comprend Mongo (18.68°N, 12.18°E), Mangalmé (19.61°N, 12.35°E) et Goz-Beida (21.41°N, 12.22°E). Nous avons les localités comme Sarh (18.38°N, 09.15°E), Moundou (16.08°N, 08.60°E), Amti-man (20.28°N, 11.03°E) et Pala (14.97°N, 09.35°E) dans la zone soudanienne. Et enfin, la zone guinéenne est constituée de trois (03) localités qui sont Maro (18.77°N, 08.48°E), Goré (16.64°N, 07.93°E) et Baibokoum (15.7°N, 07.77°E).

Tableau 10: Coordonnées géographiques de vingt (20) localités du Tchad choisis pour l'étude avec les zones climatiques correspondantes.

Villes	Latitudes	Longitudes	Zone
Aouzou	21.82° N	17.42° E	Saharienne
Zouar	20.45° N	16.52° E	
Ounianga Kébir	19.06° N	20.50° E	
Faya-largeau	17.93° N	19.10° E	
Salal	14.84° N	17.22° E	Saharo-sahélienne
Arada	15.02° N	20.67° E	
Mao	14.12° N	15.31° E	Sahélienne
Abéché	13.84° N	20.83° E	
Ati	13.22° N	18.33° E	
N'Djaména	12.13° N	15.07° E	
Mongo	12.18° N	18.68° E	Sahélo-soudanienne
Mangalmé	12.35° N	19.61° E	
Goz Beïda	12.22° N	21.41° E	
Sarh	09.15° N	18.38° E	Soudanienne
Moundou	08.60° N	16.08° E	
Amti-man	11.03° N	20.28° E	
Pala	09.35° N	14.97° E	
Maro	08.48° N	18.77° E	Guinéenne
Goré	07.93° N	16.64° E	
Baibokoum	07.77° N	15.70° E	

2. Validation du rayonnement global d'ERA5 sur la station de N'Djaména en 2018

Avant d'utiliser les données de réanalyses ERA5 sur le Tchad, une validation de ces dernières avec les observations est nécessaire. Les seules données in-situ de rayonnement global existant au Tchad sont celles mesurées à N'Djaména entre 2017 et 2018. La figure 29, représente la régression linéaire entre ces données in-situ et celles issues des réanalyses ERA5. On constate que, la mesure du rayonnement global valide plus ou moins la réanalyse ERA5 avec un coefficient de corrélation de près de 85%.

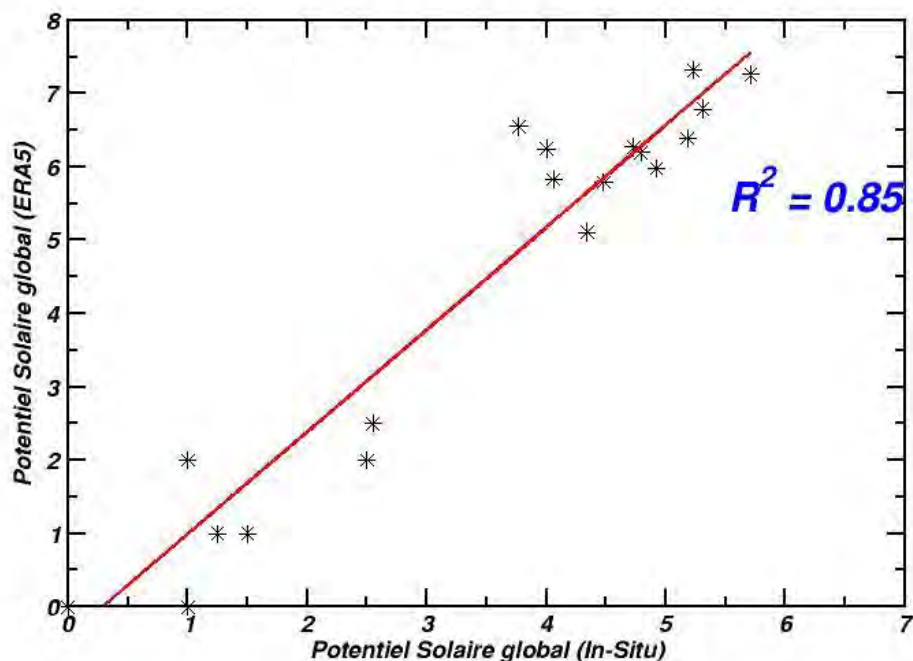


Figure 29: Corrélation entre le potentiel solaire global issu des mesures in-situ et des Ré-analyses ERA5.

Après validation de cette réanalyse pour les observations, la suite du travail consistera à utiliser ces données ERA5 pour représenter l'évolution mensuelle du rayonnement global, direct normal et diffus dans tout le pays.

3. Représentation mensuelle du potentiel global, direct normal et diffus par ERA5 sur le Tchad en 2018

3.1 Evolution mensuelle du potentiel global

La figure 30 illustre l'évolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire global issue des réanalyses ERA5 en 2018 au Tchad. D'abord, on constate que ce potentiel varie entre 4.8 à 8.1 kWh/m²/j. Après, on note deux régions distinctes en terme de ce potentiel. Il s'agit de la zone nord situé entre les latitudes 24°N et 16°N et de la zone sud de latitudes entre 16°N et 7°N. On observe les maxima du potentiel global au printemps (mars, avril, mai) avec des valeurs autour de 8 kWh/m²/j au nord et de 6.6 kWh/m²/j au sud du pays pendant la saison sèche. Les minima s'observent en été (juin, juillet et août) au sud avec des valeurs d'environ 5.25 kWh/m²/j. Cela peut être dû à la couverture nuageuse (saison des pluies). Alors qu'au

nord, les minima autour de 5.4 kWh/m²/j sont enregistrés en hiver (de décembre à février) probablement dû à la position du soleil (position solaire très haute).

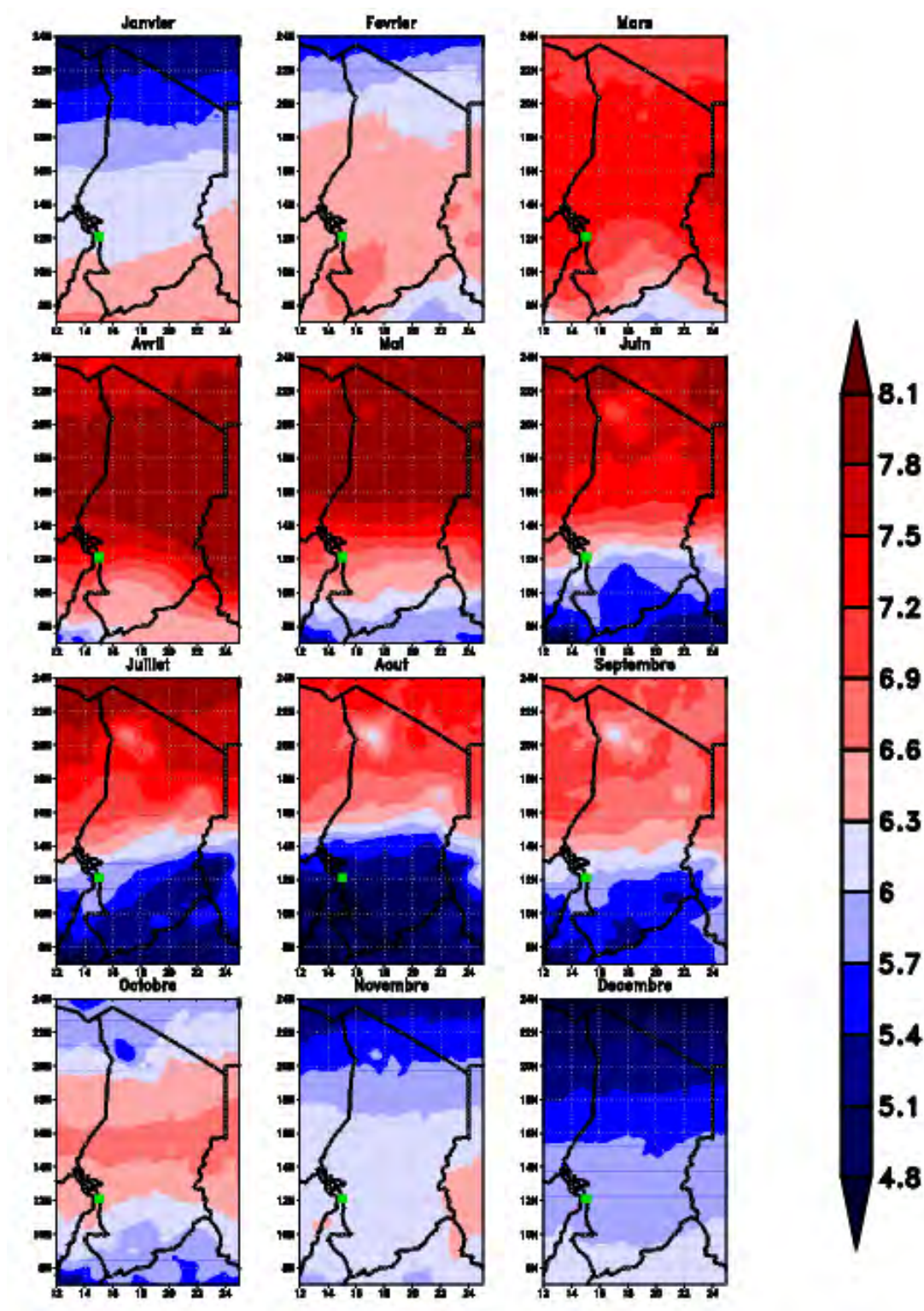


Figure 30: Représentation mensuelle du potentiel d'énergie solaire global par les Réanalyses ERA5 en 2018 au Tchad.

3.2 Evolution mensuelle du potentiel direct

La figure 31 présente l'évolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire direct issue des réanalyses ERA5 en 2018 au Tchad.

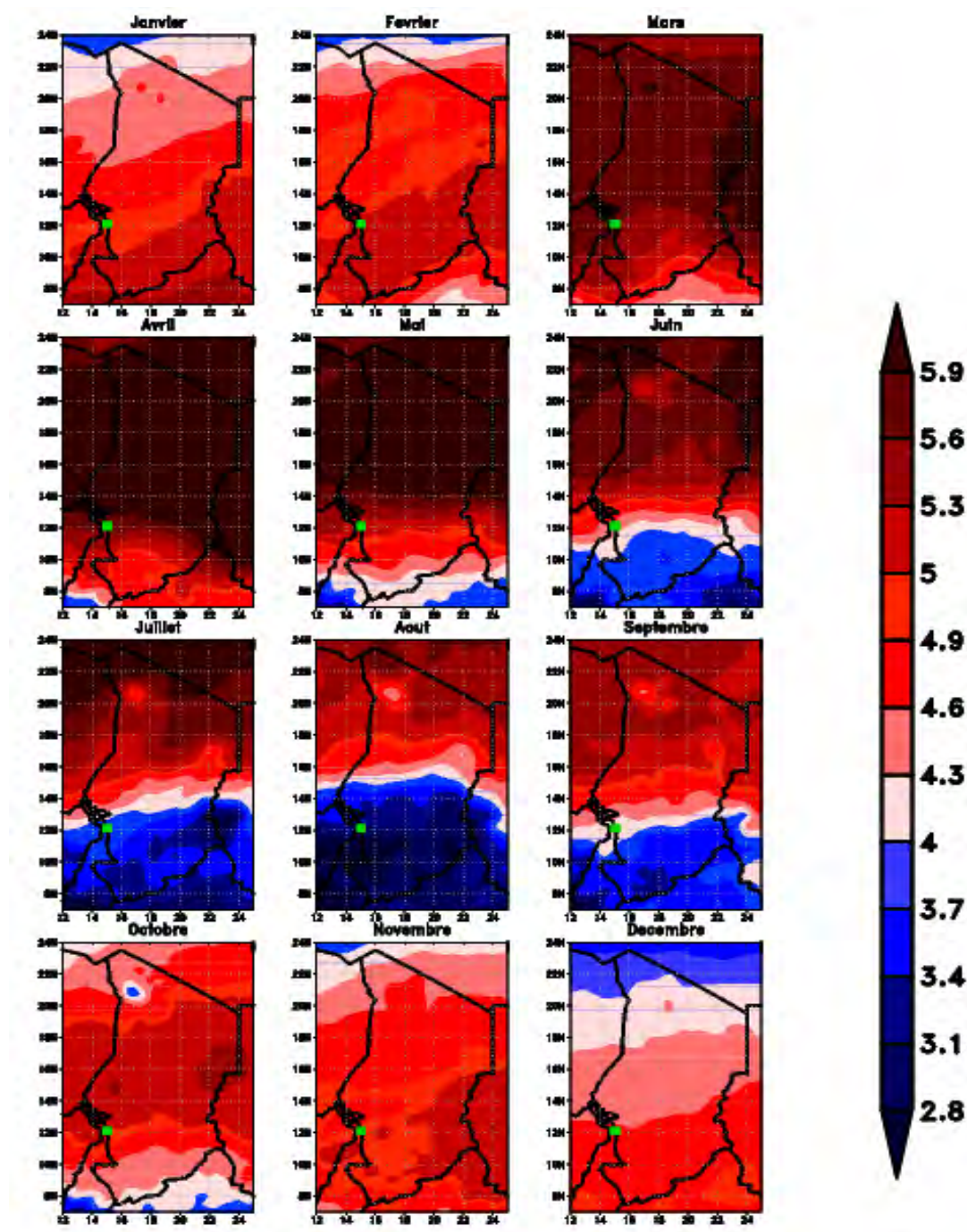


Figure 31: Représentation mensuelle du potentiel d'énergie solaire direct par les Réanalyses ERA5 en 2018 au Tchad.

Le premier constat est que ce potentiel varie entre 2.8 à 5.9 kWh/m²/j. Comme pour le global, le gradient nord-sud est clairement visible avec une frontière vers 12°N. La zone nord se situe entre 24°N et 12°N et la zone sud entre 12°N et 7°N. Les maxima sont enregistrés au printemps (mars, avril, mai) avec des valeurs autour de 5.65 kWh/m²/j au nord et de 4.9 kWh/m²/j au sud du pays pendant la saison sèche. Les minima s'observent en été (juin, juillet et août) au sud avec des valeurs d'environ 4.15 kWh/m²/j peut être dû à la couverture nuageuse (saison des pluies). Alors qu'au nord, les minima sont notés en hiver avec des valeurs autour de 4.12 kWh/m²/j sont surtout dus à la position haute du soleil pendant cette saison.

3.3 Evolution mensuelle du potentiel diffus

La figure 32 représente l'évolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire diffus par les réanalyses ERA5 en 2018 au Tchad. A première vue, on constate que ce potentiel varie entre 0.95 à 2.25 kWh/m²/j. Ensuite, nous observons les maximums du potentiel diffus avec des valeurs autour de 2.15 kWh/m²/j en été (juin, juillet et août) dans le sud entre 16°N et 7°N. Cela est dû à la saison pluvieuse (couverture nuageuse). Pendant la saison sèche, en hiver (décembre, janvier et février) au nord entre 24°N-16°N, Les minima sont d'environ 1.15 kWh/m²/j. C'est certainement dû à la position du soleil qui est très haut. Enfin, au printemps nous enregistrons en moyenne 1.75 kWh/m²/j de potentiel diffus cela est lié à la circulation des poussières désertiques (phénomènes de mousson et de l'harmattan) au Tchad en cette saison.

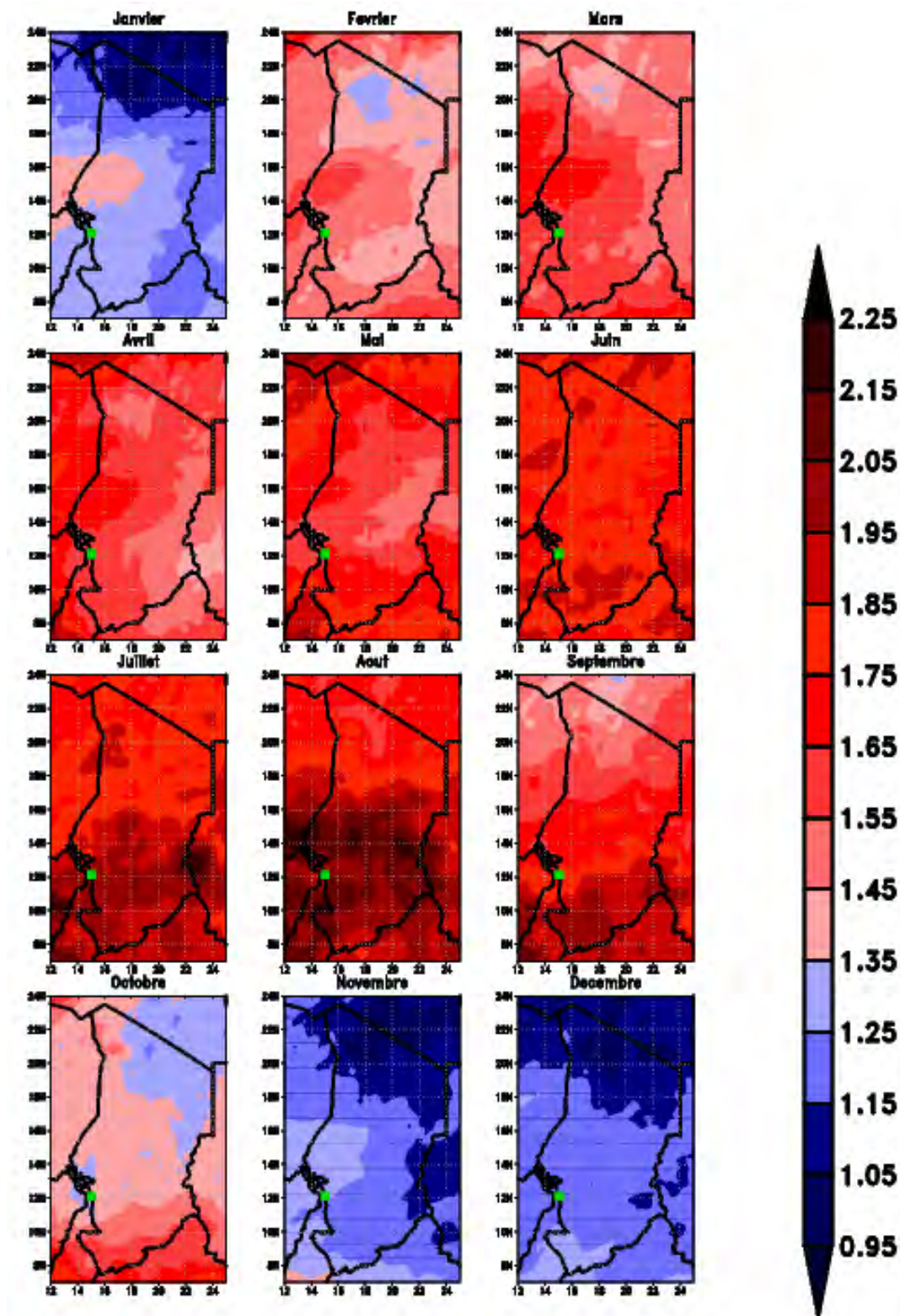


Figure 32: Représentation mensuelle du potentiel d'énergie solaire diffus par les Réanalyses ERA5 en 2018 au Tchad.

4. Répartition par zone climatique du potentiel solaire au Tchad

La figure 33 représente la répartition zonale de potentiel solaire global au Tchad. D'abord, on note qu'il y'a une variabilité saisonnière très marquée du potentiel solaire global dans les six (06) zones. Les maxima sont observés au printemps pendant la saison sèche entre mars et mai avec des valeurs de 7.93, 7.83, 7.67, 7.5, 6.62 et 6.31 kWh/m²/j respectivement pour les zones saharo-sahélienne, saharienne, sahélienne, sahélo-soudanienne, soudanienne et guinéenne. De même que, les minima sont notés en août en pleine saison dans toutes les zones sauf pour la zone saharienne et la zone saharo-sahélienne. Pour ces deux (02) zones, les minima sont surtout enregistrés en hiver (décembre-janvier-février). Globalement, on note que plus on va vers le nord plus le potentiel global augmente.

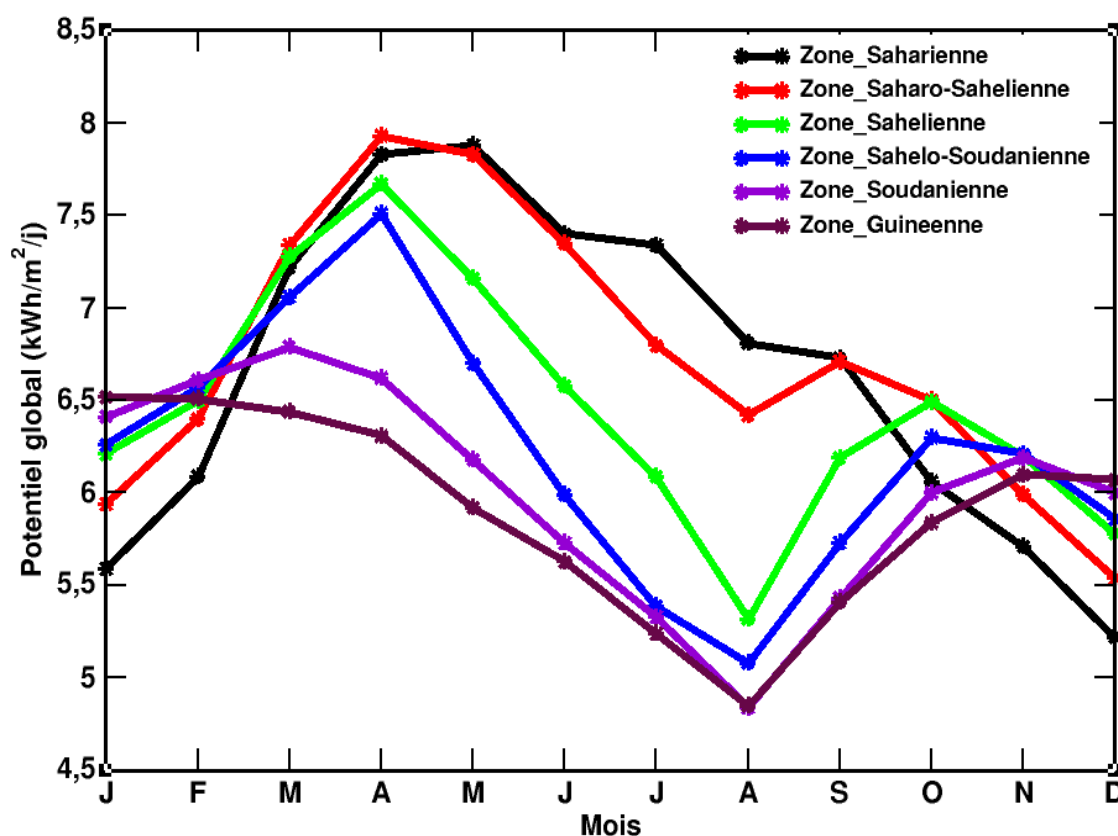


Figure 33: Evolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire global par zone climatique en 2018.

La figure 34 illustre l'évolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire direct en fonction des zones climatiques. On remarque une variabilité spatiale (zonale) et temporelle (saisonnière) très marquée. En effet, on note que plus on se déplace vers le nord, plus le potentiel direct augmente. Les potentiels dans les zones nord du pays sont supérieurs à celles des zones du

sud. Ensuite, les maxima sont presque partout enregistrés pendant la saison sèche d'octobre en mai. Et les minima pendant la saison des pluies de juin à septembre probablement dus à la présence de nuages et de poussières qui ont tendance à diffuser une bonne partie du rayonnement incident. Cependant, ces minima pendant l'été ne sont pas trop visible dans la zone saharienne qui sont près que dépourvus de systèmes nuageux en été.

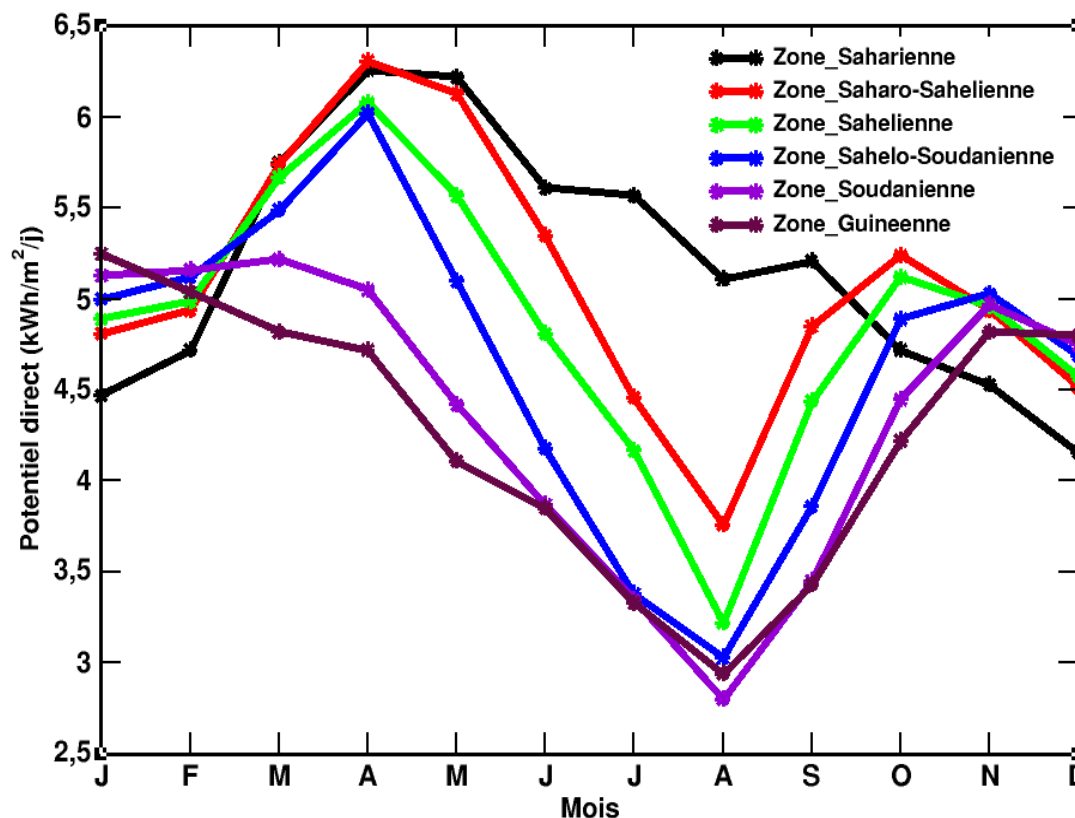


Figure 34: Evolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire direct par zone climatique en 2018.

La figure 35 représente la répartition zonale du potentiel diffus. Contrairement du potentiel direct et global, on remarque uniquement une variabilité saisonnière. En effet, la distribution spatiale est presque partout similaire dans les différentes zones climatiques sauf pendant la saison humide. Du fait de la présence de nuages et d'aérosols qui sont des particules diffusantes, le potentiel diffus augmente considérablement en été. En pleine saison humide, ce potentiel est au maximum pour toutes ces zones climatiques surtout pour celles du sud. Paradoxalement on remarque, ce maximum de diffus est enregistré au mois d'août dans la zone saharo-sahélienne située au nord avec une valeur de plus de $2,6 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$. cela est dû à la combinaison des contributeurs des aérosols et des nuages même s'il y'a plus de nuages au

sud, le nord se caractérise par la présence de quantité de poussières considérables durant cette saison.

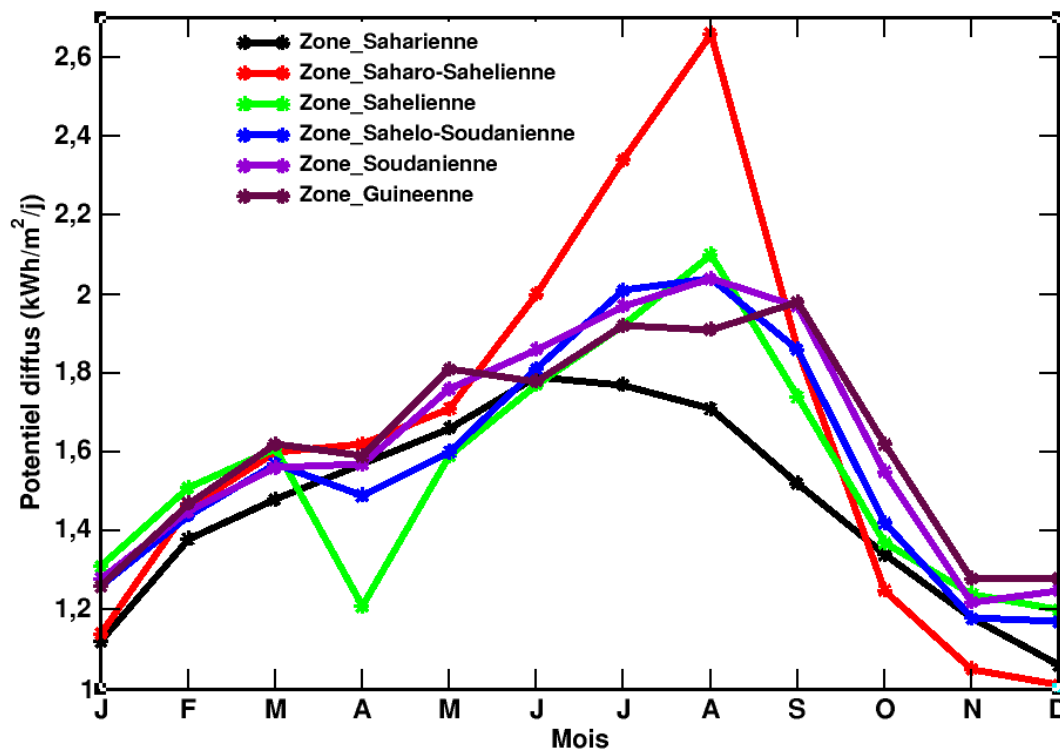


Figure 35: Evolution mensuelle du potentiel d'énergie solaire diffus par zone climatique en 2018.

5. Bilan et conclusion

L'analyse des données de la nouvelle réanalyse ERA5 a permis de représenter les potentiels direct, diffus et global sur toute l'étendue du territoire tchadien. D'abord, cette réanalyse a été validée par les données de rayonnement global de la station de N'Djamena avec un coefficient de corrélation de 85%. Ensuite, ces résultats confirment le gradient nord-sud du potentiel d'énergie solaire. Ainsi, le potentiel global varie de 8.1 kWh/m²/j au nord pendant le printemps à 4.8 kWh/m²/j au sud en été. De même que le potentiel direct normal varie de 5.9 kWh/m²/j au nord en printemps à 2.8 kWh/m²/j au sud en été. Et enfin, le potentiel diffus varie de 2.25 kWh/m²/j au sud en été à 0.95 kWh/m²/j au nord en hiver.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette thèse a été de caractériser la durée d'insolation et le potentiel d'énergie solaire au Tchad. Ceci rentre dans le cadre de l'évaluation du gisement solaire (direct, diffus, globale et insolation) dans un pays où il manque de mesures au sol. Elle s'est appuyée sur l'analyse d'un ensemble d'outils adaptés comme les observations in-situ (durée de l'insolation et les nouvelles mesures du rayonnement global), de la nouvelle réanalyse ERA5 du centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT/ECMWF) et du code de transfert radiatif STREAMER. Les principaux paramètres utilisés ont été la durée d'insolation et l'irradiance globale. Ce travail de thèse a permis de mettre en évidence un certains nombres de résultats intéressants :

Le premier volet de cette thèse a donc porté sur l'évaluation des variations à long terme de la durée d'ensoleillement et à estimer son interaction avec les paramètres météorologiques de 1950 à 2010 au Tchad, en Afrique centrale. Les résultats montrent que le Tchad est l'un des pays les plus ensoleillés au monde. Chaque année, le Tchad reçoit plus de 3031 ± 176.33 heures d'ensoleillement correspondant à 8.9 heures par jour. De même, on note un fort gradient entre le nord et le sud du pays. Par exemple, l'insolation quotidienne est de 10 ± 0.41 heure dans le nord, 8.85 ± 1.1 heure du centre et de 7.75 ± 1.8 heure au sud du pays. De plus, il existe une saisonnalité marquée de la durée d'ensoleillement avec des maxima en saison sèche et des minima en saison des pluies. Les valeurs les plus basses de la durée d'ensoleillement sont en août (moins de 7.5 heures par jour). Cependant, les maximums sont enregistrés de novembre à février avec des valeurs supérieures à 9.5 heures par jour. De plus, l'étude annuelle des anomalies a permis de déterminer trois grandes périodes en termes de variabilité de l'ensoleillement au Tchad. Premièrement, la période allant de 1950 à 1970 (appelée période humide) est caractérisée par les valeurs les plus faibles de durée d'ensoleillement au Tchad. Deuxièmement, entre 1970 et 1990, la région a connu une sécheresse sans précédent qui a entraîné une augmentation de la durée de l'insolation au Tchad. Enfin, la période de retour dite période de 1990 à 2010 se caractérise par des fluctuations rapides de la durée d'insolation d'une année à l'autre. Nous avons également montré qu'il existait une relation directe entre la durée d'insolation et les paramètres météorologiques tels que les précipitations et l'humidité relative. Cependant, les températures de surface sont plutôt liées au changement climatique mondial.

Ensuite, les observations du pyranomètre et les simulations du code de transfert radiatif STREAMER ont permis de caractériser la variabilité saisonnière du potentiel d'énergie solaire sur la station de N'Djamena. Les résultats montrent la présence d'un bon potentiel

solaire global disponible avec un montant annuel de $4.71 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$. L'irradiation globale mesurée a permis de valider le code de transfert radiatif de STREAMER avec un score supérieur à 98%. Par la suite, ce modèle a été utilisé pour simuler l'irradiation directe normale et la diffuse sur plusieurs types de journées (jours clairs, poussiéreux et nuageux). Un examen de l'influence de la poussière sur le rayonnement solaire basé sur des cas sélectionnés ($\text{AOD} = 2.05$) indique une diminution moyenne de 3.17 et $3.33 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$, respectivement, pour le potentiel global et direct normal. Cela correspond à une augmentation du potentiel diffus de $0.52 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$. Enfin, une augmentation de 5.82 cm de l'eau précipitable par jour tend à diminuer le potentiel global de $0.73 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ et le potentiel direct normal de $1.74 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$, donnant ainsi une augmentation de $0.89 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ du potentiel diffus.

Le dernier paragraphe est consacré à l'utilisation des réanalyses ERA5 pour représenter le potentiel d'énergie solaire au Tchad en 2018. Ces réanalyses nous ont permis de représenter les potentiels solaires global, direct normal et diffus sur l'étendue du territoire tchadien. D'abord, ces réanalyses ont été validées par l'irradiation globale à N'Djamena avec un taux de corrélation de 85%. Après validation, elles ont été utilisées sur tout le Tchad. Ensuite, les résultats de cette étude confirment le gradient nord-sud du potentiel d'énergie solaire [104, 105]. Ainsi, le potentiel global varie de $8.1 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au nord pendant le printemps à $4.8 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au sud en été. De même que le potentiel direct normal varie de $5.9 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au nord en printemps à $2.8 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au sud en été. Et enfin, le potentiel diffus varie de $2.25 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au sud en été à $0.95 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ au nord en hiver. L'étude sur les zones climatiques a montré une grande variabilité spatiale et temporelle pour les potentiels global et direct. Cependant, pour le diffus on note uniquement une variabilité temporelle visible surtout en pleine saison de pluie.

Ce travail ouvre la voie à plusieurs perspectives:

La première serait d'approfondir l'étude sur la caractérisation du potentiel solaire sur l'ensemble du territoire. Car l'étude de ce potentiel solaire est limitée par le manque de données récentes à cause de l'absence d'instruments de mesures au sol pouvant couvrir tous les points du Tchad. Ainsi, il serait nécessaire d'initier à cette étude avec des campagnes de mesures in-situ.

Ensuite, étudier l'impact des aérosols sur le potentiel d'énergie solaire, car le Tchad est un pays sahélien qui est soumis à plusieurs types de vents et de particules dont il serait

nécessaire de faire une caractérisation de leurs propriétés optiques et microphysiques pour une quantification de leur impact dans son système climatique. Et enfin, d'étudier l'impact de la durée d'insolation sur les aspects écologiques et environnementaux dans le cadre du développement durable et du changement climatique actuel au Tchad. Il est donc nécessaire de se pencher sur l'évolution climatique des prochaines décennies. Pour ce faire il sera nécessaire et important d'avoir recours à des modèles qui permettront de dire de façon probable quel sera le climat de demain.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Direction Générale de la Météorologie Nationale. Plan d'actions pour la mise en œuvre du cadre national pour les services climatiques (CNSC) du Tchad (2016-2020), Octobre 2016.
- [2] Ministère de l'Environnement et de Pêches. Stratégie Nationale de lutte contre les Changements Climatiques au Tchad, Octobre 2016.
- [3] LY, M., S. B. TRAORE, A. ALHASSANE and B. SARR. (2013). Evolution of Some Observed Climate Extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes* 1: 19 - 25.
- [4] ALHASSANE A.; TRAORE S.B, LAWALI M. N.; SEYBOU O. A. B.; CHAIBOU B.; SARR B. AND SEIDOU O. (2015). Test de la coupe des feuilles et de la transplantation de jeunes plants comme techniques d'adaptation des mils et sorghos à la variabilité des pluies au sahel.
- [5] SARR Benoit (2015). Vulnérabilité des secteurs stratégiques face à différents scénarii de réchauffement climatique en Afrique de l'Ouest et arguments scientifiques pour la limitation du seuil de réchauffement climatique global à 1,5 °C. Notes d'information en vue de la COP21 à Paris. 5p.
- [6] MBAIGUEDEM Miambaye. Etude de vulnérabilité et adaptation des femmes rurales face au changement climatique: Cas du Département du Chari au Tchad. Mémoire de Master en Changement Climatique et Développement Durable. Niamey : Centre Régional AGRHYMET, 2012, 85p.
- [7] Sibiri Judicaël Noël ZONGO. Etude et analyse expérimentale d'une centrale hybride pv/groupe électrogène (diesel ou biocarburant) sans stockage. Mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement. Ouagadougou : Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 2010, 81p.
- [8] MBANAISSSEM Peurdoum Richard. Rapport national du Tchad-SEforALL. https://www.seforall.org/sites/default/files/Chad_RAGA_FR_Released.pdf. Consulter le 17/04/2019.
- [9] Clarence SEMASSOU. Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du Bénin. Thèse de doctorat: mécanique. Bordeaux: Ecole doctorale de Sciences Physiques pour l'Ingénieur, 2011, 224p.

- [10] E. Alsema, A. Patyk. Investigation on Storage Technologies for Intermittent Renewable Energies: Evaluation and recommended R&D strategy. WP Report THEMATIC NETWORK CONTRACT N° ENK5-CT-2000-20336 Deliverable 9, INVESTIRENETWORK WP5 Final report Environmental issues November 2003.
- [11] <http://maplanete.blogs.sudouest.fr/archive/2016/06/13/rechauffement-climatique-gare-aux-energies-fossiles-1049452.html>.
- [12] Pierre PETIT. Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Thèse de doctorat : Systèmes photoniques. Metz : Université de Metz, 2011, 230p.
- [13] Conseil-exécutif au Grand conseil de l'office Fédéral de la Statistique Suisse, Rapport sur l'importance économique des énergies renouvelables. Juillet 2012
- [14] Association pour la Promotion des Energies Renouvelables. www.apere.org/doc/Pourquoi_ER.pdf. Consulter le 17/05/2019
- [15] http://www2.cnrs.fr/image.php?id_media=2220&id_site=18, Les cahiers de Global chances, n°15. Consulter le 17/05/2019.
- [16] I.H. Abdelhamid et al. La promotion des énergies renouvelables: une réponse durable à la problématique énergétique des ménages ruraux au Tchad. Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°1 (2016) 137 – 146
- [17] Griffiths, I.L., The Atlas of African Affairs, Taylor & Francis, 2013 (ISBN 9781135855529, lire en ligne [archive]), p. 15.
- [18] Powell, R., Bowden, D., Tresemer, D., Bento, W., Farrants, W., Gray, B., Dann, K., Paul, L., Lainson, C.M.L. et Nurney, S., Journal for Star Wisdom 2013, Lindisfarne Books, 2012 (ISBN 9781584201366).
- [19] « Sunniest Places and Countries in the World - Current Results » [archive], currentresults.com.
- [20] « A Snapshot of Global PV (1992-2015) » [archive], IEA. [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS - A Snapshot of Global PV - 1992-2015 - Final.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf). (Consulter le 12/03/2019).
- [21] Liu, Z., Global Energy Interconnection, Elsevier Science, 2015 (ISBN 9780128044063, p. 30.

- [22] Liu, Z., Global Energy Interconnection, Elsevier Science, 2015 (ISBN 9780128044063, lire en ligne [archive]), p. 30
- [23] Global Solar Atlas, 06.12.2018. [archive], sur Global Solar Atlas. (Consulter le 6 Décembre 2018).
- [24] Riordan, P., Paul G. Bourget et U.S. Army Engineer Topographic Laboratories, World Weather Extremes, The Laboratories, 1985 (ISBN 9780788115370, lire en ligne [archive]), p. 66.
- [25] Climate and Life, Elsevier Science, 1974 (ISBN 9780080954530, lire en ligne [archive]), p. 151.
- [26] Ingrid_Holford, The Guinness Book of Weather Facts and Feats, illustrée, Guinness Superlatives, 1977, p.16
- [27] Henry Noel Le Houérou, Bioclimatology and Biogeography of Africa, Springer, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 240 pages
- [28] Dunlop, S., A Dictionary of Weather, OUP Oxford, 2008 (ISBN 9780191580055, lire en ligne [archive]).
- [29] Ingrid_Holford, The Guinness Book of Weather Facts and Feats, illustrée, Guinness Superlatives, 1977, 240 p
- [30] Wadsworth, F.H. et United States. Forest Service, Forest Production for Tropical America, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1997 (lire en ligne [archive]).
- [31] Benjamin Pillot. Planification de l'électrification rurale décentralisée en Afrique subsaharienne à l'aide de sources renouvelables d'énergie : le cas de l'énergie photovoltaïque en République de Djibouti. Thèse de doctorat : mécanique des fluides, énergétique, thermique, combustion, acoustique. Corse : université de Corse Pascal Paoli, 2014, 265 p.
- [32] Energie solaire en Afrique.
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_en_Afrique. (consulter le 16 /07/2019).
- [33] L'Afrique n'a pas réussi sa révolution solaire [archive], Les Échos, 14 février 2019.
- [34] P. Bessemoulin, J. Oliiviéri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. La météorologie 8^e série n° 31 septembre (2000), 42-59.

- [35] Zekai ,Sen. Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques, Springer 2008.
- [36] Bent Sorensen. Renewable energy its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects. (3rd ed), Elsevier 2004.
- [37] K. Danel, L. Gautret, « Génération du disque solaire des communes de l'Ouest », ARER, Mars - Août 2008.
- [38] Hai Abdelhakim, Hammadou Souhil : Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et factures météorologiques, 2013.
- [39] Philippe BLANC, Bella ESPINAR, Lucien WALD : La ressource solaire : importance et moyens de caractérisation, 2012.
- [40] BOLHZ (H.) et FRITZ (H.).–Tabellen und Diagramme zur Berechnung der Gegenstrahlung und Ausstrahlung (Tables et diagrammes pour le calcul des rayonnements de l'atmosphère et du sol). 2 met 4, no 10 (1950).
- [41] Sunshine duration . <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sunshine.png>.
- [42] Landsberg, H. E. in Pinna, M. L'atmosfera e il clima, UTET, 1978, p.63.
- [43] Edward Linacre, « Climate Data and Resources: A Reference and Guide », Routledge (London), 1992, 366 pages
- [44] Delmas, R., Megie, G., Peuch, V. H., and Brasseur, G. P. (2005). Physique et chimie de l'atmosph. Echelles.
- [45] Géométrie solaire sur site Internet. <http://www.outilssolaires.com/Glossaire/spin geometrie.htm> (consulté le 22/05/2009).
- [46] Viorel Badescu. Modeling solar radiation at the earth's surface, Springer 2008.
- [47]Nia Mohamed. Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire. Mémoire Master : Energétique et Mécanique des Fluides. Alger : UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2010, 107p.
- [48] Capderou M. Atlas solaire de l'Algérie. Office des publications universitaires, T1-3, 1988.
- [49] G. H. LIN AND M. FUKUSHIMA, Some Exact Penalty Results for Nonlinear Programs and Mathematical Programs with Equilibrium Constraints. JOURNAL OF OPTIMIZATION THEORY AND APPLICATIONS: Vol. 118, No. 1, pp. 67–80, July 2003 (2003)

- [50] David Funk, L'ÉNERGIE SOLAIRE : CIRCONSTANCES ET CONDITIONS D'EXPLOITATION AU QUÉBEC, Sherbrooke, Québec, Canada, janvier 2010, 99 pages
- [51] Davis instrument, 3465 Diablo Avenue, Hayward CA 94545-2778 USA.
- [52] Key J. et A. J. Schweiger, 1998: Tools for atmospheric radiative transfer: Streamer and FluxNet. *Computers & Geosciences*, 24, 443-451.
- [53] Mamadou Simina Drame, Moctar Camara, and Amadou Thierno Gaye. Simulation de l'impact des aérosols sur le rayonnement solaire diurne à Mbour. *La Météorologie*, 2012b. doi : 10.4267/2042/48513.
- [54] R. C. Levy, L. A. Remer, S. Mattoo, E. F. Vermote, and Y. J. Kaufman, "Second-generation operational algorithm : Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance," *J. Geophys. Res.*, vol. 112, pp. 1–21, 2007.
- [55] Y. J. Kaufman, D. Tanr, L. A. Remer, E. F. Vermote, and A. Chu, "Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer After the launch of MODIS the distribution," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, no. 96, pp. 51–67, 1997.
- [56] D. Tanré, Y. J. Kaufman, M. Herman, and S. Mattoo, "Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS / EOS spectral radiances," *J. Geophys. Res.*, vol. 102, no. 3, pp. 16971-16988, 1997.
- [57] L. A. Remer, Y. J. Kaufman., D. Tanré, S. Mattoo, D. A. Chu, J. V. Martins, R. R. Li, C. Ichoku, R. C. Levy, R. G. Kleidman, T. F. Eck, E. Vermote, and B. N. Holben, "The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation," *Am. Meteorol. Soc.*, vol. 62, pp. 947–973, 2005.
- [58] N. C. Hsu, S. Tsay, M. D. King, S. Member, and J. R. Herman, "Aerosol Properties Over Bright-Reflecting Source Regions," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 42, no. 3, pp. 557–569, 2004.
- [59] Hersbach, H.; Dee, D. ERA5 reanalysis is in production. ECMWF Newsletters. April 2016. Number 147. Available online: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/147/news/era5-reanalysis-production> (accessed on 26March 2019).

- [60] B. Ould Bilal, V. Sambou, C. M. F. Kébé, M. Ndong, and P. A. Ndiaye. Etude et modélisation du potentiel solaire du site de nouakchott et de dakar. *Journal des Sciences*, 2007.
- [61] M. Dankassoua, S. Madougou, A. Aboubacar, and A. Foulani. Etude du rayonnement solaire global à niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre). *Revue des Energies Renouvelables*, 2017.
- [62] Alain Ricaud Jan. *Gisement solaire et transferts énergétiques*. Université de CERGY-PONTOISE, 2011.
- [63] Mamadou Drame, Boudy Ould Bilal, Moustar Camara, Vincent Sambou, and Amadou Gaye. Impacts of aerosols on available solar energy at mbour, senegal. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2012a. doi : 10.1063/1.3682078.
- [64] Standardized Precipitation Index User Guide (M. Svoboda, M. Hayes and D. Wood). (WMO-No. 1090), Geneva.
- [65] Persistence of Subsaharan drought. *Nature*. (299), 46-47.
- [66] The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.
- [67] Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, In: *proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas, 15-20 January. Boston American Meteorological Society, 233-236.
- [68] PERRIN DE BRICHAMBAUT C., 1963 : Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels. Gauthier-Villars Ed., PARIS, 301 pp.
- [69] PERRIN DE BRICHAMBAUT C., 1978: Estimation du rayonnement solaire. Direction de la Météorologie Ed., Paris.
- [70] Ranzi, R., Rosso, R. Distributed estimation of incoming direct solar radiation over a drainage basin. *J. Hydrol.* 1995, 166, 461–478. [CrossRef] .
- [71] Pandey V., Pandey PK., Mahanta AP (2014) Calibration and performance verification of Hargreaves-Samani equation in a humid region. *Irrig Drain* 63:659–667. doi:10.1002/ird.1874.

- [72] Pandey PK., Dabral PP., Pandey V (2016) Evaluation of reference evapotranspiration methods for the northeastern region of India. *Int Soil Water Conserv Res* 4:52–63. doi:10.1016/j.iswcr. 2016.02.003.
- [73] Murthy, V.R.K. Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology. *Satell. Remote Sens. GIS Appl. Agric. Meteorol.* 2011, 1, 235–261.
- [74] Wang, L., Gong, W., Ma, Y., Zhang, M. Modeling regional vegetation NPP variations and their relationships with climatic parameters in Wuhan, China. *Earth Interact.* 2013, 17, 1–20. [CrossRef].
- [75] Wang, H., Liu, D., Lin, H., Montenegro, A., Zhu, X. NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan plateau. *Int. J. Climatol.* 2015, 35, 687–698.
- [76] Hassane Babikir, M., Njomo, D., Khayal, M.Y., Temene, H.D. and Joel, D.T. (2018) Estimation of Direct Solar Radiation of Chad. *Energy and Power Engineering*, 10, 212-225. <https://doi.org/10.4236/epe.2018.105015>.
- [77] Yang Y, Y.H., Zhao, N., Hao, X.H., Li, C.Q. Decreasing trend of sunshine hours and related driving forces in North China. *Theor. Appl. Climatol.* 2009, 97, 91–98.
- [78] Lenuta, M., Marius-Victor, B., Roxana, B., Alexandru, D., Magdalena, M.D., Ancuta, M. An overview of annual climatic changes in Romania: Trends in air temperature, precipitation, sunshine hours, cloud cover, relative humidity and wind speed during the 1961–2013 period. *Carpathian J. Earth Environ.* 2014, 9, 253–258.
- [79] Dobesch, H. On the variations of sunshine duration in Austria. *Theor. Appl. Climatol.* 1992, 46, 33–38.
- [80] Sanchez-Lorenzo, A., Calbo, J., Martin-Vide, J. Spatial and Temporal Trends in Sunshine Duration over Western Europe (1938–2004). *J. Clim.* 2008, 21, 6089–6098. [CrossRef].
- [81] Bedoum A., C. Bouka Biona, Alladoum B., Issak A., Laohoté B. (2013) : Variabilités climatiques et ruptures dans les séries des précipitations en République du Tchad, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 21&22 (2013) 187-208.

- [82] Maharana, Pyarimohan, Abdel-Lathif, Ahmat Younous; Pattnayak, Kanhu Charan (2018) Observed climate variability over Chad using multiple observational and reanalysis datasets ; Global and Planetary Change, Volume162, p. 252-265, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.013>.
- [83] Lebel T., Amani A., Cazenave F., Lecocq J., Taupin J. D., Elguero E., Greard M., Le Barbe L., Laurent H., D'Amato N., Robin J., 1996. La distribution spatio-temporelle des pluies au Sahel : apport de l'expérience EPSAT-Niger, Mélanges à la mémoire de Jean Rodier, Publication AISH, n°238, 77 – 98.
- [84] LEBEL T., Ali A. (2009) - Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). Journal of Hydrology, vol. 375, n° 1-2, p. 52-64.
- [85] Nicholson S.E., (1998). Interannual and interdecadal climate variability of rainfall over African continent during the last two centuries. In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds): Water Resources Variability in Africa during the XXth Country. Proceedings de la Conference Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, pub. AISH. n° 252, pp. 107-116.
- [86] Nicholson S.E, Some B and Kone B., 2000: An analysis of recent year analysis of rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 Niña years. Journal of climate 13: 2628-2640.
- [87] Nicholson S.E., 2000: Land surface processes and Sahel climate. Review of Geophysics, 38, 117-139.
- [88] Bigot S., Moron V., Melice J.-L., Servat E., Paturel J. E., (1998). Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. In Servat E., Hugues D., Fritsch J.M., Hulme M. (Eds): Water Resources Variability in Africa during the XXth Country. Proceedings de la Conference Abidjan'98, ORSTOM/AISH/UNESCO, publ. AISH. n° 252, pp. 71-78.
- [89] Mahe G., et al., (2001) Trends and discontinuities in the regional rainfall of West and Central Africa.1951-1989, Hydrol. Sci. J., 46, 211-226.
- [90] Malhy Y., Wright J., (2004) Spatial patterns and recent trends in the climate of tropical rainforest regions. Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B, 359, 311-329.

- [91] Guenang G. M., F. Mkankam Kamga. (2012) Onset, retreat and length of the rainy season over Cameroon. *Atmos. Sci. Let.* 13: 120–127 (2012) DOI: 10.1002/asl.371.
- [92] Redelsperger, J.(2002). Le livre blanc. [http ://amma.mediasfrance.org/france/index](http://amma.mediasfrance.org/france/index).
- [93] McKee, TB., Doesken NJ., Kleist J. (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, 17–22 January 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.
- [94] McKee TB, Doesken NJ., Kleist J. (1995) Drought monitoring with multiple time scales. Preprints, In: *proceedings of the 9th Conference one Applied Climatology*, Dallas, Texas, 15-20 January. Boston American Meteorological Society, 233-236.
- [95] Ali A., Lebel T. (2009) The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatolology*, vol. 29, p. 1705-1714.
- [96] Dai A., Trenberth K.E., Qian T. (2004) A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *National Center for Atmospheric Research*, vol. 5, p. 1117-1130.
- [97] Hubert, P., Carbonnel, I. P. (1987) Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.* 95, 165-183.
- [98] Hubert, P., Carbonnel, J. P., Chaouche, A. (1989) : Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'ouest. *J. Hydrol* 10, 349-367.
- [99] Giannini, A., M. Biasutti, I. M. Held, A. H. Sobel, (2008) A global perspective on African climate. *Climatic Change*, 90, 359–383, <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9396-y>.
- [100] Ministère de l'Hydraulique Urbaine et Rurale. La seconde communication nationale du Tchad sur les changements climatiques. Juin 2012.
- [101] Ministère de l'Environnement et de l'Eau. Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). Août 2001.
- [102] M. Dankassoua, S. Madougou, A. Aboubacar, and A. Foulani. Etude du rayonnement solaire global à Niamey de la période de pré-mousson et de la mousson de l'année 2013 (mai à octobre). *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 20 N°1 (2017) 131 - 146.

[103] VIATTE Camille. Etude de l'impact radiatif des aérosols dans la couche limite planétaire. Mémoire de master, Université de Versailles, Saint-Quentin-en-Yvelines, 2007.

[104] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Mise en œuvre de la REDD+ au Tchad : Feuille de route pour le développement d'une approche nationale en matière de garanties REDD+ et analyse des risques et bénéfices sociaux et environnementaux liés à la REDD+. Septembre 2016.

[105] Saka Goni, Haroun Ali Adannou, Dialo Diop, Mamadou S. Drame, Bienzeube Tikri, Mahamat Barka, Aboubaker Cheidikh BEYE : "Long-term variation of sunshine duration and their inter-action with meteorological parameters over Chad, central Africa", Natural Resources Vol.10 No.3 DOI: 10.4236/nr.2019.103004, 2019.

ANNEXES

Annexe A : Publications scientifiques au cours de la thèse

Liste des Publications

- [1] **Saka Goni**, Haroun Ali Adannou, Dialo Diop, Mamadou S. Drame, Bienzeube Tikri, Mahamat Barka, Aboubaker Cheidikh BEYE : “Long-term variation of sunshine duration and their inter-action with meteorological parameters over Chad, central Africa”, **Natural Resources** Vol.10 No.3 DOI: 10.4236/nr.2019.103004, 2019.
- [2] **Saka Goni**, Haroun Ali Adannou, Dialo Diop, Adoum Kriga, Mahamout Youssouf Khayal, Bado Nebon, Aboubaker Cheidikh BEYE, Serigne Abdoul Aziz Niang, Mamadou S. Drame :” Observation and simulation of available solar energy at N°Djamena, Chad”. **Smart Grid and Renewable Energy**, Vol.10 No.6 DOI: 10.4236/sgre.2019.106011 Jun. 26, 2019
- [3] Haroun Ali Adannou, **Saka Goni**, Mahamat Bichara Abderaman, Mahamoud Youssouf Khayal, Ache Abouya Khamis, Moulaye Aidara, Talla Kharouna, Aboubaker Chedikh Beye : ,,” Influence of Climate Temperature on the Valorization of Dung-Wastewater Slaughterhouse Biogas in Two Regions: In Chad and Senegal””, **Natural Resources** Vol.10 No.4 DOI: 10.4236/nr.2019.104006, 2019.
- [4] Haroun Ali Adannou, **Saka Goni**, Etoungh Dimitri Manga, Mamadou Simina Drame, Lamine Ndiaye, Kharouna Talla, Aboubakar Chedikh Beye :”“Valorization Capacity of Slaughterhouse Waste in Biogas by a Tarpaulin Digester in Dakar, Senegal””, **American Journal of Environmental Protection**. Vol. 8, No. 1, 2019, pp. 22-30. doi: 10.11648/j.ajep.20190801.14

Annexe B: Les différents capteurs intégrés de la station Por2 Plus et ses accessoires.



a. Anémomètre



b. Pluviomètre



c. Pyranomètre



d. Capteurs d'UV



e. Sonde de T°



f. Panneau solaire



g. Console