



Mémoire de Projet de fin d'étude

Préparé par



**BOUNOUA ZINEB**

Pour l'obtention du diplôme

*Master Sciences et Techniques*

*Electronique, Signaux et Systèmes Automatisés*

*(E.S.S.A)*

Intitulé

Etude de l'impact des aérosols sur le rayonnement  
solaire au sol par ciel clair en utilisant le modèle  
McClear de la méthode Heliosat-4

Encadré par :

**Pr A.MECHAQRANE**

**Mr A.GHENNIOUI (GEP)**

Soutenu le **13 Juin 2016**, devant le jury composé de :

**Pr A.MECHAQRANE** .....: Encadrant

**Mr A.GHENNIOUI** .....: Encadrant

**Pr H.GHENNIOUI**.....: Examinateur

**Pr N.S.ECHATOUI** .....: Examinateur



## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont toujours encouragé et soutenu avec amour et patience  
pendant mes études.*

*A ceux qui ont vécu avec moi tout ce temps instant par instant.*

*A ceux auxquels je tiens à présenter mon tout respect et ma grande  
reconnaissance :*

*A mes parents que j'aime tellement.*

*Aucune dédicace ne me serait suffisante pour exprimer la profondeur de  
mon amour.*

*A mes deux sœurs Ghita et Kenza.*

*A mon petit frère Mehdi*

*A toute ma famille (BOUNOUA,ALAMI).*

*A tous mes amis (e) et collègues.*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*A ma promotion du Master Electronique, Signaux et systèmes automatisés  
en témoignage des bons souvenirs passés ensemble !*



## Remerciements

Ce travail n'est jamais une œuvre individuelle, il est le fruit de nombreuses expériences, rencontres, et collaborations.

Aussi, voudrais-je exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des personnes qui ont participé de près ou de loin à ce travail, qui ont croisé ma route, en m'accordant le temps, l'écoute, les conseils, l'expérience et parfois réconfort et m'auront permis à leur manière de progresser, avancer, mûrir, apprendre et à mieux me découvrir.

Tout d'abord, je tiens à exprimer mon immense respect et gratitude à Monsieur N.S ECHATOUI Responsable du master «Electronique, Signaux et systèmes automatisés».

Mes sincères remerciements et aussi les plus profondes, à Monsieur A.MECHAQRANE mon encadrant à la Faculté des Sciences et techniques de Fès pour m'avoir apporté avec son extrême gentillesse et son franc parlé de nombreux conseils et également pour sa totale compréhension et efficacité.

Aussi, je remercierai tout particulièrement Monsieur A. GHENNIQUI responsable du département de modélisation à IRESEN, de m'avoir accepté, évidemment pour son entière disponibilité, mais surtout pour son enthousiasme communicatif et sa bienveillance discrète.

Je ne manquerais pas non plus de remercier les honorables membres du jury qui ont accepté d'évaluer cette soutenance à sa juste valeur, et de me faire part de leurs remarques sûrement pertinentes qui contribueront, sans nul doute, au perfectionnement du présent travail.

Je ne saurai terminer ce préliminaire, sans penser à l'appui et la sollicitude que j'ai toujours trouvé auprès de ma mère, mon père, mes deux sœurs, mon frère et tous mes ami(e)s et collègues.

Enfin, je dédie ce PFE à toi, mon père !

**C'est à DIEU que revient le grand mérite.**



## Résumé

Le rayonnement solaire à la surface de la terre est une donnée très importante pour le dimensionnement et la gestion des systèmes solaires photovoltaïques ou thermiques.

Or, la connaissance exacte de l'énergie solaire incidente sur une surface quelconque en un lieu donné sur terre ne peut se faire que grâce à l'installation d'instruments de mesures dédiés. Beaucoup de stations de mesures existent de par le monde, mais leur densité spatiale reste très insuffisante. C'est pourquoi, on a souvent recours à d'autres solutions pour estimer les composantes du rayonnement solaire au sol.

Parmi ces solutions, la plus importante est celle basée sur l'utilisation images numériques prises par les satellites météorologiques géostationnaires.

Dans le présent projet de fin d'études, nous appliquons le modèle McClear de la méthode Heliosat-4, basée sur les images satellitaires, pour déterminer l'éclairement solaire au sol par ciel clair tout en évaluant l'impact des différents aérosols et les effets atmosphériques dans les trois sites du Maroc MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN.



## Abstract

Solar radiation on the surface of the earth is a very important factor for the design and management of photovoltaic and thermal solar power plants.

However, the exact knowledge of the incident solar energy on any surface in a given place on the earth can be done with special measurement instruments. Many measurement stations exist around the world, but their spatial density remains very insufficient. Therefore, we often recourse to other solutions to estimate solar radiation components on the ground.

Among these solutions, the most important is based on using digital images taken by geostationary meteorological satellites.

In the present project, we apply the McClear model which is the part of the satellite-based Heliosat-4 method for estimating solar radiation at ground level in clear-sky conditions. We also assess the impact of different aerosols on solar radiation in three sites in Morocco MISSOUR, Benguerir and TANTAN.



## Liste des figures

Figure 1 : liste des fondateurs d'IRESSEN [3] .....	14
Figure 2 : Structure D'IRESSEN [4] .....	15
Figure 3 : Les deux missions d'IRESSEN [6] .....	16
Figure 4 : Vue en 3D de la plateforme green energy park Benguerir [2] .....	17
Figure 5 : Distribution spectrale du rayonnement solaire [13].....	20
Figure 6 : Déclinaison solaire en fonction des jours de l'année.....	24
Figure 7 : L'éclairement solaire en fonction des jours de l'année reçu par une surface plane pour les différentes valeurs d'inclinaisons .....	28
Figure 8 : Les trois différents types du rayonnement solaire [26] .....	29
Figure 9 : Le pyranomètre à thermopile [27] .....	32
Figure 10 : Le capteur en silicium du rayonnement solaire global .....	33
Figure 11 : Le pyréliomètre du rayonnement solaire direct .....	33
Figure 12 : Pyranomètre avec photodiode.....	34
Figure 13: L'héliographe pour la mesure de la durée d'insolation .....	34
Figure 14 : Pyranomètre thermopile / pyranomètre thermopile ombré et pyréliomètre [27] .....	34
Figure 15 : METEOSAT de première génération [32] .....	38
Figure 16 : Principe d'acquisition des images Météosat [33] .....	38
Figure 17 : Exemples d'aérosols atmosphériques .....	40
Figure 18 : Les différents types d'aérosols atmosphériques [41] .....	43
Figure 19 : Représentation d'une distribution volumique typique d'aérosols en fonction de leur diamètre.[46] .....	46
Figure 20 : La densité des différents aérosols suivant leurs diamètres aérodynamiques .....	47
Figure 21 : Structure de la méthode Heliosat-4 [67] .....	53
Figure 22 : la structure du modèle McClear [61] .....	55
Figure 23 : Situation géographiques de quelques régions au Maroc y compris MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN .....	57
Figure 24 : Le rayonnement hors atmosphère atténué par la quantité d'ozone à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015.....	58
Figure 25 : Le rayonnement hors atmosphère atténué par la quantité de la vapeur d'eau à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015 .....	59
Figure 26: Le rayonnement hors atmosphère atténué par les réflexions atmosphériques à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015 .....	60
Figure 27 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type maritime propre à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015 .....	63
Figure 28 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type maritime tropical à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015 .....	64
Figure 29 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type continental propre à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015 .....	65
Figure 30 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type continental moyen à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015 .....	66
Figure 31 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type continental pollué à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015 .....	67
Figure 32 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type urbain à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015 .....	68
Figure 33 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type désertique à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015.....	69
Figure 34 : Le rayonnement hors atmosphère atténué par tous les effets atmosphériques à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015 .....	70



Figure 35 : Comparaison entre l'éclairement par ciel clair au sol issue de Helioclim-3 et celui estimé par le modèle McClear à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN durant l'année 2015 .....	72
Figure 36 : Différence entre les mesures de helioclim-3 par ciel clair et celles du modèle McClear à MISSOUR durant l'année 2015 .....	72
Figure 37 : Différence entre les mesures de helioclim-3 par ciel clair et celles du modèle McClear à BENGUERIR durant l'année 2015 .....	73
Figure 38 : Différence entre les mesures de helioclim-3 par ciel clair et celles du modèle McClear à TANTAN durant l'année 2015 .....	73
Figure 39 : Création d'une interface graphique .....	76
Figure 40 : Le code MATLAB correspondant à notre interface graphique .....	76
Figure 41 : L' interface graphique après exécution et traitement du modèle McClear .....	77



## Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison de l'incertitude de mesure entre les deux stations [27] .....	35
Tableau 2 : Comparaison entre les deux stations de mesure du rayonnement solaire [27] .....	35
Tableau 3 : Les composants chimiques des aérosols et leur précurseurs [44] .....	45
Tableau 4 : Les différentes données issues de MACC-RAD [72].....	56
Tableau 5 : Calcul des différents erreurs statistiques du modèle McClear à MISSOUR durant l'année 2015 ...	74
Tableau 6 : Calcul des différents erreurs statistiques du modèle McClear à BENGUERIR durant l'année 2015	75
Tableau 7 : Calcul des différents erreurs statistiques du modèle McClear à TANTAN durant l'année 2015 .....	75
Tableau 8 : L'influence en pourcentage des propriétés atmosphériques sur le rayonnement hors atmosphère à MISSOUR en 2015.....	77
Tableau 9 : L'influence en pourcentage des propriétés atmosphériques sur le rayonnement hors atmosphère à BENGUERIR en 2015 .....	78
Tableau 10 : L'influence en pourcentage des propriétés atmosphériques sur le rayonnement hors atmosphère à TANTAN en 2015 .....	78



## Liste des abréviations

TSV : Temps solaire vrai  
GHI: Global horizontal irradiance  
DNI: Direct horizontal irradiance  
DHI: Diffuse horizontal irradiance  
E0: Le rayonnement hors atmosphère  
RA : Réflexions atmosphériques  
h: La hauteur du soleil  
TSM: Temps solaire moyen  
TL : Le temps légal  
TU: Temps universel  
GUI: Graphic user interface  
McClear: Modèle du ciel clair  
RMSE: L'erreur racine carré moyen  
AOD : Aerosol optical depth  
LUT: Look-up-table  
CTR : Code transfert radiatif  
H2O: la vapeur d'eau  
O3 : L'ozone  
 $\delta$  : La déclinaison solaire  
 $\omega$  : L'angle horaire  
 $\alpha$  : L'azimut solaire



## Sommaire

Dédicaces.....	1
Remerciements .....	2
Résumé.....	3
Abstract .....	4
Liste des figures.....	5
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations.....	8
Introduction générale.....	12
Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et Green Energy Park.....	14
1- Présentation d'IRESEN : .....	14
2. Le but de création d'IRESEN : .....	15
2.1. Structure dédiée à la R&D : .....	15
2.2. Les axes stratégiques de l'IRESEN : .....	15
3. Les grands projets pilotes d'IRESEN : .....	16
4. La plateforme Green Energy Park: .....	17
4 .1 Présentation de la plateforme: .....	17
4.2 Les grands projets pilotes de la plateforme : .....	18
Chapitre 2 : Etude bibliographique sur le rayonnement solaire .....	20
1. Présentation: .....	20
2. Géométrie solaire:.....	20
2.1 Constante solaire:.....	21
2.2 Un corps noir: .....	21
3. Le rayonnement solaire et sa caractérisation: .....	22
4. Les différentes composantes du rayonnement solaire : .....	22
4.1 Eclairage solaire d'une surface normale hors atmosphère : .....	22
4.2 Calculs solaires : .....	23
4.2.1 La latitude et la longitude : .....	23
4.2.2 La déclinaison: .....	23



4.2.3 L'angle horaire:.....	24
4.2.4 Position du soleil par rapport à un plan horizontal :.....	24
4.2.5 Heures de lever et de coucher du soleil :.....	25
4.2.6 Equation du temps :.....	26
4.2.7 Le coefficient d'incidence :.....	27
5. Les composantes du rayonnement solaire :.....	28
5.1 Calcul du rayonnement direct :.....	29
5.2 Calcul du rayonnement diffus :.....	31
5.3 Calcul du rayonnement global:.....	31
6. Les instruments de mesure du rayonnement solaire :.....	31
6.1 Le pyranomètre à thermopile :.....	31
6.2 Le pyranomètre à photodiode:.....	32
6.3 Sensor Silicium :.....	33
6.4 Le pyréliomètre :.....	33
6.5 L'héliographe.....	34
7. Les stations de mesure du rayonnement solaire:.....	34
8. Les modèles satellitaires empiriques et physiques :.....	36
8.1 Les satellites géostationnaires :.....	36
8.2 Les satellites en orbite polaire :.....	36
8.3 Les modèles satellitaires empiriques :.....	37
8.4 Les modèles satellitaires physiques :.....	37
8.5 Les modèles satellitaires semi-empiriques :.....	37
8.6 Le satellite METEOSAT:.....	37
Conclusion :.....	38
Chapitre 3 : Les aérosols atmosphériques.....	40
Introduction :.....	40
1. Classification des aérosols :.....	41
1.1 Sources des aérosols :.....	41
1.2 La forme et la taille des aérosols :.....	42
1.3 Le processus de formation des aérosols :.....	43
1.4 La composition chimique des aérosols:.....	44



2. Les propriétés optiques des aérosols atmosphériques :.....	45
2.1 Le diamètre aérodynamique des aérosols:.....	45
2.2 L'épaisseur optique des aérosols : .....	47
2.3 Calcul du coefficient de trouble d'Angstrom :.....	48
3. Les effets radiatifs des aérosols : .....	48
3.1 L'effet radiatif direct :.....	48
3.2 L'effet radiatif semi-direct : .....	49
3.3 L'effet radiatif indirect:.....	49
Conclusion : .....	49
Chapitre 4 : Application du modèle "McClear" de la méthode Heliosat-4 .....	51
Introduction :.....	51
1- Les méthodes de la famille Heliosat :.....	52
1.1 Heliosat-1, Heliosat-2, Heliosat-3 :.....	52
1.2 La nouvelle méthode Heliosat-4 : .....	53
2. Le modèle du ciel clair McClear: .....	54
3. Description des données disponibles:.....	55
3.1 Les données du rayonnement solaire: .....	55
3.2 L'épaisseur optique des aérosols, la quantité de la vapeur d'eau et d'ozone : .....	56
4. Etude de cas pour MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN :.....	56
4.1 Carte d'identité des villes : .....	56
4.2 L'effet de la vapeur d'eau et de l'ozone sur le rayonnement hors atmosphère:.....	57
4.3 L'effet des réflexions atmosphériques : .....	60
4.4 Effet des aérosols sur le rayonnement hors atmosphère :.....	61
5. Comparaison statistique :.....	71
7. Réalisation d'une interface graphique à MATLAB (GUI) : .....	76
Conclusion : .....	77
Conclusion générale .....	79
Références:.....	80



## Introduction générale

Pour minimiser la consommation des énergies fossiles et épuisables et réduire leurs impacts négatifs sur l'environnement (réchauffement climatique dus aux émissions des gaz à effet de serre, pollution du sol,...), les énergies renouvelables restent une meilleure solution. C'est ainsi que le Maroc a mis en place un plan ambitieux pour réaliser un développement notable de la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique national. Ce plan, bien expliqué par le Royaume lors de la COP21 à Paris, vise la réduction de 32% d'émissions des gaz à effet de serre d'ici 2030 et ramener la part des énergies renouvelables (hydroélectricité, centrales solaires thermiques à concentration, éolienne, biomasse) à 42% de la production électrique nationale à l'horizon 2020 et à 52 % à l'horizon 2030.

Avec un ensoleillement de 3000 heures par an et une irradiation d'environ 5 kWh/m<sup>2</sup>/jour, le Royaume a pris une décision politique de haut niveau pour exploiter ce potentiel solaire. Cinq sites ont été, ainsi, identifiés pour le lancement du projet marocain de l'énergie solaire. Il s'agit des sites de Ouarzazate, Ain Bni Mathar, Fom Al Oued, Boujdour et Sebkhath Tah.

Déjà, Sa Majesté le Roi Mohammed VI, a officiellement inauguré, le jeudi 4 février dernier, la première phase, NOOR1 avec une capacité de 160 MW, de ce qui sera à terme (NOOR2 (~ 200 MW) et NOOR3 (~ 150 MW)), la plus grande centrale solaire à concentration du monde avec un objectif d'environ 500MW.

Les systèmes solaires à concentration ne fonctionnent que par ciel clair. En effet, seul le rayonnement solaire direct peut être concentré.

La quantité du rayonnement solaire direct incidente au niveau du sol dépend de la constitution de l'atmosphère et de la masse d'air traversée par le rayonnement (épaisseur de l'atmosphère).

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'étude de l'influence des "aérosols" sur le rayonnement solaire incident au sol. Ces aérosols sont constitués de toutes les particules étrangères à la composition atmosphérique standard (Oxygène, Azote, ...). Ces particules proviennent de la surface terrestre et sont soulevées par le vent.

Notre travail sera présenté en quatre chapitres: Le premier a été consacré à la présentation de l'organisme d'accueil IRESEN et au Green Energy Park, lieu de mon stage. Le second chapitre présente des généralités sur le rayonnement solaires. Les notions présentées dans ce chapitre sont nécessaires pour la compréhension de la suite du travail. Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, nous procéderons en une description détaillée des différents types d'aérosols et à leurs influences sur le rayonnement solaire direct. Le chapitre IV est réservé à la description des modèles utilisés et des résultats obtenus.



# Chapitre 1

## Présentation de l'organisme d'accueil et Green Energy Park

## Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil et Green Energy Park

### 1- Présentation d'IRESEN :

L'IRESEN (institut de recherche en énergie solaire et énergies nouvelles) est un institut de recherche créé en 2011 par le Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'environnement, la SIE, l'ADEREE, MASEN, l'ONEE, l'OCP, MANAGEM, l'ONHYM, le CNESTEN....., et la Fédération de l'Énergie pour accompagner la stratégie énergétique nationale en soutenant la R&D appliquée dans le domaine de l'énergie solaire et des énergies nouvelles. IRESEN se positionne au niveau de la recherche appliquée et technologique dans le secteur de l'énergie solaire et énergies nouvelles pour un transfert de technologie plus rapide et une transposition des résultats de la recherche en produits innovateurs.[1][2]

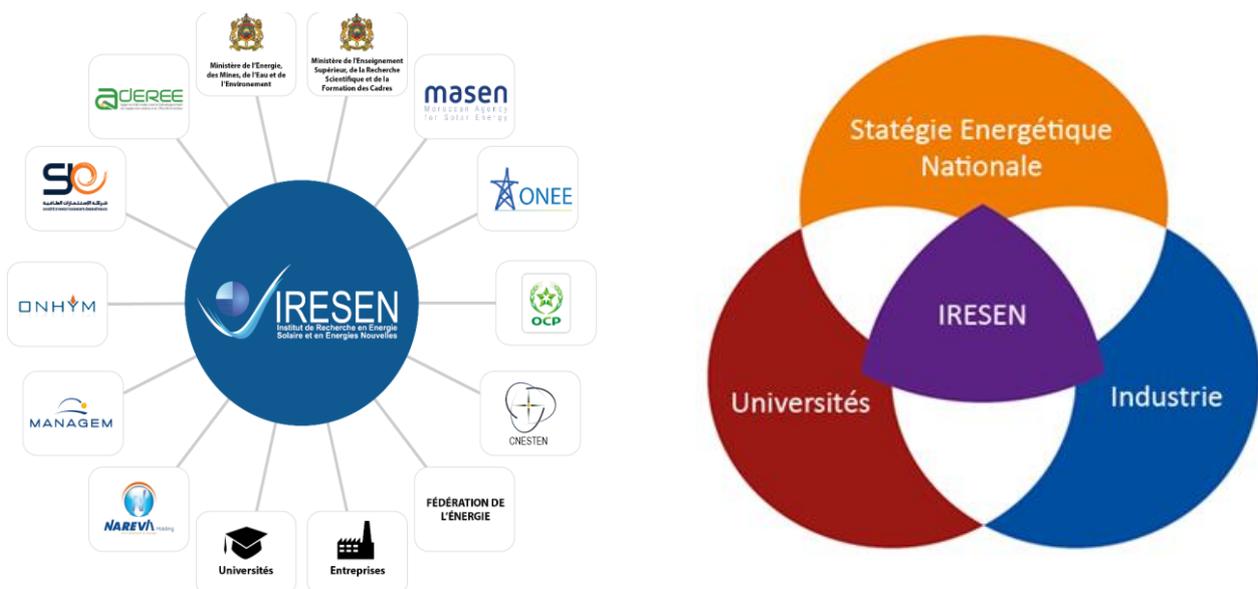


Figure 1 : liste des fondateurs d'IRESEN [3]

#### Mission de l'institut :

- Soutien à la création d'un environnement favorable à la Recherche,
- Création de synergies entre les universités et les entreprises,
- Acquisition du savoir faire et développement de l'expertise de l'IRESEN et du réseau de partenaires (Universités et Entreprises).
- Création de valeur.

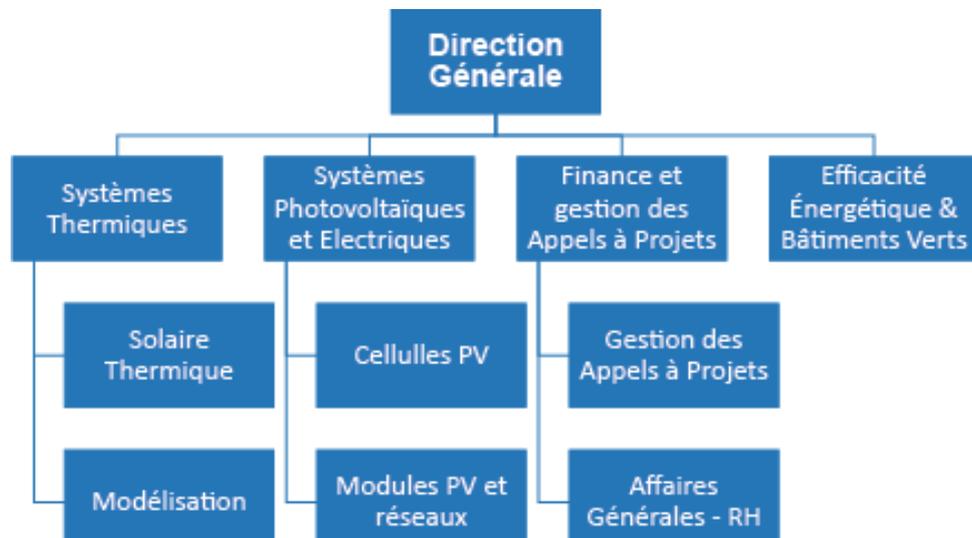


Figure 2 : Structure D'IRESEN [4]

## 2. Le but de création d'IRESEN :

### 2.1. Structure dédiée à la R&D :

IRESEN a été créé afin de porter la R&D en sciences appliquées à l'échelle nationale, développer l'innovation et encourager le réseautage. IRESEN a également pour mission d'assurer la définition des axes de recherche, de réaliser, de financer et de piloter des projets de Recherche et de Développement.

IRESEN se développe progressivement et étend son champ d'intervention et son infrastructure en fonction de la demande et des besoins en R&D mais veille à soutenir et à appuyer la recherche universitaire. [5]

### 2.2. Les axes stratégiques de l'IRESEN :

Pour contribuer fortement au R&D et encourager l'innovation dans le secteur de l'énergie solaire et énergies nouvelles IRESEN a suivi plusieurs axes stratégiques on les résume selon les points suivants [5] :

- Mise en place de dispositifs pour développer, pour coordonner et renforcer l'efficacité de la recherche dans les secteurs de l'énergie solaire et énergies nouvelles.
- Traduction de la stratégie nationale en projets R&D.
- Réalisation et participation au financement de projets portés par les institutions de recherche et les industriels.



- Valorisation et vulgarisation des résultats des projets de recherche.
- Mettre en place des plateformes marocaines de test et de standardisation.
- Mutualiser les infrastructures de recherche en assurant le transfert de savoir faire.
- Renforcer la relation université-entreprise dans le cadre de projets collaboratifs.

La structure de l'IRESSEN lui permet de mener au mieux ses missions et ce selon deux approches différentes et complémentaires:

IRESSEN – Agence de Moyens  
IRESSEN – Centre de Recherche.



Figure 3 : Les deux missions d'IRESSEN [6]

### 3. Les grands projets pilotes d'IRESSEN :

Au sein de la plateforme Green energy park de Ben guerir IRESSEN a mis en place ensemble des projets pilotes [7]:

- ✚ **Centrale (CSP-ORC)** : Développement et installation d'une nouvelle génération centrale thermo-solaire modulaire de petite capacité 1MW, cette puissance sera injectée au réseau de l'OCP.
- ✚ **Centrale PV** : installation d'une centrale pilote photovoltaïque utilise 5 technologies différentes pour la caractérisation des performances et l'identification de la complémentarité climatiques marocaine.
- ✚ **Projet de dessalement (aquasolar)** : couplage de l'énergie solaire à concentration avec le dessalement de l'eau au maroc.
- ✚ **Projet MCP** : Etude et développement du stockage thermique solaire par fusion des MCP et application au chauffage passif de l'habitat au Maroc.
- ✚ **Projet SFlash** : Développement d'un séchage Flash solaire des phosphates
- ✚ **Projet MicroOnduleurPV** : Développement d'un système de transfert et d'optimisation d'énergie solaire PV.
- ✚ **Projet Digesteur** : Valorisation des effluents organiques issus des industries de papier carton au maroc par méthanisation: réalisation d'un digesteur pilote couplé à l'énergie solaire
- ✚ **Projet MCS Bitume** : Maintien en chauffe d'un stockage de bitume par des panneaux solaires à haute énergie.



## 4. La plateforme Green Energy Park:

### 4.1 Présentation de la plateforme:

L'IRESEN et le groupe OCP se sont alliés pour créer une plateforme de recherche et de formation en énergies renouvelables « Green Energy Park » dans la ville verte Mohammed VI à Ben Guérir sur une superficie de huit hectares, en face de l'Université Mohammed VI polytechnique.[8]

Cette première plateforme en Afrique, modèle unique en son genre, permettra d'une part, la création de synergies et la mutualisation des infrastructures de plusieurs institutions marocaines de recherche afin de créer une masse critique et arriver à l'excellence, et d'autre part l'acquisition du savoir et du savoir-faire par les différentes universités partenaires ainsi que les industriels marocains. Sa superficie totale est de huit hectares, dont 3100 m<sup>2</sup> de laboratoires. [2]



Figure 4 : Vue en 3D de la plateforme green energy park Benguerir [2]



#### 4.2 Les grands projets pilotes de la plateforme :

**Centrale CSP (CHAMS1) :** L'objectif du projet CHAMS 1 est le développement d'un champ solaire thermodynamique nouvelle génération, basse concentration et utilisant un champ solaire de type Fresnel innovant.[8]



**Centrale PV :** Installation d'une centrale pilote photovoltaïque 120 - 200 kWc, utilisant 5 technologies différentes pour la caractérisation des performances et l'identification de la complémentarité des technologies existantes sous les conditions climatique marocaines.[8]



**Centrale SUNPOWER C7 :** Installation d'une nouvelle génération de CPV à basse concentration, pour mettre en évidence les preuves de ce nouveau concept et pour comparer sa performance à celle des technologies PV conventionnelle.[8]



**Centrale HCPV :** Mise en place d'un système CPV à haute concentration combiné à un système d'accumulateurs, pour l'étude et la caractérisation de ses performances.[8]





## Chapitre 2

# Etude bibliographique sur le rayonnement solaire



## Chapitre 2 : Etude bibliographique sur le rayonnement solaire

### 1. Présentation:

Le soleil est une étoile qui émet une énergie sous forme de photons et de particules qui agissent de façon très différente selon la latitude du lieu. C'est une énorme sphère gazeuse de 1.4 millions de kilomètres de diamètre, ses composants se résument en hydrogène (78.4% de la masse), Hélium (19.6% de la masse) et d'autres éléments chimiques comme l'oxygène et le carbone et autour d'elle gravite huit planètes y compris notre planète terrestre.

Depuis sa naissance, il y'a environ 4.5 milliards d'années le soleil nous a offert de la lumière, de la chaleur et elle continuera de le faire pendant plusieurs années à venir, même si la distance entre la terre et le soleil est grande d'environ 150 millions de kilomètres, l'émission de sa lumière ne met que huit minutes et dix-neuf secondes pour arriver à la surface de la terre.

Avant qu'elle arrive au sol, la lumière qui traverse l'atmosphère subi des absorptions et des diffusions par les différentes particules qui se trouvent dans l'air comme les aérosols ainsi que des réflexions vers l'espace ce qui diminue significativement sa puissance, plus cette couche atmosphérique est importante plus que la diminution est significatif.

### 2. Géométrie solaire:

Le rayonnement solaire est émis par le soleil sous forme des ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'ondes allant des ondes courtes qui comprennent les rayons gamma, les rayons X et les ultraviolets C(UV-C), aux ondes longues incluant les ultraviolets B(UV-B), les ultraviolets A(UV-A), la lumière visible, les infrarouges (IR), les micro-ondes et les ondes radio.

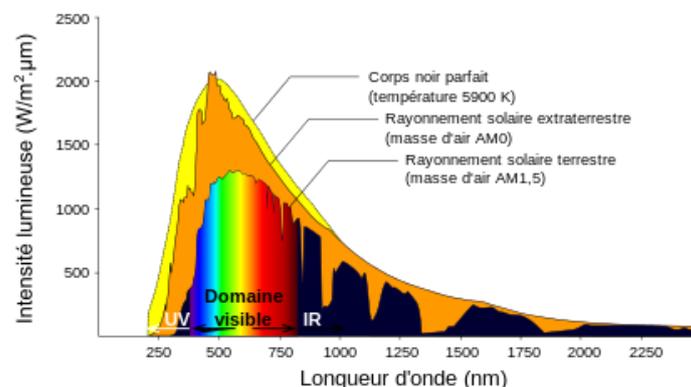


Figure 5 : Distribution spectrale du rayonnement solaire [9]



Cette énergie reçue par la surface de la terre n'est pas toujours constante, elle varie en fonction de plusieurs processus au cours de la journée et dépend des saisons, de la nébulosité, de l'angle d'incidence et de la réflexion des surfaces.

Le rayonnement solaire global est défini par le rayonnement total reçu par le sol et représente la somme de deux éclairagements direct et diffus. Le rayonnement direct est celui qui nous parvient directement du soleil et on l'obtient que si cette dernière est clairement visible, tandis que le diffus est celui qui est reflété par le ciel, les nuages et les surfaces, sa quantité est nettement supérieur en hiver.

Le rayonnement solaire reçu par le sol dépend aussi de l'angle d'incidence qui représente l'angle que forment les rayons solaires avec la normale de la surface. Plus cet angle est petit plus l'intensité du rayonnement reçu est importante. Une surface reçoit le maximum d'énergie si l'angle d'incidence est de  $0^\circ$  (Le rayonnement solaire est perpendiculaire à la surface).

### 2.1 Constante solaire:

La constante solaire  $I_0$  est la puissance rayonnée reçue, hors atmosphère par un disque de  $1 \text{ m}^2$  placé perpendiculairement au rayonnement solaire à la distance moyenne terre soleil. Elle peut être mesurée à partir des satellites situés dans la partie supérieure de l'atmosphère et sa valeur varie légèrement.

L'Organisation Internationale de Métrologie Légale retient la valeur de  $I_0=1367 \text{ W/m}^2$ . La constante solaire désigne l'éclairement intégré total sur la totalité du spectre (la région située en dessous de la courbe dans la figure 5 plus 3,7 % à des longueurs d'onde plus longues et plus courtes). L'éclairement qui traverse l'atmosphère terrestre varie chaque année d'environ 6,6 % en raison de la variation de la distance entre la Terre et le Soleil. Les variations de l'activité solaire provoquent des modifications de l'éclairement pouvant aller jusqu'à 1 % [11].

### 2.2 Un corps noir:

Un corps noir est un objet qui absorbe intégralement les radiations reçues. Il représente une cavité fermée percée d'une très petite ouverture. Les éclairagements qui entrent dans la cavité se réfléchissent sur les parois et s'absorbent plus ou moins à chaque réflexion. L'énergie qui peut ressortir est négligeable. Un corps noir en équilibre thermique émet d'énergie autant qu'il en reçoit [12].

On peut considérer le soleil comme un corps noir, dont la température est au voisinage de 6000 Kelvins, une bonne partie de son rayonnement qui représente des photons très énergétiques est émis dans l'ultraviolet ce qui rend notre santé en risque c'est pourquoi la couche d'ozone absorbe une bonne partie des rayons énergétiques dans ce domaine.



### 3. Le rayonnement solaire et sa caractérisation:

Le rayonnement solaire disponible au sol est un élément très important dans de nombreux domaines qui peuvent être regroupés de la manière suivante [13]:

- Production d'électricité par la voie photovoltaïque ou solaire thermique (décision d'investissement, management du réseau d'électricité,...)
- Agriculture et énergie de la biomasse (prévision et surveillance de la croissance de la culture et de la biomasse)
- Prévisions météorologiques et climatiques.
- Environnement.
- Santé humaine (prévention de cancer de la peau)
- L'efficacité énergétique pour les bâtiments.

Il existe plusieurs méthodes pour évaluer ce rayonnement solaire au sol, mais la plus connue consiste à utiliser des instruments de mesures pyranométriques qui sont installés généralement dans des stations météorologiques automatiques. Ces instruments fournissent une description du rayonnement solaire incident à la surface en tout ce qui concerne la durée d'insolation, l'éclairement global, l'éclairement direct et diffus, mais à cause des coûts élevés d'investissement et de maintenance, les stations de mesures ne sont pas toujours équipées de tous les instruments nécessaires pour mesurer les différentes composantes du rayonnement solaire.

Une autre approche pour estimer ce rayonnement solaire repose sur l'exploitation des observations faites par les satellites météorologiques, et particulièrement des satellites météorologiques géostationnaires équipés de radiomètres imageurs. La méthode la plus utilisée dans cette approche est la méthode Héliosat est originalement développée à Mines-Paris-Tech qui permet l'estimation du rayonnement solaire au sol à partir des images satellitaires.

### 4. Les différentes composantes du rayonnement solaire :

#### 4.1 Eclairement solaire d'une surface normale hors atmosphère :

Pour un jour donné de l'année, l'éclairement d'une surface normale au rayonnement solaire, hors atmosphère, peut être obtenu à l'aide de la relation [13]:

$$I_{n0} = I_0 \left[ 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360J}{365}\right) \right] \quad [1]$$



Avec:

$I_0$  : la constante solaire qui est égale à  $1367 \text{ W/m}^2$

$J$  : jour de l'année (1 pour le 1<sup>er</sup> Janvier)

## 4.2 Calculs solaires :

### 4.2.1 La latitude et la longitude :

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, qui exprime la position d'un point sur Terre, au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. Tous les endroits de la Terre ayant une même latitude, forment un cercle, cercle dont le plan est parallèle à celui de l'équateur, d'où l'autre terme « parallèle » permettant de nommer une latitude. Elle varie entre  $-90^\circ$  et  $90^\circ$  et comptée positivement vers le nord et négativement vers le sud [14].

La longitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, exprimant la positionnement est-ouest d'un point sur Terre. La longitude de référence sur Terre est le méridien de Greenwich. Tous les points de même longitude appartiennent à une ligne épousant la courbure terrestre, coupant l'équateur à angle droit et reliant le pôle Nord au pôle Sud. Cette ligne est appelée « méridien ». À la différence de la latitude (position nord-sud) qui bénéficie de l'équateur et des pôles comme références, aucune référence naturelle n'existe pour la longitude. Elle est donc une mesure angulaire sur  $360^\circ$  par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de  $-180^\circ$  ( $180^\circ$ ) Ouest à  $+180^\circ$  ( $-180^\circ$ ) Est. Le méridien  $0^\circ$  est le méridien de Greenwich [15].

### 4.2.2 La déclinaison:

La déclinaison est l'angle que forme le vecteur du centre de la terre vers la direction du soleil et le plan équatorial de la terre. La déclinaison varie de  $+23,45^\circ$  en degrés décimaux au solstice d'été (22 juin) à  $-23,45^\circ$  au solstice d'hiver (22 décembre) en passant par la valeur 0 aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) [16].

La déclinaison est à l'origine des variations de l'éclairement solaire durant l'année ce qui nous donne les différentes saisons.

La déclinaison est décrite par l'équation suivante [13] :

$$\delta = 23.45 \sin\left[\frac{360}{365}(J + 284)\right] \quad [2]$$



La figure suivante représente les variations de la déclinaison solaire au cours de l'année.

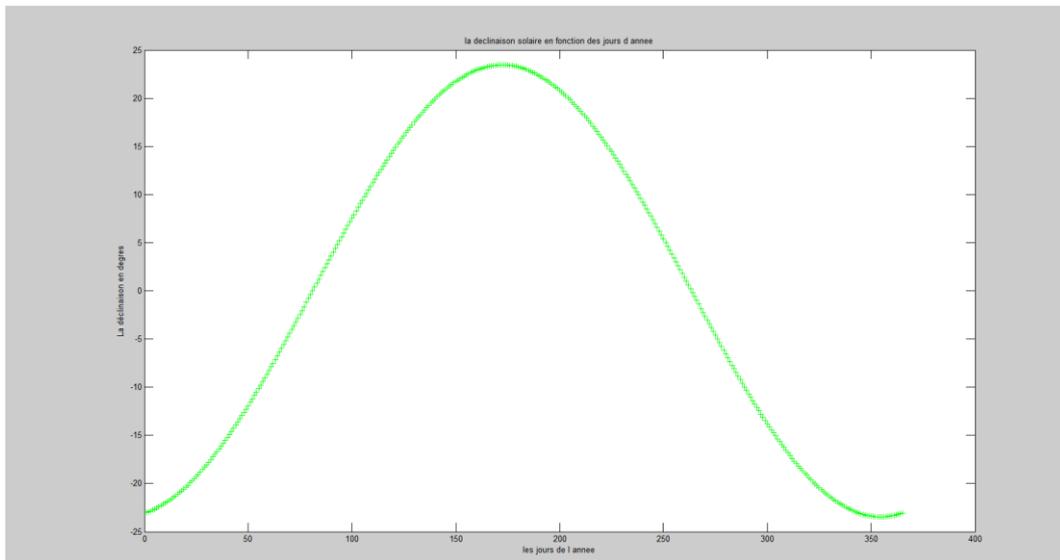


Figure 6 : Déclinaison solaire en fonction des jours de l'année

#### 4.2.3 L'angle horaire:

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu. Cet angle horaire est négatif si le temps solaire est inférieur à 12 et il est exprimé en degrés.[16]

Il est obtenu de la façon suivante :

$$\omega = 15(TSV - 12) \text{ en degrés} \quad [3]$$

Avec:

TSV : est l'heure en temps solaire vrai

#### 4.2.4 Position du soleil par rapport à un plan horizontal :

La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont :

##### ✚ La hauteur du soleil :

La hauteur du soleil (h), ou encore l'altitude, est l'angle que forme le plan horizontal du lieu considéré et le vecteur du point local vers le soleil. Cette hauteur du soleil intervient fortement sur la valeur de l'éclairement solaire [16].



La formule classique donnant la hauteur solaire h est la suivante :

$$\sin(h) = \sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) \quad [4]$$

$$h = \arcsin(\sin(\delta)\sin(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega)) \quad [5]$$

Avec :

$\delta$  : la déclinaison solaire

$\phi$  : la latitude du lieu

$\omega$  : l'angle horaire

#### L'azimut du soleil:

L'azimut solaire (a) représente l'angle entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud. L'azimut est compté négativement vers l'Est et positivement vers l'Ouest. [13]

Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta)\sin(\omega)}{\cos(h)} \quad [6]$$

#### 4.2.5 Heures de lever et de coucher du soleil :

A partir de la latitude et de la déclinaison, il est possible de connaître l'heure solaire vraie du lever et du coucher du soleil [16]:

$$T_{sv \text{ lever}} = 12 - \arcsin\left(\frac{-\text{tg}(\delta)\text{tg}(\phi)}{15}\right) \quad [7]$$

$$T_{sv \text{ coucher}} = 12 + \arcsin\left(\frac{-\text{tg}(\delta)\text{tg}(\phi)}{15}\right) \quad [8]$$

Avec :

$\delta$  : la déclinaison solaire

$\phi$  : la latitude du lieu

La durée d'insolation représente la durée maximale de la journée et peut être calculée par la formule suivante [16]:

$$Di = \frac{2}{15} \cdot \text{ArcCos}(-\text{Tan}(\phi) \cdot \text{Tan}(\delta)) \quad [9]$$



#### 4.2.6 Equation du temps :

L'équation du temps permet la correction due aux irrégularités du mouvement de la terre qui varie selon la date de +14 min à -16 min. Cette équation donne la différence entre le temps solaire moyen (qui peut être indiqué par une montre) et le temps solaire vrai (indiqué par un cadran solaire).[16]

$$Et = TSM-TSV \quad [10]$$

Elle peut être approchée par l'équation suivante :

$$Et = -9,87 \sin (2N) + 7,53 \cos (N) + 1,5 \sin (N) \quad [11]$$

L'équation du temps  $Et$  est exprimée en minutes  
Avec :

$$N = (2\pi/365) (J-81) \text{ en radians} \quad [12]$$

#### ✚ Temps légal $TL$ :

C'est l'heure officielle d'un état, c'est l'heure du fuseau horaire. La terre est divisée en 24 fuseaux de  $15^\circ$  de large centré sur les méridiens dont la longitude est multiple de 15  
Il est exprimé par la formule suivante [13]:

$$TL = TU + \Delta H \quad [13]$$

Avec :

$TU$  : Le temps Universel

$\Delta H$  : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (au Maroc : +1 entre Avril et Octobre)

#### ✚ Temps universel $TU$

C'est le temps solaire moyen du méridien fondamental (méridien de Greenwich)  
Pour un lieu de longitude  $L$  donnée, on aura [13]:

$$TSM = TU + L/15 \quad [14]$$



Avec :

L est en degré positive à l'Est et négative à l'Ouest (L/15 est exprimée en heure)

On aura donc :

$$TL = TU + \Delta H \quad [15]$$

$$TL = TSM - L/15 + \Delta H \quad [16]$$

$$TSM = Et + TSV \quad [17]$$

L'expression finale du temps légal est :

$$TL = Et + TSV - L/15 + \Delta H \text{ (en heures)} \quad [18]$$

**NB** : Si on veut le résultat en minutes on remplace L/15 par 4L.

#### 4.2.7 Le coefficient d'incidence :

Le coefficient d'incidence est l'angle que forme le rayonnement solaire avec la perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est exprimé d'une part par la hauteur du soleil et son azimut et d'autre part par l'orientation et l'inclinaison du plan récepteur. Il est exprimé par la formule suivante [16]:

$$\cos(i) = \sin(\beta) \cos(h) \cos(\alpha - a) + \cos(\beta) \sin(h) \quad [19]$$

Avec :

i : L'angle d'incidence

$\beta$ : L'inclinaison du plan récepteur

h : La hauteur du soleil

$\alpha$  : l'azimut du plan récepteur

a : l'azimut solaire

L'éclairement reçu par une surface plane placée hors atmosphère est donné par :

$$I_{\text{incliné}} = I_{n0} \cos(i) \quad [20]$$

Avec :

$I_{n0}$  : l'éclairement d'une surface normale au rayonnement solaire

La figure suivante représente l'éclairement solaire reçu à midi TSV par une surface plane pour les différentes valeurs d'inclinaisons.

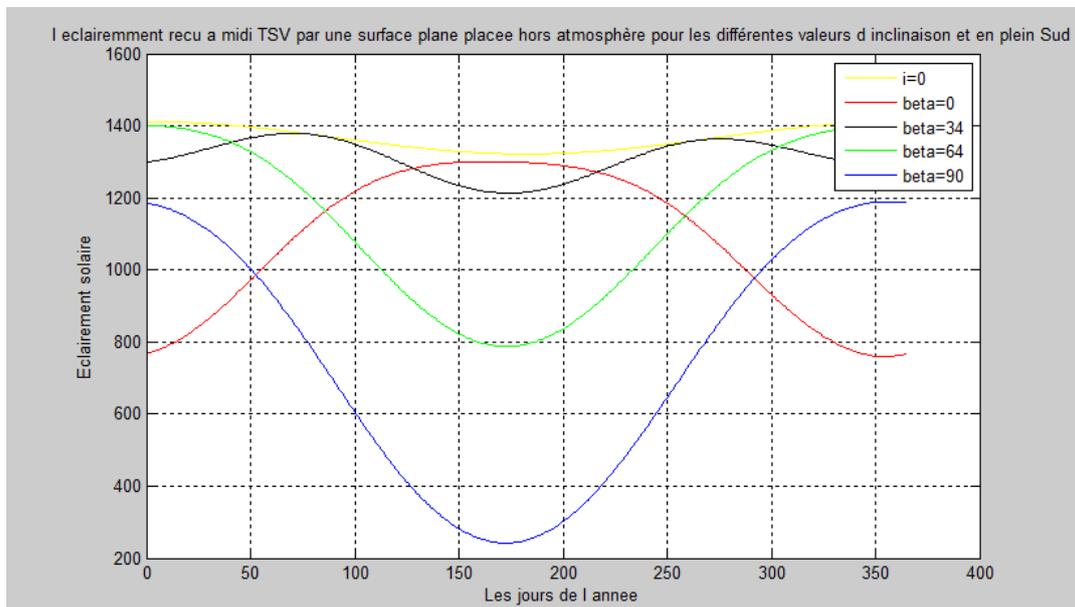


Figure 7 : L'éclairement solaire en fonction des jours de l'année reçu par une surface plane pour les différentes valeurs d'inclinaisons

## 5. Les composantes du rayonnement solaire :

Le soleil émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. Il constitue un spectre allant des ultraviolets à l'infrarouge en passant par le spectre visible ou il émet le maximum d'énergie. La constante solaire définie par la valeur de  $1367 \text{ W/m}^2$  est une énergie qui arrive sur une surface normale aux rayons solaires hors atmosphère à la distance moyenne terre soleil. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère, il se répartit en quatre parties qui sont des éclairements direct, réfléchi, absorbé ou diffusé. On appelle ces différents rayonnements : composantes solaires [17].

Au sol, le rayonnement solaire se décompose en deux parties principales qui sont le rayonnement solaire direct (DNI) et le rayonnement solaire diffus (DHI). Le total de ces deux rayonnements est appelé le rayonnement solaire global (GHI) [16].

- **Le rayonnement direct :**

C'est l'éclairement le plus puissant, qui provient directement du soleil lorsque le ciel est clair sans subir de changement dans sa trajectoire. La composante directe représente le flux solaire qui atteint directement la surface quand celle-ci est exposée au soleil. Elle dépend de la hauteur du soleil et de l'angle d'inclinaison de la surface à l'instant considéré [18].

- **Le rayonnement diffus**

Il provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les constituants de l'atmosphère. C'est la lumière du jour qui nous permet de voir clair même quand le temps est couvert [18].

- **Le rayonnement dû à l'albédo du sol**

La composante réfléchie représente la partie de l'éclairement interceptée par une surface suite aux réflexions solaires produites par l'environnement proche. L'environnement proche est représenté par un plan horizontal renvoyant une part du flux global incident (direct et diffus), la partie réfléchie dépend de l'albédo du sol. L'albédo est le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente, il est lié à la nature du sol aux alentours du capteur solaire, sa valeur est comprise entre 0 et 1, et il est d'autant plus important que la surface est réfléchissante (neige, miroir) [18].

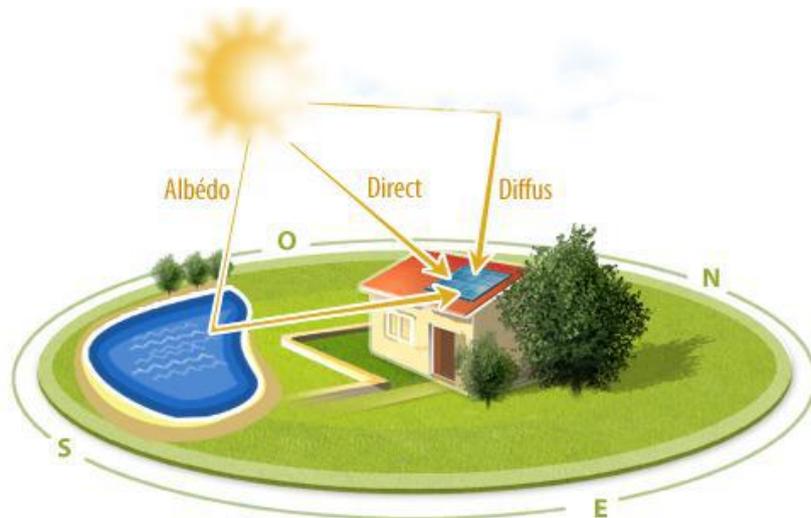


Figure 8 : Les trois différents types du rayonnement solaire [18]

### 5.1 Calcul du rayonnement direct :

En traversant l'atmosphère le rayonnement direct subit une atténuation de son intensité. Pour calculer ce rayonnement la démarche est la suivante [16] :



1- Déterminer la pression atmosphérique ( $P_{Atm}$ ) :

$$P_{Atm} = 101325 \times (1 - 2,26 \times 10^{-5} \times z)^{5,26} \text{ en Pa} \quad [21]$$

Où  $z$  est l'altitude en mètres

2- Définir la pression de vapeur saturante ( $P_{vs}$ ), le taux moyen d'humidité relative (HR) et la pression partielle de vapeur d'eau ( $P_v$ ) :

$$P_{vs} = 2,165 \times (1,098 + T / 100)^{8,02}, \text{ en mmHg (millimètre de mercure)} \quad [22]$$

Avec :

$T$  est la température d'air en  $^{\circ}\text{C}$

$HR = 50 \% = 0.5$

Donc :

$$P_v = P_{vs} \times HR \quad [23]$$

3- Définir la masse d'air optique relative ( $m$ ) d'où on déduit l'épaisseur optique de Rayleigh ( $E_r$ ) qui détermine l'atténuation due à la diffusion :

$$m = P_{Atm} / (101325 \times \sin(h) + 15198,75 \times (3,885 + h)^{-1,253}) \quad [24]$$

Où  $h$  est la hauteur du soleil en  $^{\circ}$

$$E_r = 1 / (0,9 \times m + 9,4) \quad [25]$$

4- Définir le facteur de trouble de Linke:

$$TL = 2,4 + 14,6 \times B + 0,4 \times (1 + 2 \times B) \times \ln(P_v) \quad [26]$$

où  $B$  est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend une valeur de :  $B = 0,02$  pour un lieu situé en montagne  $B = 0,05$  pour un lieu rural  $B = 0,10$  pour un lieu urbain  $B = 0,20$  pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

Finalement:

Le rayonnement solaire direct sur un plan récepteur normal à ce rayonnement vaut donc :

$$DNI = E_{Sol} \times \exp(-E_r \times m \times TL), \text{ en } W/m^2 \quad [27]$$

Avec:

$E_{Sol}$  : l'éclairement d'une surface normale au rayonnement solaire, hors atmosphère pour un jour donné.



Il est possible de simplifier l'obtention du rayonnement direct avec la formule suivante :

$$\text{DNI} = \text{ESol} \times \exp(-\text{TL} / (0,9 + 9,4 \times \text{Sin}(h))), \text{ en W/m}^2 \quad [28]$$

### 5.2 Calcul du rayonnement diffus :

Le rayonnement solaire diffus sur le plan récepteur est le résultat de toute réflexion de l'éclairement due par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. On suppose que le rayonnement solaire diffus n'a pas de direction prédominante (donc isotrope) de ce fait, l'orientation du plan récepteur n'a pas d'importance, seule son inclinaison. Ainsi sur un plan récepteur d'inclinaison  $i$ , DHI est égal à [16]:

$$\text{DHI} = 125 \times \text{Sin}(h) \times 0,4 \times ((1 + \text{Cos}(i)) / 2) + 211,86 \times \text{Sin}(h) \times 1,22 \times ((1 - \text{Cos}(i)) / 2), \text{ en W/m}^2 \quad [29]$$

Où :

$i$  : l'angle d'inclinaison

$h$  : la hauteur du soleil

### 5.3 Calcul du rayonnement global:

La somme de ces deux rayonnements représente le rayonnement global [16] :

$$\text{GHI} = \text{DHI} + \text{DNI} \times \cos(\theta) \quad [30]$$

Où :

$\theta$  : représente l'angle zénithal solaire (verticalement au-dessus de l'emplacement est de  $0^\circ$ , horizontale est de  $90^\circ$ )

## 6. Les instruments de mesure du rayonnement solaire :

### 6.1 Le pyranomètre à thermopile :

Le pyranomètre à thermopile est destiné pour mesurer le débit global d'irradiation solaire au sol sur une surface horizontale (300 nm à 2500 nm). L'élément sensible (thermopile) du pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui, délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident [19].

Le pyranomètre permet la mesure du rayonnement solaire global.



Figure 9 : Le pyranomètre à thermopile [19]

## 6.2 Le pyranomètre à photodiode:

- Le pyranomètre à photodiode en silicium permet la mesure du rayonnement solaire global.



- Le pyranomètre à photodiode avec anneau d'ombrage permet la mesure du rayonnement solaire diffus.



### ▪ Principe de fonctionnement de la Si-photodiode:

Utilisation du principe du semi-conducteur pour transformer l'onde solaire en signal électrique. La photodiode génère un signal de sortie proportionnel à la quantité de radiation solaire.[19]



### 6.3 Sensor Silicium :

Le sensor en silicium permet de mesurer le rayonnement solaire global, c'est un simple capteur en silicium monocristallin qui mesure le rayonnement solaire tout en compensant la température activement. Il fournit une tension proportionnelle à la puissance de rayonnement solaire.



Figure 10 : Le capteur en silicium du rayonnement solaire global

### 6.4 Le pyréliomètre :

Un pyréliomètre est un instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire directe. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, qui est très absorbante, montée sur un système de suivi du soleil. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement direct issu du soleil, à l'exclusion de celui réfléchi par l'atmosphère ou de la terre.

La lumière du soleil pénètre dans l'instrument par une fenêtre et elle est ensuite dirigée sur la thermopile qui convertit la chaleur en un signal électrique qui est enregistré. Celui-ci est ensuite converti en une mesure équivalente exprimée en watts par mètre carré [20].



Figure 11 : Le pyréliomètre du rayonnement solaire direct

## 6.5 L'héliographe

L'héliographe est un instrument qui permet de mesurer la durée de l'ensoleillement sur un point de la surface de la planète. Plus précisément, il enregistre la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres distinctes. L'héliogramme est le diagramme d'enregistrement d'un héliographe.[21]

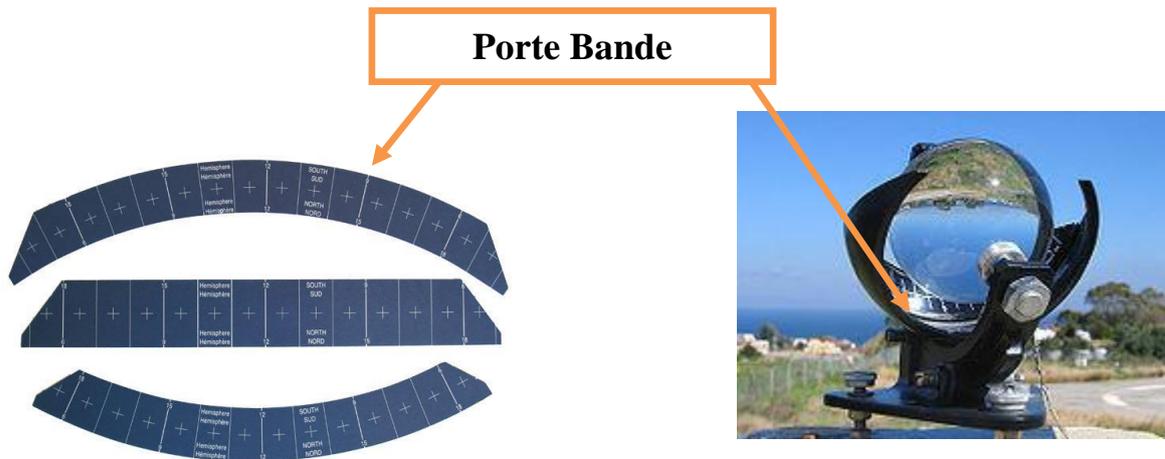


Figure 12 : L'héliographe pour la mesure de la durée d'insolation

## 7. Les stations de mesure du rayonnement solaire:



Figure 13 : Pyranomètre thermopile / pyranomètre thermopile ombré et pyréliomètre [19]



Figure 14 : Pyranomètre avec photodiode et anneau d'ombrage (RST) [19]



- Comparaison entre les systèmes de mesure du rayonnement solaire en fonction de l'incertitude de mesurage.

Source d'erreur	Pyranomètre thermopile/pyranomètre thermopile ombré et Pyrhéliomètre	Pyranomètre avec photodiode et anneau d'ombrage RST
Etalonnage	< $\pm 1,1\%$	$\pm 3\%$ à $\pm 5\%$
Influence de la température	< $\pm 0,5\%$	0% à $\pm 5\%$
Linéarité	< $\pm 0,2\%$	$\pm 1\%$
Stabilité	< $\pm 0,5\%$ / a	< $\pm 2\%$ / a
Sensibilité spectrale	< $\pm 0,1\%$	0% à $\pm 8\%$
Salissure	-0,7% / jour	-0,07% / jour

Tableau 1 : Comparaison de l'incertitude de mesure entre les deux stations [19]

- Comparaison entre les deux stations de mesures :

Type	Avantages	Inconvénients
pyranomètre thermopile / pyranomètre thermopile ombré et pyrhéliomètre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute précision (DNI, GHI &lt; 0,6%, DHI &lt; <math>\pm 2\%</math>)</li> <li>- Sensors distincts pour les différentes composantes du rayonnement solaire DNI, GHI et DHI → plus de fiabilité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frais d'achat élevés: 263500 DH à 620500 DH</li> <li>- Frais d'entretien élevés</li> <li>- Consommation d'électricité importante</li> <li>- Sensibilité à la salissure (nettoyage quotidien)</li> </ul>
Pyranomètre avec photodiode et anneau d'ombrage (RST)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Frais d'achat moins élevés: 107100DH à 131750 DH</li> <li>- Entretien facile</li> <li>- Moins sensible à la salissure (nettoyage 1x/20j)</li> <li>- Moins de consommation d'électricité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- moins précis (DNI -3,5% à -7,5%)</li> <li>- Ecart systématique des mesures</li> </ul>

Tableau 2 : Comparaison entre les deux stations de mesure du rayonnement solaire [19]



## 8. Les modèles satellitaires empiriques et physiques :

L'objectif des modèles du calcul du rayonnement par satellite est d'utiliser l'information observée sur le rayonnement solaire et l'albédo pour calculer le GHI et le DNI. Au cours des dernières années, les récupérations par satellite du GHI ont été utilisées, par exemple, pour les études sur le climat (Justus, Paris et Tarpley 1986 [22]). Ces méthodes peuvent être principalement divisés en méthodes empiriques et physiques (Pinker, Frouin, et Li 1995, Schmetz 1989, Myers 2013 [23]).

Les méthodes empiriques sont basées sur le développement des relations entre les observations satellitaires et les observations au sol. Les procédés physiques estiment le rayonnement à la surface directement à partir des informations obtenues par le satellite en utilisant des schémas d'extraction afin de déterminer les propriétés atmosphériques importantes pour le calcul du transfert radiatif. Les méthodes empiriques ne donnent généralement que le rayonnement global et nécessitent des modèles supplémentaires pour calculer le rayonnement direct à partir du GHI [24].

### 8.1 Les satellites géostationnaires :

Les satellites géostationnaires sont des satellites artificielles qui se situent sur une orbite géostationnaire avec une inclinaison nulle avec l'équateur, sur cette orbite le satellite tourne autour de la terre de manière synchrone ce qui assure une couverture globale continue.[25] A titre d'exemple, le satellite environnemental opérationnel géostationnaire (GOES) couvre du nord et le sud d'Amérique toutes les trois heures et l'hémisphère Nord, y compris les États-Unis, toutes les trente minutes. Deux satellites GOES (GOES -Est, ou GOES- 12 et GOES -Ouest, ou GOES- 11) fonctionnent simultanément et fournissent une couverture de 30 minutes pour l'ensemble des États- Unis. L'instrument imageur sur le satellite GOES mesure à cinq bandes de longueur d'onde.

L'organisation européenne pour l'exploitation des satellites météorologiques possède la série Météosat des satellites qui couvrent l'Europe, l'Afrique, ainsi que l'océan Indien. L'imageur infrarouge et visible des satellites Météosat de première génération (jusqu'à METEOSAT 7) a trois canaux dans le visible ( $0.43 - 0.45 \mu\text{m}$ ,  $0.45 - 0.51 \mu\text{m}$ ,  $0.53 - 0.59 \mu\text{m}$ ), la vapeur d'eau ( $5.7 - 7.1 \mu\text{m}$ ) et l'infrarouge ( $10.5 - 12.5 \mu\text{m}$ ).[24]

### 8.2 Les satellites en orbite polaire :

Les satellites en orbite polaire sont également utilisés pour observer de façon continue la Terre, ils tournent autour de la terre avec une inclinaison de  $90^\circ$  avec l'équateur en couvrant des parties polaires de la terre qui sont difficiles à accéder, Leur couverture temporelle est limitée en raison de leur orbite, dans laquelle ne recouvrent un endroit particulier qu'une fois par jour dans les latitudes plus basses pour récupérer les propriétés des nuages et le rayonnement solaire à la surface.



Un exemple de l'un de ces instruments est le radiomètre de très haute résolution sur la série des satellites NOAA d'une plateforme en orbite polaire. Un autre exemple récent est l'instrument Moderate Resolution Imaging spectroradiomètre sur Aqua et Terra satellites de la NASA.[23]

### 8.3 Les modèles satellitaires empiriques :

Les méthodes empiriques satellitaires considèrent une corrélation pseudo- linéaire entre la transmission atmosphérique et la mesure détectée par le satellite. Ces corrélations ont été utilisées pour créer des relations de régression entre ce qui est en même temps observé par un des instruments satellitaires et terrestres (Cano et al 1986. Hay, Hanson, et Hanson 1978 [26], Justus, Paris et Tarpley 1986 ; Tarpley 1979 [22] ). Hay, Hanson et Hanson (1978) [27] ont créé un modèle de régression qui relie la transmission atmosphérique au rapport entre le rayonnement entrant et le rayonnement hors atmosphère pour calculer ensuite le GHI.

### 8.4 Les modèles satellitaires physiques :

Les modèles physiques utilisent généralement la théorie du calcul du transfert radiatif pour estimer directement le rayonnement à la surface basé sur les premiers principes, les calculs du transfert radiatif impliquent un calcul des différentes interactions entre le rayonnement hors atmosphère et les composants de l'atmosphère à large bande unique ou plusieurs calculs dans différentes bandes de longueur d'onde. La méthode à large bande de Gautier, Diak et Masse (1980) [28] a utilisé des seuils en fonction de plusieurs jours de mesures de pixels par satellite pour déterminer un ciel clair et nuageux. Les modèles du ciel clair et nuageux ont ensuite été utilisées pour calculer le DNI et le GHI de la surface.

### 8.5 Les modèles satellitaires semi-empiriques :

Les modèles semi-empiriques sont classés en raison de leur approche pour la récupération du rayonnement à la surface à partir des observations satellitaires dans lequel est mesurée une réflexion observée par satellite qui est liée à GHI de la surface.

Les indices d'enneuagement qui utilisent des images satellitaires visibles sont créés avec des équations entre le rayonnement hors atmosphère et le rayonnement à la surface. Ces indices sont ensuite utilisés pour modifier le GHI du ciel clair et estiment le GHI au sol par ciel nuageux, ce qui permet d'obtenir le DNI par le GHI et le DNI du ciel clair.

### 8.6 Le satellite METEOSAT:

METEOSAT est une famille de satellites météorologiques géostationnaires réalisée par l'agence spatiale européenne (ESA) au milieu des années 1970 qui permet l'observation continue d'une zone précise du globe, en envoyant de manière régulière des images numériques et des données décrivant la surface terrestre pour que les météorologues arrivent à élaborer des bulletins météorologiques, suivent le climat de la planète et anticipent certains phénomènes ravageurs tels que les ouragans ou les tempêtes.[29]



Figure 15 : METEOSAT de première génération [29]

■ **Caractéristiques techniques :**

Le satellite tourne à 100 tours par minute autour d'un axe parallèle à l'axe Nord-Sud de la terre. Le télescope du radiomètre de Météosat vise la Terre et balaie à chaque révolution du satellite une étroite bande de la surface de la terre. L'angle de balayage est de  $18^\circ$  et il est décrit en 30 ms. Pendant les 570 ms suivantes, le télescope vise l'espace et cette durée est mise à profit pour modifier l'orientation du télescope, de façon qu'au tour suivant, il balaie au sol une bande contigüe à la précédente, mais plus au nord. L'acquisition complète de 2500 lignes exige donc 2500 révolutions du satellite, accomplies en 25 minutes. Les 5 minutes suivantes sont consacrées au retour du télescope à sa position initiale. La phase de non acquisition de données est mise à profit pour calibrer les détecteurs. [30]

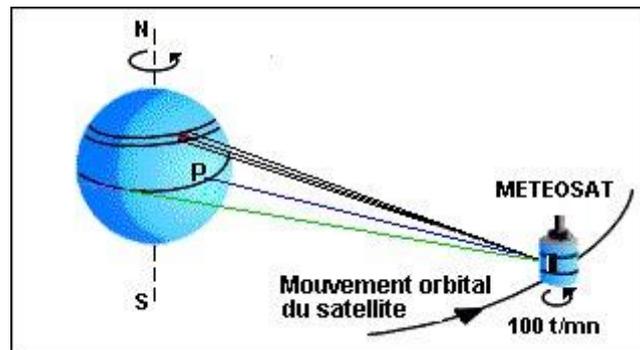


Figure 16 : Principe d'acquisition des images Météosat [30]

**Conclusion :**

Le rayonnement solaire est essentiel pour la survie de la planète grâce à la chaleur qu'il apporte, mais malheureusement au cours de son trajet vers la surface de la terre, ce dernier subit des changements significatifs dus aux différents composants de l'atmosphère y parmi les particules nommées des aérosols.



## Chapitre 3 :

# Les aérosols atmosphériques



## Chapitre 3 : Les aérosols atmosphériques

### Introduction :

Les aérosols sont des petites particules en suspension dans l'air de différentes tailles qui peuvent aller de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètre. Plus la taille des aérosols est grande plus leur résidence dans l'atmosphère est courte et peuvent sédimenter sous l'effet de l'attraction terrestre, ils peuvent être classifiés par leur origine, leur nature, leur histoire et leur taille. Les aérosols qui se propagent dans la partie basse de l'atmosphère (la troposphère) ont une durée de vie d'une semaine à deux semaines, par contre les aérosols peuvent exister dans la partie haute de l'atmosphère (la stratosphère) d'un an à deux ans.[31]

Les aérosols atmosphériques peuvent prendre deux formes liquides ou solides, leur quantité et leurs propriétés sont toujours variables dans l'espace et dans le temps. Les aérosols liquides sont en général de forme sphérique et les aérosols solides prennent une forme caractéristique qui dépend de leurs composants. Ils sont toujours présents dans l'atmosphère mais avec des concentrations variables, cela est dû à la grande hétérogénéité de leurs sources et leur durée vie.

Les aérosols jouent un rôle important dans le bilan radiatif. Plus la concentration des aérosols est grande plus on aura des effets collectifs. Par exemple, une brume sèche qui réduit la visibilité et blanchit l'atmosphère n'est qu'un ensemble d'aérosols qui interagissent avec le rayonnement solaire et peuvent aussi perturber les observations astronomiques et les mesures de la télédétection. Ils peuvent être visibles lorsqu'ils sont en grande quantité sur la surface terrestre comme dans le cas où les poussières sahariennes se déposent sur le manteau neigeux, les petites particules des aérosols peuvent être vues à l'aide d'un microscope électronique.[32]

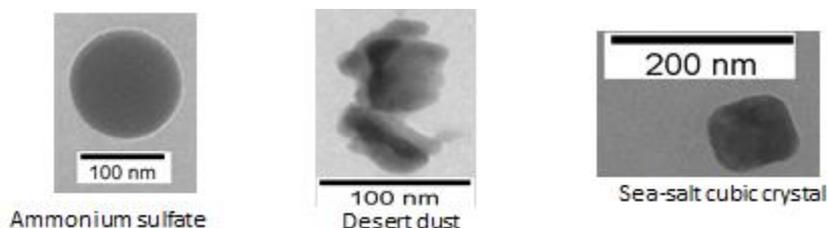


Figure 17 : Exemples d'aérosols atmosphériques

(Photographie de microscopie électronique prises à l'ILM en 2012) [33]



## 1. Classification des aérosols :

La concentration des aérosols présente une variation très importante qui dépend de leur taille, leur composition chimique et de leur forme. Des recherches ont montré que les aérosols influent de manière cruciale sur le climat de la terre qui peut changer en raison du type des aérosols qui peuvent être soit d' aérosols anthropiques ou des aérosols naturels qui eux-mêmes participent au changement climatique[34].

On peut distinguer les différents types d'aérosols atmosphériques en fonction de [35] :

- Leur source
- Leur taille/forme
- Leur processus de formation
- Leur composition chimique

### 1.1 Sources des aérosols :

Il existe de nombreuses sources d'aérosols. Certains sont d'origine naturelle ou anthropique comme [36]:

#### ➤ Les sources naturelles :

##### ▪ Les sels marins :

Ils représentent de fines particules d'eau salées éjectées dans l'atmosphère dues à la friction du vent sur la surface de l'océan. Une partie d'eau peut s'évaporer si la concentration du sel augmente pour donner des particules de sels marins plus hydratées en fonction de l'humidité ambiante. Les aérosols de sels marins ont des tailles allant de cent nm à quelques dizaines de micromètres, mais les grosses particules retombent rapidement à la surface.

##### ▪ les poussières désertiques :

Les conséquences dues au frottement du vent sur la surface terrestre sont l'entraînement des particules arrachées du sol dans l'atmosphère. Cela ne peut être que dans les zones désertiques où le vent ne peut s'arrêter par une végétation qui est absente ou clairsemée, ils ont une taille allant de cent nanomètres à des dizaines de micromètres. Les particules qui sont grosses peuvent être soulevées, mais elles retombent rapidement.

##### ▪ Les composés chimiques émis par la biosphère (aérosol biogénique) :

Le vent peut transporter les pollens et les spores émis par les différentes végétations sur de longues distances ce qui en résulte la relâche de plusieurs virus et de bactéries dans l'atmosphère. Ces particules sont qualifiées comme des aérosols biogéniques primaires.



- **Les aérosols volcaniques :**

Les volcans participent aussi à l'existence des aérosols en diffusant des cendres volcaniques qui sont de fines particules de roches et de minéraux de différentes tailles allant du micromètre au millimètre. Ces cendres peuvent être déplacées sur de longues distances, mais elles sont censées de tomber rapidement. Les gaz soufrés et du sulfure émis par les volcans s'oxydent dans l'atmosphère pour former des aérosols soufrés submicroniques.[32]

- **Les sources anthropiques :**

- **Les sulfates et les nitrates :**

Les sulfates ( $SO_4$ ) et les nitrates ( $NO_3$ ) sont des particules qui marquent une présence considérable dans l'atmosphère. Ces dernières sont produites par la transformation des oxydes de soufre et d'azote lorsque l'air est surchargé d'humidité.

Les sources d'émission des oxydes de soufre sont souvent les usines, les installations de métallurgie et les raffineries et celles d'oxyde d'azote sont les systèmes du chauffage domestique et les automobiles.

- **Les suies :**

Les suies représentent un ensemble de composants chimiques qui se réunissent sous forme de particules solides qui se nichent dans l'atmosphère où elles demeurent. Elles sont dues à la combustion incomplète des combustibles fossiles comme l'essence, fioul et le gazole ou de la biomasse (les végétaux et le bois).

- **Les aérosols provenant des feux de végétation allumés par l'homme :**

Les aérosols des feux de végétation sont également importants en raison de leurs propriétés d'absorption de la lumière. Il y a encore une incertitude sur le signe du forçage radiatif qui est d'ailleurs faible si bien que les aérosols de combustion de la biomasse ont un impact climatique qui est sans doute plus régional que global.

## 1.2 La forme et la taille des aérosols :

La distribution granulométrique des aérosols s'appuie sur le diamètre qui est un paramètre très important. Les aérosols ont plusieurs formes et densités, pour cela il faut se baser sur le concept de la forme sphérique équivalente.

Pour décrire un aérosol, il faut se référer sur deux notions[37]:

- **Le diamètre aérodynamique ( $d_{ae}$ )** : Il correspond au diamètre d'une particule sphérique et de densité  $1\text{g/cm}^3$  ayant la même vitesse de chute dans l'air que la particule concernée.
- **La surface spécifique ( $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )** : la superficie réelle de la surface d'un objet par opposition à sa surface apparente

La taille des aérosols a un impact sur le transport des particules dans l'air et leur élimination de l'atmosphère. Elles se répartissent en deux groupes [38] :

- **Les grosses particules ( $d_{ae} > 2.5 \mu\text{m}$ )** : elles sont générées par des procédés mécaniques de façon naturelle de l'érosion du sol.
- **Les particules fines ( $d_{ae} < 2.5 \mu\text{m}$ )** : elles sont constituées à cause des activités industrielles et urbaines, mais elles peuvent être aussi des particules biogéniques.

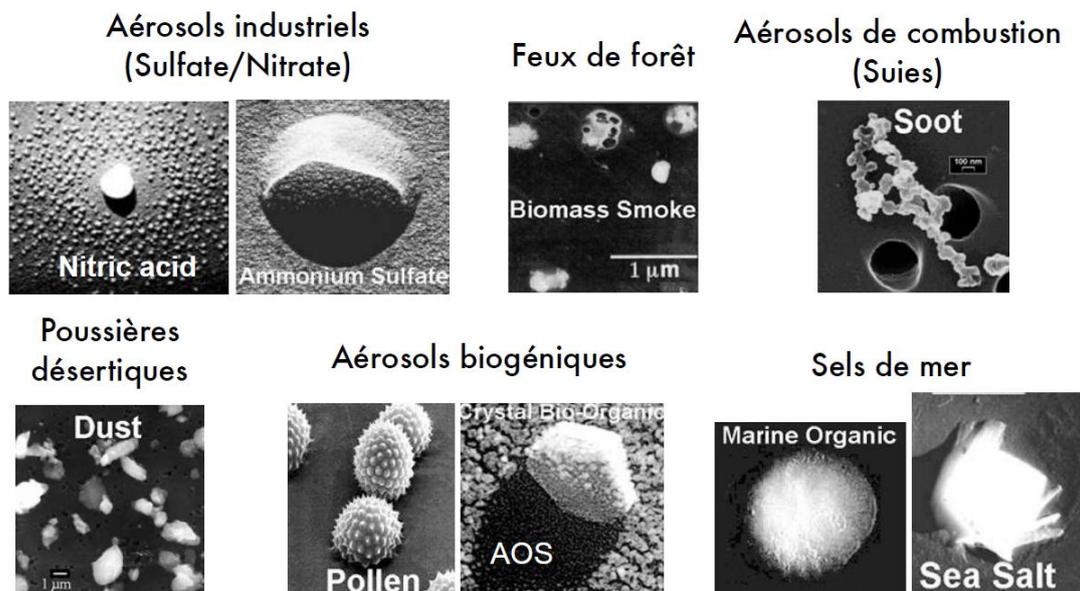


Figure 18 : Les différents types d'aérosols atmosphériques [39]

### 1.3 Le processus de formation des aérosols :

Les aérosols peuvent être classés en aérosols primaires ou secondaires.



- **Les aérosols primaires :**

Les aérosols primaires sont des particules solides ou liquides en suspension dans l'air. Elles sont émises directement dans l'atmosphère depuis une source située au sol, sur la surface de la mer ou dans l'atmosphère [40].

La plupart du temps, ces particules sont d'origine naturelle [37]:

- Action mécanique de l'eau, du gel ou du vent sur les roches, les sols ou les sables
- Evaporation des particules liquides comme dans le cas de la formation des sels marins
- Des éruptions volcaniques.
- Des processus biologiques conduisant à l'émission de pollens, virus, débris végétaux.

- **Les aérosols secondaires :**

Il s'agit d'une suspension de particules solides ou liquides obtenues par la transformation d'une phase gazeuse en une phase condensée accompagnée de l'apparition d'inclusions de noyaux de la phase condensée dans la phase gazeuse : ce processus s'appelle nucléation à partir d'un précurseur gazeux.[40]

#### 1.4 La composition chimique des aérosols:

La composition chimique des aérosols atmosphériques est importante pour cibler leurs différentes sources, leur processus de formation et d'évolution au cours de leur transport. Les sources naturelles des particules comprennent le sol, la poussière terrestre, l'action volcanique, les embruns marins, la combustion de la biomasse et la réaction entre les émissions gazeuses naturelles, alors que les sources anthropiques comprennent le transport, le carburant et d'autres sources.

La composition est variable selon la source de chaque type d'aérosols et les transformations physico-chimiques subies au cours de son transport. L'aérosol peut donc être constitué d'une fraction organique composée de matière organique particulaire incluant des chaînes carbonées à divers degrés d'oxydation issue de processus de combustion incomplet et de carbone de suie et d'une fraction inorganique dominée par les sulfates en atmosphère polluée, pouvant contenir des nitrates, de l'ammonium, du calcium, du magnésium, du potassium, du sodium, du chlore.[41]



Le tableau ci-dessous montre les particules générées à partir des sources naturelles et anthropiques.

Les particules primaires sont libérées directement dans l'air, par contre les particules secondaires sont formées dans l'atmosphère à l'aide des gaz précurseurs.[42]

Type des aérosols	composants	Précurseurs
<b>Des aérosols primaires</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Suie</li><li>- Matériaux géologiques</li><li>- Métal lourd</li><li>- Les matériaux biologiques</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Processus de combustion</li><li>- Transport</li><li>- Vent</li><li>- Agriculture</li></ul>
<b>Des aérosols secondaires</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Sulfate</li><li>- Nitrate</li><li>- Ammonium</li><li>- Carbon organique</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Dioxyde du sulfate</li><li>- L'oxyde de nitrogène</li><li>- Ammoniac</li></ul>

Tableau 3 : Les composants chimiques des aérosols et leurs précurseurs [42]

## 2. Les propriétés optiques des aérosols atmosphériques :

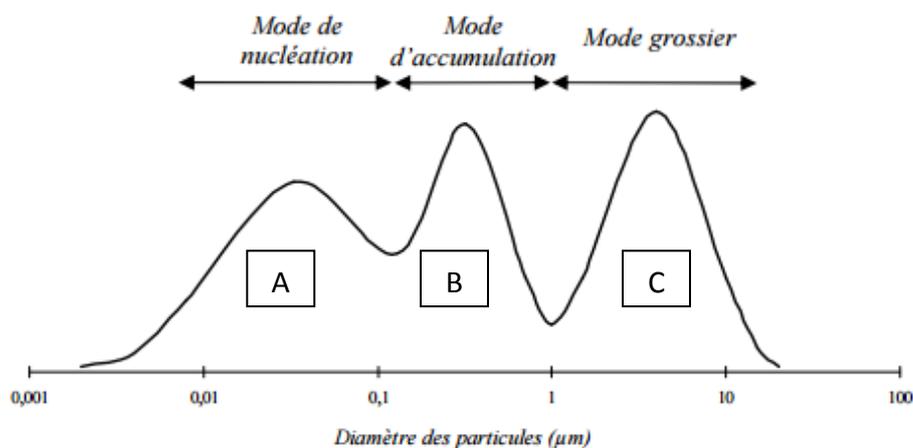
Les propriétés optiques des aérosols jouent un rôle très important dans le bilan radiatif en traduisant leur effet sur le rayonnement solaire. Donc il est nécessaire d'introduire tous ces paramètres optiques dans notre étude sur les aérosols : le diamètre aérodynamique des aérosols, l'épaisseur optique des aérosols AOD dont découle le coefficient d'Angström  $\alpha$ , l'absorption et la diffusion de la lumière par les aérosols.

### 2.1 Le diamètre aérodynamique des aérosols:

Pour évaluer la qualité de l'air, il faut se baser sur la concentration massique des différentes particules d'aérosols PM<sub>x</sub>, c'est-à-dire les particules ayant un diamètre aérodynamique inférieur à x mesuré au niveau du sol.[41]

Les particules sont classifiées suivant les catégories ci-dessous [43]:

- Les particules totales (PM) : l'ensemble des particules dans l'air.
- Les particules fines (PM<sub>10</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ .
- Les particules très fines (PM<sub>2,5</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 2,5  $\mu\text{m}$ .
- Les particules ultrafines (PM<sub>1</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 1  $\mu\text{m}$ .
- Les nanoparticules (PM<sub>0.1</sub>) : les particules de diamètre inférieur à 0.1  $\mu\text{m}$  qui sont considérées comme les particules les plus nocives pour la santé.



**Figure 19 : Représentation d'une distribution volumique typique d'aérosols en fonction de leur diamètre.[44]**

- La classe A représente le mode de nucléation et contient les particules ultrafines.
- La classe B représente le mode d'accumulation et contient les fines particules.
- La classe C représente le mode de nucléation et contient les grosses particules.

Le mode grossier est constitué par les aérosols primaires qui sont principalement de grandes tailles (voir figure ci-dessus). Les modes de nucléation et d'accumulation sont constitués par les aérosols secondaires qui se caractérisent par des tailles plus petites.

#### - L'instrument de mesure d'aérosol Dusttrak :

C'est un appareil qui permet le prélèvement des aérosols en mesurant simultanément les concentrations de fractions massique et granulométrique. C'est un photomètre laser à diffusion de la lumière, il enregistre les données et mesure en temps réel la densité des aérosols selon leurs diamètres aérodynamiques correspondant à PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>4</sub>, PM<sub>10</sub> et le total PM. Un système de ventilation avec gaine isole les aérosols dans la chambre optique et garde les capteurs propres, ce qui favorise une fiabilité supérieure et un entretien minime.[45]



La figure ci-dessous représente la densité des différentes particules mesurées selon leur diamètre aérodynamique à MISSOUR à l'aide de l'instrument DUSTTRAK pour le mois Septembre 2015.

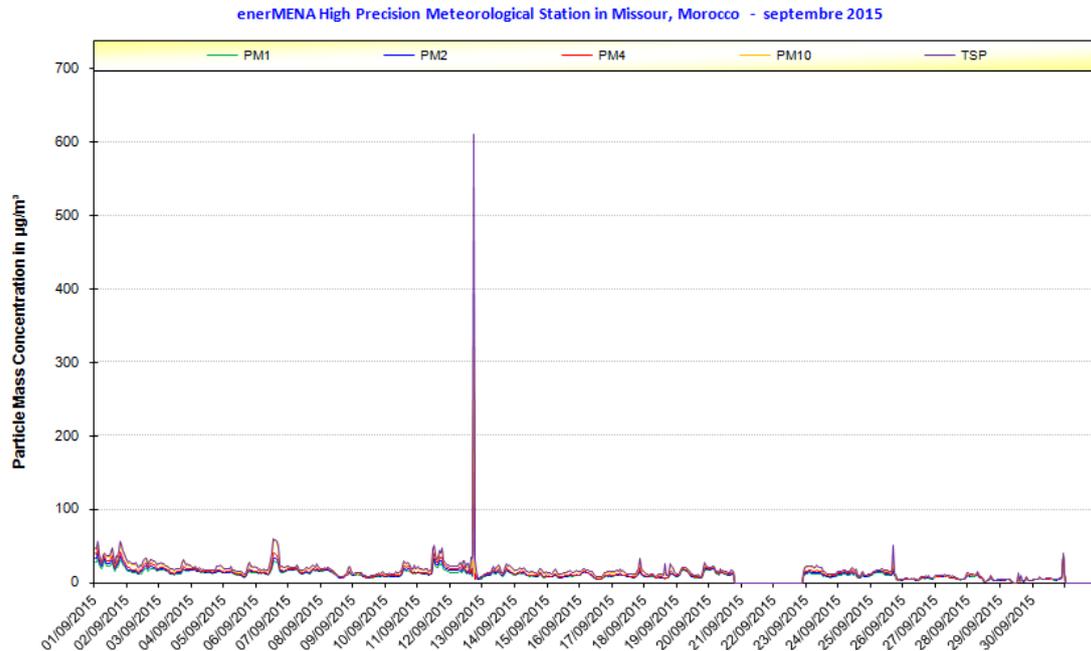


Figure 20 : La densité des différents aérosols suivant leurs diamètres aérodynamiques

## 2.2 L'épaisseur optique des aérosols :

L'épaisseur optique des aérosols AOD est un paramètre à travers lequel on peut quantifier l'extinction du rayonnement solaire lors de sa traversée de l'atmosphère, à la fois par absorption et par diffusion. Plus la valeur de l'épaisseur optique des aérosols est grande plus on a une transmission faible du rayonnement solaire. C'est pour cela que la densité des aérosols est importante et nécessaire de la prendre en considération dans notre étude.

$$\frac{I}{I_0} = e^{-AOD} \quad [31]$$

Avec :

I: le rayonnement solaire à la surface de la terre.

I<sub>0</sub>: le rayonnement solaire hors atmosphère.

AOD : L'épaisseur optique des aérosols.



### 2.3 Calcul du coefficient de trouble d'Angstrom :

L'épaisseur optique des aérosols est variable en fonction de la longueur d'onde. Pour évaluer cette variation, le paramètre est généralement utilisé est le coefficient d'Angström  $\alpha$  (Angström, 1929). [36]

Le coefficient d'Angstrom est défini à deux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  :

$$\frac{AOD(\lambda_2)}{AOD(\lambda_1)} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{-\alpha} \quad [32]$$

La dépendance de ce paramètre de l'épaisseur optique des aérosols le rend très important dans notre étude. D'après la relation ci-dessus on remarque que plus le coefficient d'angström est faible (les épaisseurs optiques varient lentement avec la longueur d'onde) plus les aérosols sont de taille grosse, et plus il est élevé (les épaisseurs optiques varient plus rapidement avec la longueur d'onde) plus leur taille diminue.[46]

### 3. Les effets radiatifs des aérosols :

L'interaction du rayonnement solaire avec les aérosols à une longueur d'onde donnée introduit deux phénomènes variables selon la composition chimique de chaque aérosol : la diffusion et l'absorption.

L'oscillation et l'excitation des différentes charges électriques des particules établit une transmission de la lumière dans toutes les directions ce qui en résulte une énergie diffusée, une partie de cette énergie d'oscillation est convertie en énergie thermique qui est appelée une énergie absorbée.[47]

Il existe trois effets radiatifs des aérosols sur le rayonnement solaire qui sont:

- Effet radiatif direct
- Effet radiatif semi-direct
- Effet radiatif indirect

#### 3.1 L'effet radiatif direct :

Lors de l'interaction, les aérosols dévient le rayonnement solaire dans toutes les directions, une partie de ce rayonnement est renvoyée ensuite vers l'espace ce qui modifie le bilan radiatif de la terre et conduit vers un refroidissement du climat , cet effet lié à la diffusion du rayonnement solaire est exprimé en visible à des brumes sèches ce qui diminue la visibilité et par conséquent une diminution de l'énergie incidente ( un forçage radiatif négatif). Les aérosols absorbent aussi l'éclairement solaire intercepté et provoquent un réchauffement du climat cela résulte un forçage radiatif positif.[48]



### 3.2 L'effet radiatif semi-direct :

Lorsque le nombre d' aérosols absorbants augmente, le climat se réchauffe cela peut modifier les propriétés nuageuses en favorisant certains nuages ou au contraire les faire disparaître par évaporation en les chauffant suivant deux façons [35]:

- **Les nuages au-dessus des aérosols s'affaiblissent :**

Le rayonnement solaire réfléchi par les nuages diminue et la température à la surface de la terre augmente.

- **Les nuages au-dessous des aérosols se renforcent :**

Le rayonnement solaire réfléchi par les nuages augmente et la température à la surface de la terre diminue.

En général, l'effet semi-direct tend à refroidir le climat en augmentant la réflectivité des nuages.

### 3.3 L'effet radiatif indirect:

Les aérosols ont une capacité à servir de noyaux de condensation qui représentent une formation de gouttelettes d'eau nuageuse et de cristaux de glace, donc cela résume que les aérosols jouent un rôle important dans la formation et la taille des gouttelettes d'eau des nuages et cela peut être traduit selon deux processus distincts qui sont [49]:

- Le premier effet indirect correspond à la modification de l'albédo des nuages .En effet, lorsque le nombre des aérosols augmente, ils pénètrent les nuages et se transforment en gouttelettes d'eau et les nuages deviennent plus réfléchissantes ce qui en résulte la diminution de la température de la surface.

- Le second effet indirect est lié au fait que la diminution de la taille des gouttelettes d'eau nuageuse en présence d'aérosols peut provoquer une diminution de la taille nécessaire pour former des gouttes de pluie. Cette diminution a un effet d'augmenter la durée de vie des nuages.

### Conclusion :

Les aérosols jouent un rôle très important en modifiant le bilan radiatif de la terre. Chaque particule se caractérise par un diamètre aérodynamique, une composition chimique, une taille et une forme, C'est pour ces raisons que chacune d'elle pourra avoir un effet différent de l'autre sur le rayonnement solaire.



## Chapitre 4:

# Application du modèle "McClear" de la méthode Heliosat-4



## Chapitre 4 : Application du modèle "McClear" de la méthode Heliosat-4

### Introduction :

L'estimation du rayonnement solaire au sol joue un rôle très important dans le dimensionnement et la gestion des systèmes à énergie solaire. Il a été démontré que les images satellitaires représentent un moyen efficace pour évaluer les ressources solaires incidentes au niveau du sol. Plusieurs méthodes ont été proposées : Moeser et Raschke, 1984 [50] ; Cano et al., 1986 [51]; A. Mechaqrane, Chaoui Roquai, J. Buret Bahraoui « Modèle d'estimation de l'irradiation solaire globale d'une surface horizontale au sol à partir des images satellitaires », journal de physique III, EDP sciences ,1993,3 C5[52] ,Charlock et Alberta, 1996 [53] ; Rigollier, 2000[54] ; Mueller et al., 2004, 2009 [55] ; Rigollier et al., 2004[56]; Lefèvre et al., 2007[57] et Perez et al. (1997)[58]. La méthode de la famille Heliosat qui se répartit en Heliosat 1-2-3 et 4 est basée sur le calcul de l'indice d'ennuage de chaque pixel. Nous utilisons dans notre présente étude, la méthode heliosat-4. Cette méthode se base sur la simulation du transfert radiatif en évaluant toutes les interactions possibles entre le rayonnement solaire et les aérosols, la vapeur d'eau et l'ozone présents dans l'atmosphère.

Heliosat-4 repose sur deux modèles majeurs, le modèle du ciel clair "McClear" et le modèle du ciel nuageux "McCloud". Les paramètres d'entrée de ces deux modèles sont issus des images satellitaires (les propriétés des nuages et la réflectance du sol) et des modèles météorologiques (les propriétés des aérosols, la quantité de vapeur d'eau et de l'ozone).

Dans notre étude, on s'intéresse spécifiquement au modèle McClear du fait qu'on s'intéresse aux propriétés des aérosols. Pour cela, on dispose, pour une année, d'une base de données satellitaire et des données horaires des irradiances solaires globale, directe et diffuse estimées à l'aide de Helioclim-3. Nous disposons aussi, des mesures des épaisseurs optiques des aérosols à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour la même période pour chaque 3 heures ainsi que la quantité de vapeur d'eau et d'ozone.



## 1- Les méthodes de la famille Heliosat :

### 1.1 Heliosat-1, Heliosat-2, Heliosat-3 :

Il existe plusieurs méthodes pour l'estimation du rayonnement solaire à partir des images satellitaires, mais celles de la famille Heliosat sont devenues un standard international depuis les premières publications de Mines Paris-Tech (Cano et al.1988). De nombreuses versions ont été implémentés par plusieurs instituts de recherches en introduisant un traitement opérationnel en temps réel entre la réception de l'image, son traitement par Heliosat, son exploitation dans le système de base de données et la mise en disposition de l'information via un site web soda (<http://www.soda-is.com>).[53]

Heliosat est une méthode qui fait appel à des concepts physiques et statistiques afin de déterminer un indice d'ennuagelement qui sera ensuite converti empiriquement en indice de clarté. Elle a subi plusieurs modifications sur de longues années mais leur objectif commun est de déterminer le rayonnement solaire au sol dans les deux cas du ciel clair et nuageux pour combiner ensuite ces deux résultats en un seul et estimer le rayonnement global au sol pour tout ciel.[60]

Elle se répartit en plusieurs versions parmi lesquelles [61]:

- ✚ **Heliosat-1:** cette version a été proposé par l'université d'Oldenburg qui ont utilisé l'indice du ciel clair défini par le rapport de l'éclairement par ciel nuageux sur l'éclairement du ciel clair, mais cette méthode souffre de quelques inconvénients concernant la détermination de quelques paramètres empiriquement définis.
- ✚ **Heliosat-2:** cette méthode a été conçue à Mines Paris-Tech (Rigollier, 2000; Rigollier et al., 2004 [62]) afin d'améliorer la précision de l'estimation du rayonnement par Heliosat-1 en déduisant l'éclairement solaire à partir de la luminance perçue par le satellite et réunissant le calcul du rayonnement par ciel clair et le calcul de l'extinction du rayonnement en présence des nuages.
- ✚ **Heliosat-3:** c'est une méthode développée à l'université d'Oldenburg qui introduit le modèle Solis de l'éclairement par ciel clair désignant une approximation des équations du transfert radiatif, mais leur exécution est très rapide(Mueller et al., 2004 [63]).

La principale limitation de ces versions c'est que le fait d'inclure des paramètres qui sont déterminés de manière empirique dont le calcul introduit des erreurs qui peuvent influencer sur la qualité du résultat attendu comme dans la détermination de l'indice de clarté à partir de l'indice d'ennuagelement ou la décomposition empirique du rayonnement global en rayonnement direct et diffus.



## 1.2 La nouvelle méthode Heliosat-4 :

Parmi les solutions exploitant le mieux les données satellitaires pour une estimation précise de l'éclairement solaire au sol pour tout ciel se trouve la méthode Heliosat 4 qui s'appuie sur la simulation du code du transfert radiatif (CTR) représentant un programme informatique acceptant en entrée une description des propriétés optiques de l'atmosphère, et plus exactement d'une colonne atmosphérique, et simulant les effets d'atténuation par absorption et diffusion affectant le rayonnement solaire dans son trajet descendant vers le sol, et dont les sorties sont les éclairements spectraux incidents au sol suivant leurs composantes directes et diffuses.[64]

Dans un premier temps, Oumbe (2009) a analysé l'influence de chaque entrée des propriétés optiques de l'atmosphère sur l'éclairement estimé pour voir qui parmi lesquelles sont les plus influentes. Ceci lui a permis de dégager les paramètres suivants:

- L'épaisseur optique des nuages et leur type.
- L'épaisseur optique des aérosols et leur type.
- La quantité de la vapeur d'eau dans la colonne atmosphérique.
- La quantité d'ozone.
- L'albédo ou le facteur de réflexion du sol.

La figure suivante représente la structure de la méthode Héliosat-4 :

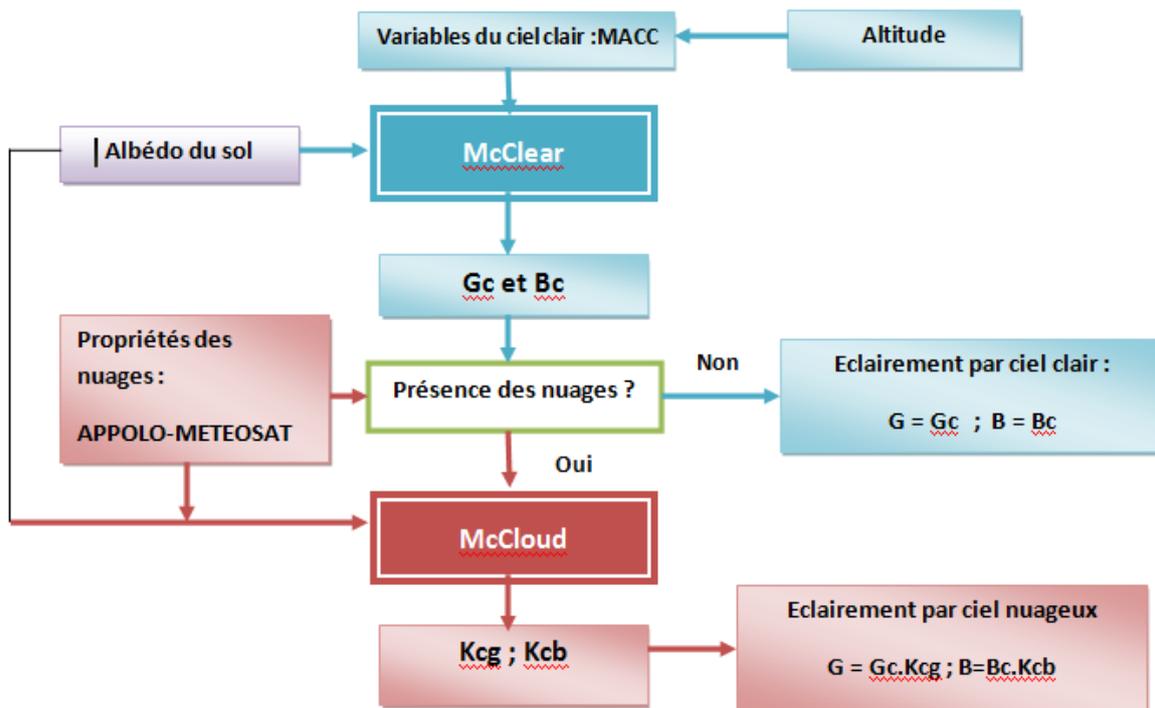


Figure 21 : Structure de la méthode Heliosat-4 [65]



## 2. Le modèle du ciel clair McClear:

Le principal défi du développement d'un modèle pour la récupération de l'éclairement solaire par ciel clair c'est qu'il doit être rapide et capable de générer une série de longues dates avec une couverture spatiale appropriée. Cette exigence empêche l'utilisation opérationnelle des modèles du transfert radiatif parce que les énormes quantités de pixels satellites prendraient trop de temps pour être traités.

C'est pour ces raisons, il y a eu besoin de développer une nouvelle approche du ciel clair pour récupérer l'éclairement au sol. Le concept appliqué dans ce nouveau modèle McClear est l'utilisation de tables de recherche améliorées (LUT).

L'idée derrière l'approche de LUT pour un système de récupération de l'éclairement est d'atteindre la même précision par rapport à celle obtenue par le calcul du transfert radiatif (RTM), mais sans perdre beaucoup de temps pour effectuer ces calculs RTM pour chaque pixel, ce qui conduit vers une performance améliorée du calcul.

L'estimation de l'éclairement par ciel clair dépend principalement de la composition atmosphérique la quantité de la vapeur d'eau, l'ozone et les aérosols qui jouent un rôle très important en raison de leurs différents types, tailles, formes et leurs compositions chimiques. L'approche LUT du modèle McClear nécessite une analyse des composantes de l'interaction entre les variables atmosphériques principales, l'albédo de la surface et l'éclairement solaire à la surface. Cette analyse permet de supprimer les paramètres avec effet marginal sur l'éclairement solaire au sol dans la récupération d'autres processus pertinents pour le ciel clair qui se présentent par [66]:

- L'absorption et la diffusion par la vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O) .
- L'absorption par la quantité d'ozone (O<sub>3</sub>).
- Les réflexions atmosphériques.
- La profondeur optique des aérosols (AOD).

L'effet de la diffusion et l'absorption des aérosols sur l'éclairement est calculé pour les différentes valeurs d'AOD et les résultats sont enregistrés dans la LUT. Par contre, l'effet de la vapeur d'eau, l'ozone et l'albédo de la surface est corrigé après interpolation à un état d'aérosol donné.

La figure suivante donne la structure du modèle McClear :

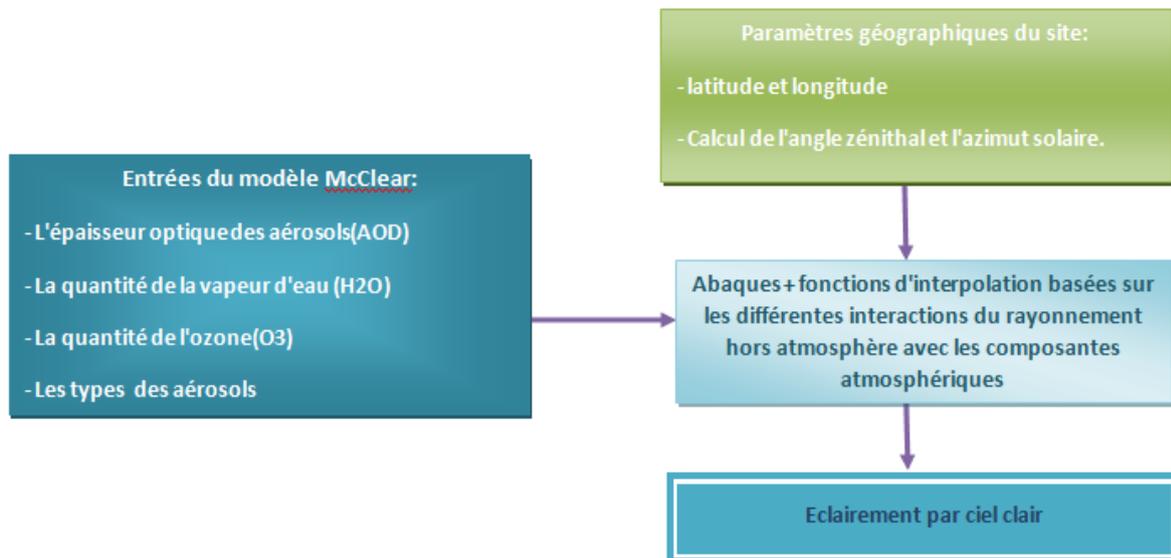


Figure 22 : la structure du modèle McClear [67]

### 3. Description des données disponibles:

#### 3.1 Les données du rayonnement solaire:

Les données sont issues de HelioClim, c'est un ensemble de bases de données de rayonnement solaire sur l'Europe, l'Afrique et l'Océan Atlantique, développé et mis à jour quotidiennement par le Centre "Observation, Impacts, Energie" du Département Energétique et Procédés de MINES ParisTech. [68]

La base HelioClim-1 comprend 21 années, de 1985 à 2005, de données journalières dont la résolution spatiale est de 30 km. En novembre 2011, HelioClim-1 a été reconnue par le Group on Earth Observation (GEO) comme une collection ouverte à tous (Data CORE: Data Collection of Open Resources for Everyone), et celle-ci est accessible librement depuis le Service SoDa [69].

La base HelioClim-2 était un prototype de HelioClim-3, qui a été abandonné en 2011.

La base HelioClim-3 couvre la période du 1er février 2004 à nos jours. Elle comprend des données calculées toutes les quinze minutes à une résolution spatiale de 3 à 8 km. Son accès depuis le Service SoDa est payant, sauf les années 2004 et 2005 qui sont en accès gratuit.

La base HelioClim-4 a débuté au 1er janvier 2013. Elle comprend des données d'éclairement global, direct et diffus, calculées toutes les quinze minutes à une résolution spatiale de 3 à 8 km. [68]



### 3.2 L'épaisseur optique des aérosols, la quantité de la vapeur d'eau et d'ozone :

Le projet MACC (Monitoring Atmosphere Composition and Climate), a été financé par la Commission Européenne dans le cadre du programme FP-7 est un service qui fournit des enregistrements de données sur la composition atmosphérique pendant ces dernières années , les données pour la surveillance des conditions actuelles et les prévisions de la distribution des propriétés des aérosols ainsi que le contenu en vapeur d'eau et en ozone de la colonne atmosphérique pour quelques jours à venir.[12][70]

Le tableau suivant montre les différentes données utilisées dans MACC-RAD

Les variables	Les sources des données	Résolution temporelle	Résolution Spatiale
Les propriétés le les types des aérosols	<b>MACC</b>	<b>3h</b>	<b>1.125 degrés</b>
Les propriétés le les types des nuages	<b>APOLLO (DLR)</b>	<b>15 min</b>	<b>3 km to 10 km</b>
Le contenu de l'ozone	<b>MACC</b>	<b>3h</b>	<b>1.125 degrés</b>
Le contenu de la vapeur d'eau	<b>MACC</b>	<b>3h</b>	<b>1.125 degrés</b>
L'albédo du sol	<b>Mines Paris Tech</b>	<b>Des valeurs mensuelles</b>	<b>6 km</b>

Tableau 4 : Les différentes données issues de MACC-RAD [71]

## 4. Etude de cas pour MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN :

### 4.1 Carte d'identité des villes :

#### Situation géographique et climat:

MISSOUR est située au nord-est de la ville de Fès à 50 km de Boulmane et 450 km de Midelt, elle est implantée dans un désert de pierres, avec une latitude de 32.86°N, une longitude de 3.59 W et une altitude de 1107m, riche en sites archéologiques et géologiques. Son climat est sec, aride et la température varie de 0°C en hiver à 50 °C en été .[72]

BENGUERIR est une ville du Maroc, chef-lieu de la province de Rehamna dans la région de Marrakech-Safi. À 72 km de Marrakech, BENGUERIR est connue pour sa production de phosphate et la présence de la plus grande base militaire marocaine. Elle se trouve sur un axe principal reliant de l'est à l'ouest du Maroc les villes d'El Kelâa des Sraghna et de Safi, et

du nord au sud les villes de Casablanca et de Marrakech, avec une latitude de 32.12 N une longitude de 7.57 W et une altitude de 449m. Son climat est sec et la température peut arriver jusqu'a 50°C.[73]

Tan-Tan est une ville marocaine, chef-lieu de la province de Tan-Tan, dans la région de Guelmim-Oued Noun, elle est située au sud-ouest du Maroc, à 330 km au sud d'Agadir, avec une latitude de 28.25 N, une longitude de 11.05 W et une altitude de 51m. Son climat est désertique et chaud, la pluie est pratiquement inexistante. La température moyenne annuelle est de 20.4 °C. Il tombe en moyenne 95 mm de pluie par an.[74][75]

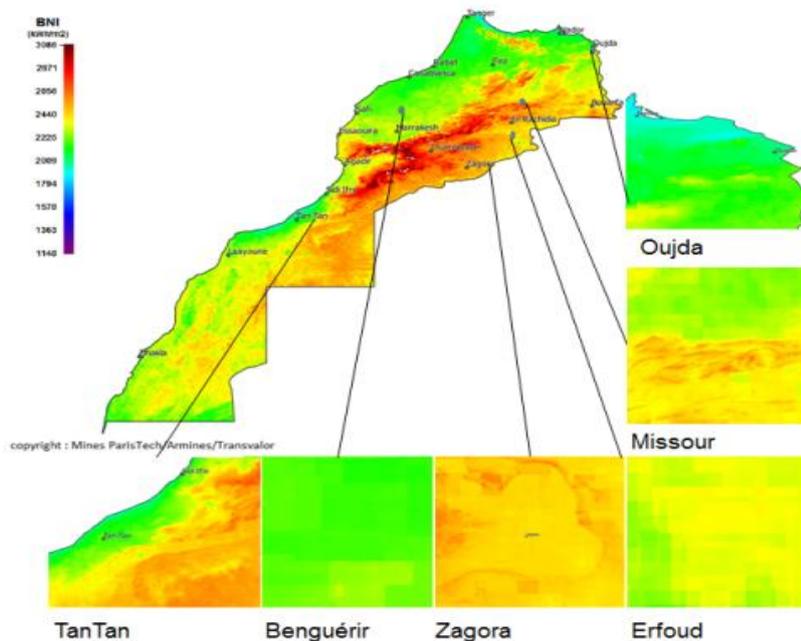


Figure 23 : Situation géographique de quelques régions au Maroc y parmi MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN

#### 4.2 L'effet de la vapeur d'eau et de l'ozone sur le rayonnement hors atmosphère:

Avant d'arriver au sol, le rayonnement solaire doit traverser l'atmosphère terrestre. Les gaz spécifiques comme l'ozone (O<sub>3</sub>), le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et vapeur d'eau (H<sub>2</sub>O), ont une très haute absorption des photons qui ont des énergies proches des énergies de leurs liaisons. Cette absorption donne des creux profonds dans la courbe spectrale du rayonnement au sol. [76]

En évaluant l'impact de la vapeur d'eau et d'ozone sur le rayonnement solaire hors atmosphère E0 à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN on a obtenu les résultats suivants :

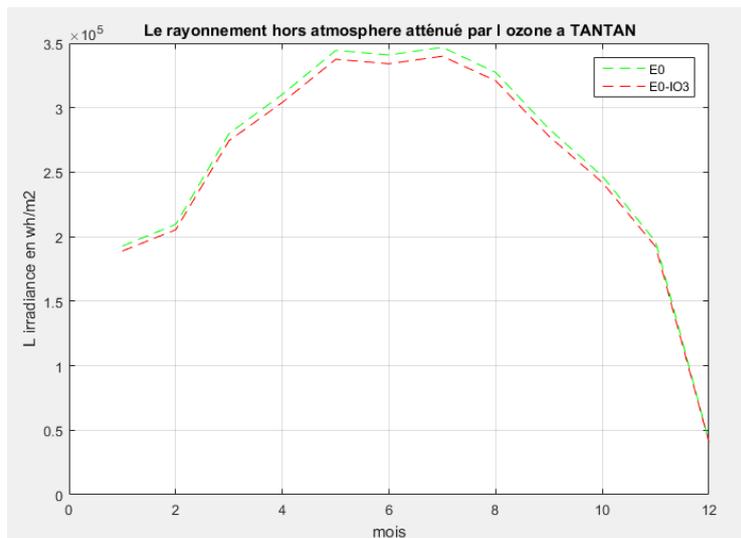
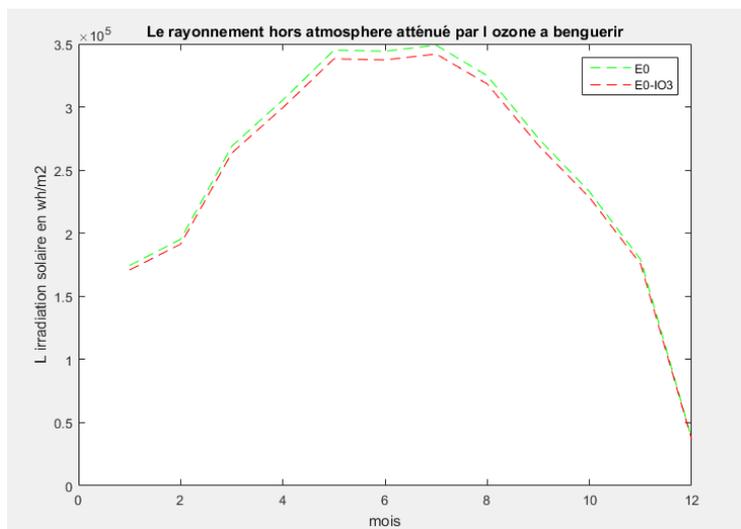
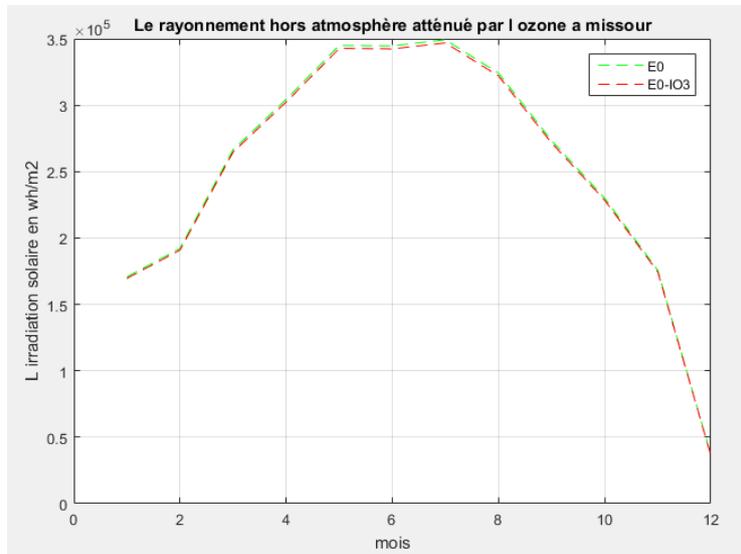


Figure 24 : Le rayonnement hors atmosphère atténué par la quantité d'ozone à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015

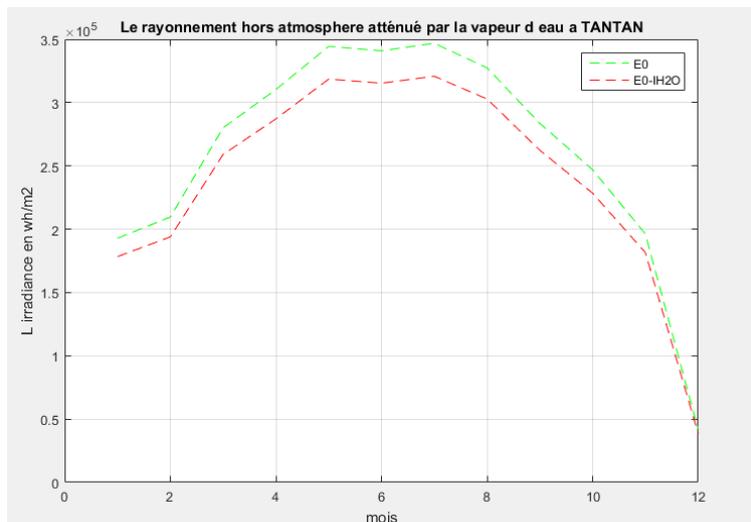
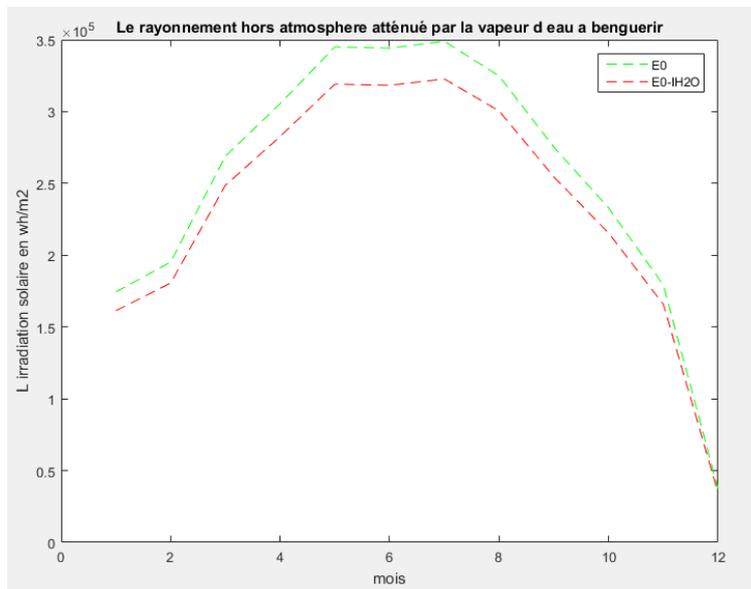
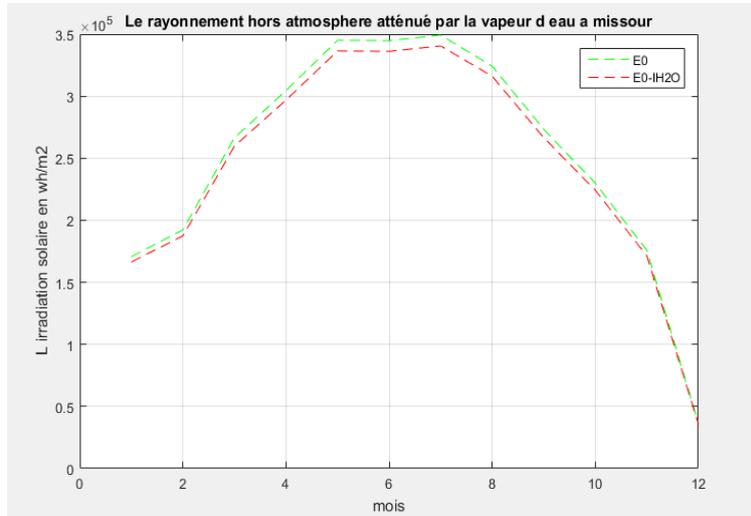


Figure 25 : Le rayonnement hors atmosphere atténué par la quantité de la vapeur d'eau à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015



- D'après les graphes ci dessus, on observe que la quantité de l'ozone n'a pas une grande influence sur le rayonnement hors atmosphère par contre l'influence de la quantité de la vapeur d'eau est significative.

#### 4.3 L'effet des réflexions atmosphériques :

L'interaction du rayonnement solaire avec des particules atmosphériques peut entraîner une réflexion qui exprime la part du rayonnement solaire qui va être renvoyée par l'atmosphère et la surface terrestre vers l'espace et qui donc ne servira pas à chauffer la planète.

La réflexion est une grandeur qui s'exprime soit par un pourcentage entre 0% et 100%, qui est donc le pourcentage de lumière réfléchié par rapport à la quantité reçue, soit par un chiffre entre 0 et 1, qui est la fraction de la lumière réfléchié.[77]

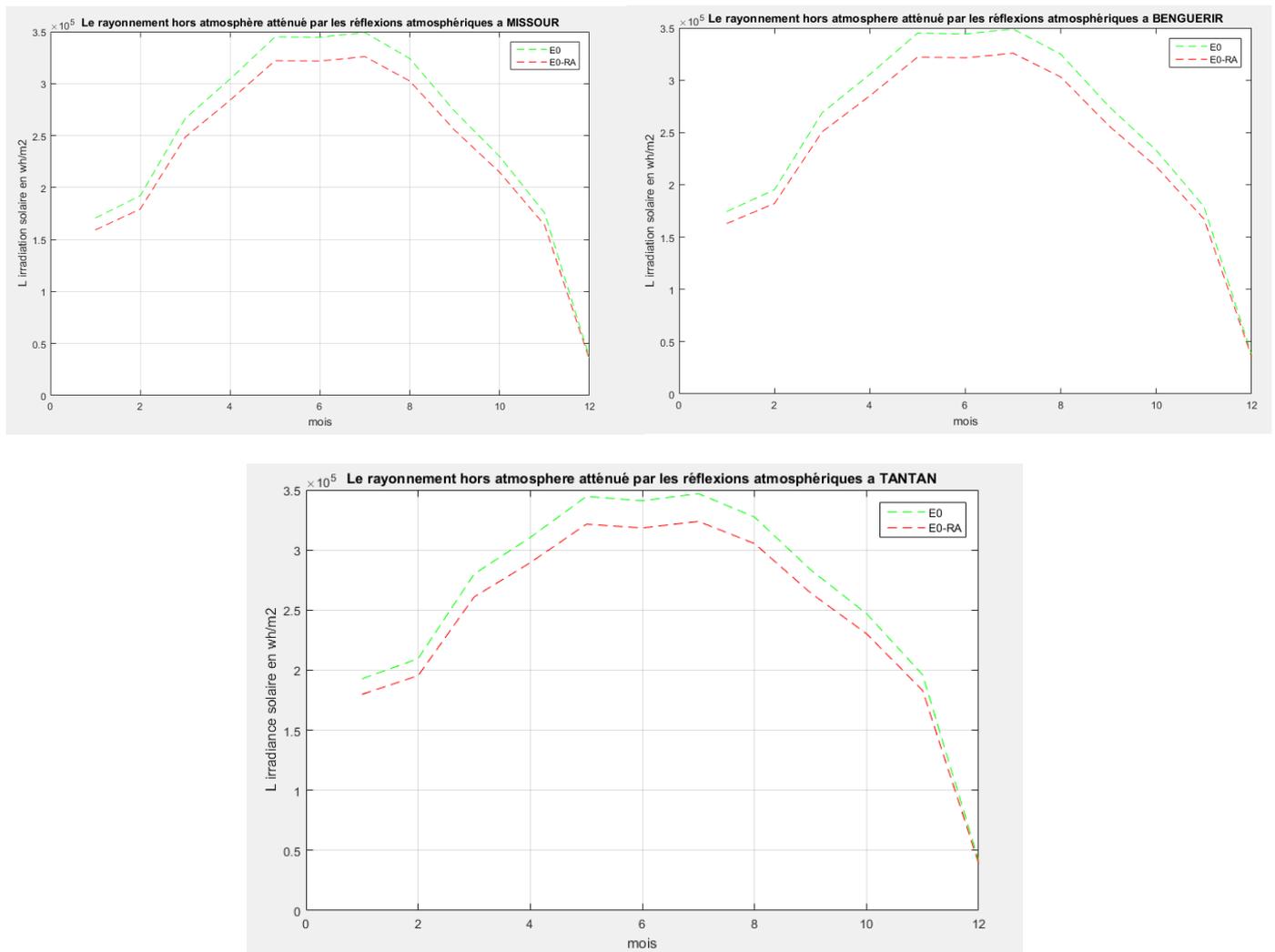


Figure 26: Le rayonnement hors atmosphère atténué par les réflexions atmosphériques à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015



#### 4.4 Effet des aérosols sur le rayonnement hors atmosphère :

Le rayonnement solaire interagit avec les différents types d'aérosols et de cette interaction résultent deux phénomènes possibles en fonction de la composition chimique des aérosols : la diffusion et l'absorption.

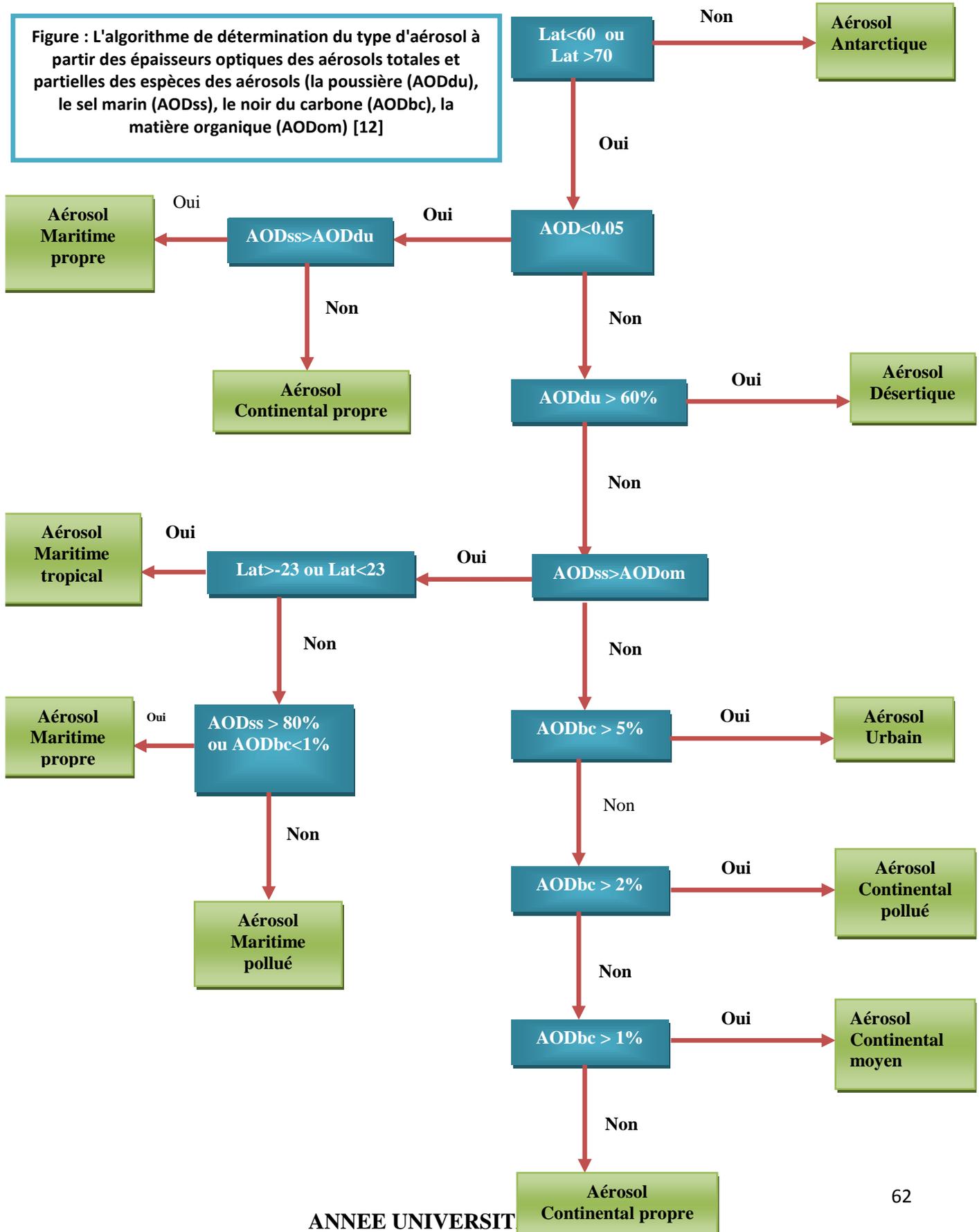
L'énergie diffusée représente celle de l'excitation des charges électriques de la particule et leurs oscillations, une partie de cette oscillation est convertie en énergie thermique ce qui en résulte l'énergie absorbée.

Pour évaluer l'impact des aérosols sur le rayonnement solaire à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN, il faut d'abord déterminer les différents types d'aérosols existants dans l'atmosphère. Pour se faire, on s'est basée sur un algorithme qui permet de distinguer les différents types d'aérosols à partir des épaisseurs optiques partielles fournies par le programme MACC.

Ce programme donne l'épaisseur optique totale pour les longueurs d'onde 550 nm et 1240 nm, à partir desquelles le coefficient d'Angstrom est calculé. Ces épaisseurs optiques partielles sont utilisées pour déterminer automatiquement le type d'aérosols et plus précisément le mélange dont le nom décrit l'origine typique des ensembles de particules : urbain, continental propre, continental pollué, continental moyen, maritime propre, maritime pollué, maritime tropical, antarctique, et désertique [12].



Figure : L'algorithme de détermination du type d'aérosol à partir des épaisseurs optiques des aérosols totales et partielles des espèces des aérosols (la poussière (AODdu), le sel marin (AODss), le noir du carbone (AODbc), la matière organique (AODom) [12]





Pour exprimer l'atténuation du rayonnement hors atmosphère par les différentes épaisseurs optiques pour chaque type d'aérosols, on a déterminé la valeur de l'éclairement hors atmosphère correspondant à l'instant de prélèvement de chacune d'épaisseur optique convenable à chaque type d'aérosol :

$$I_{AOD} = E0.AOD \quad [32]$$

$I_{AOD}$  : L'éclairement hors atmosphère atténué par l'épaisseur optique des aérosols.

$E0$ : l'éclairement hors atmosphère correspondant à chaque AOD

AOD: L'épaisseur optique des aérosols pour la longueur d'onde 550 nm.

Après classification des types des aérosols et exécution du programme on a eu les variations correspondantes au rayonnement hors atmosphère pour chaque type d'aérosols à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN :

- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type maritime propre pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

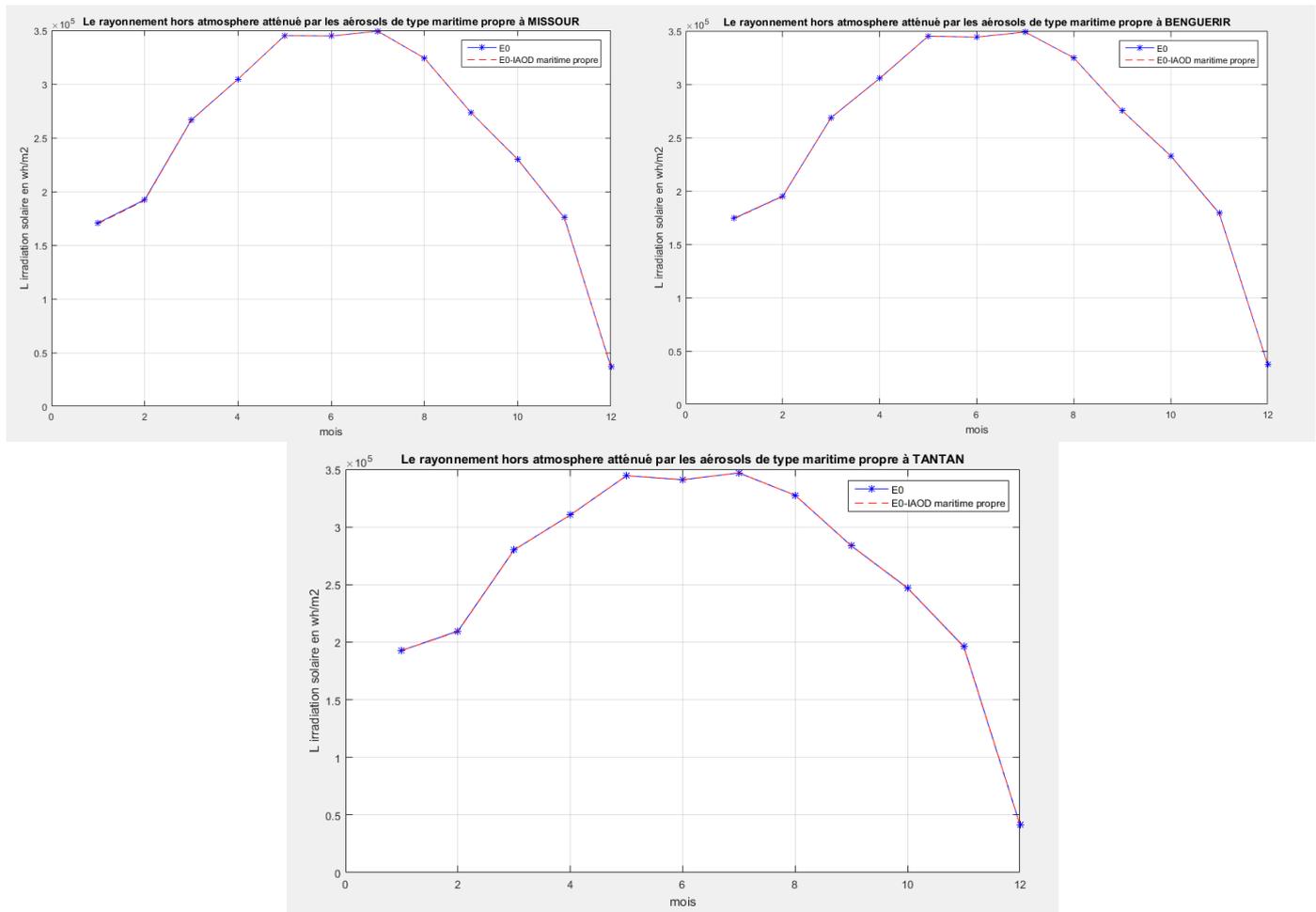


Figure 27 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type maritime propre à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



D'après les figures ci-dessus on conclut que les aérosols de type maritime propre n'ont pas modifié de manière significative le rayonnement hors atmosphère pour les trois sites.  
- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type maritime tropical pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

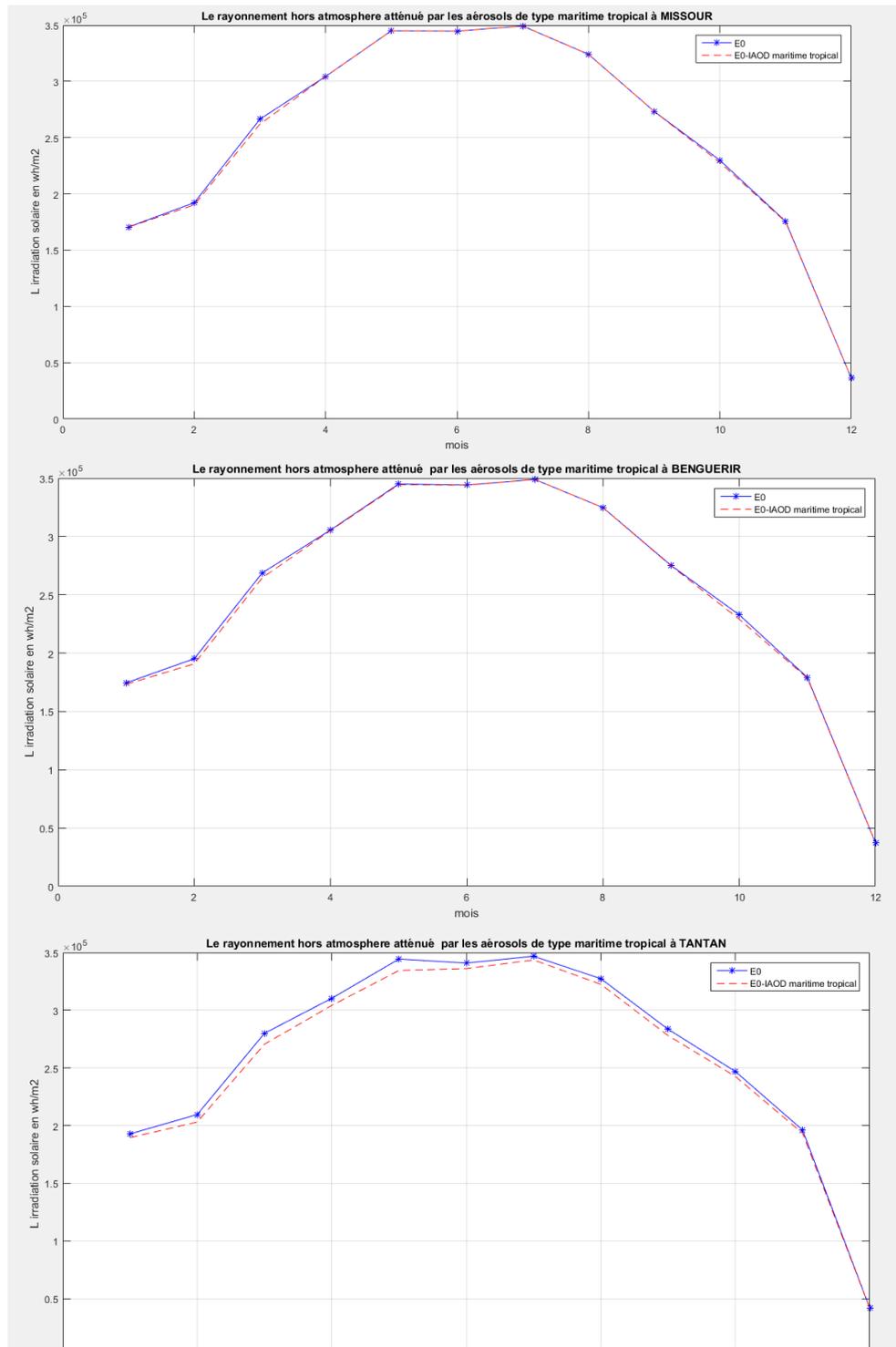


Figure 28 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type maritime tropical à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



Selon les figures ci-dessus, on remarque que le rayonnement hors atmosphère a été plus atténué par le type des aérosols maritime tropical à TANTAN que les autres sites. Cela est dû à la grande quantité d'aérosols maritime tropical à TANTAN.

- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type continental propre pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

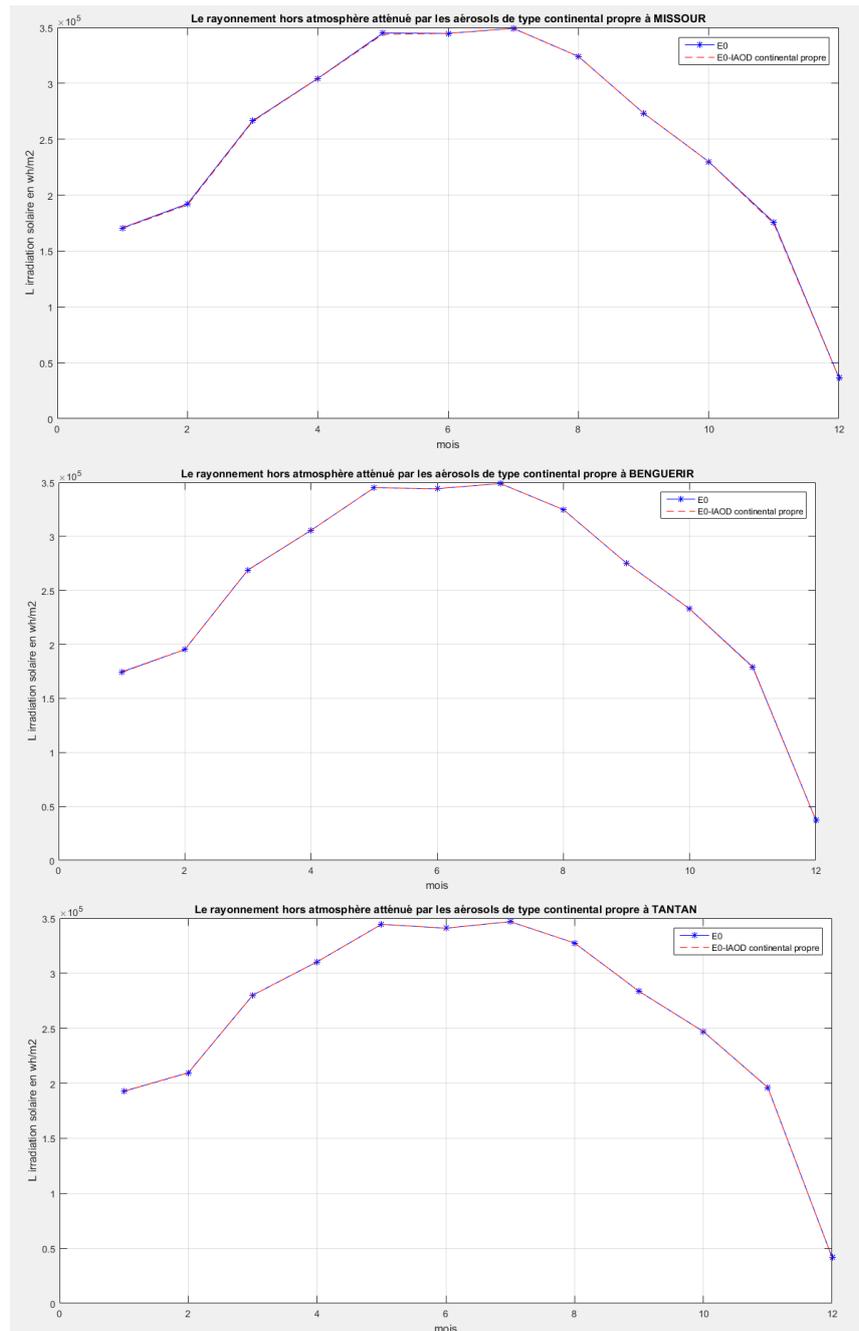


Figure 29 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type continental propre à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type continental moyen pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

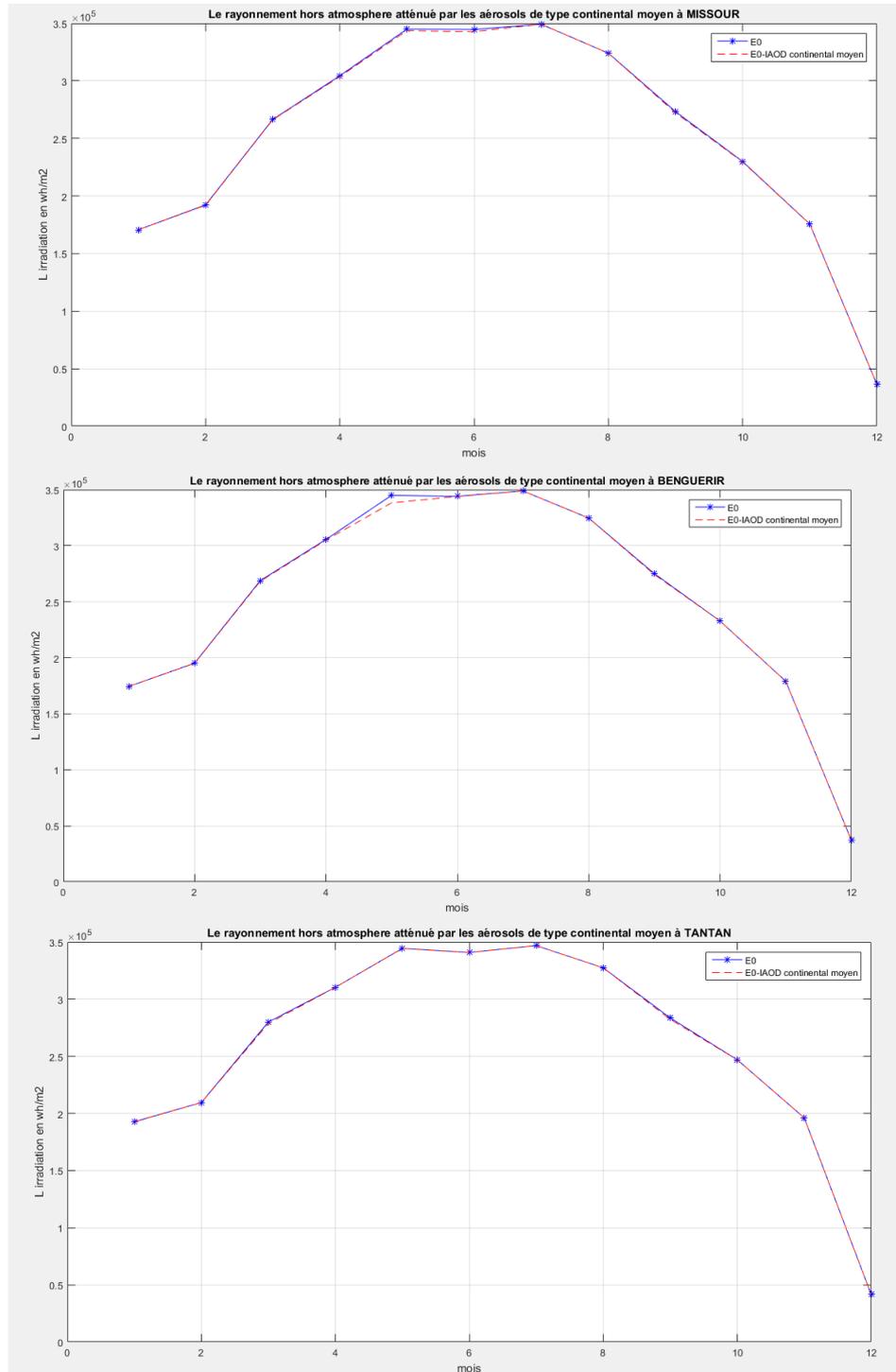


Figure 30 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type continental moyen à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



Le rayonnement hors atmosphère est plus atténué par les aérosols de type continental moyen à BENGUERIR pour le mois 5.

- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type continental pollué pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

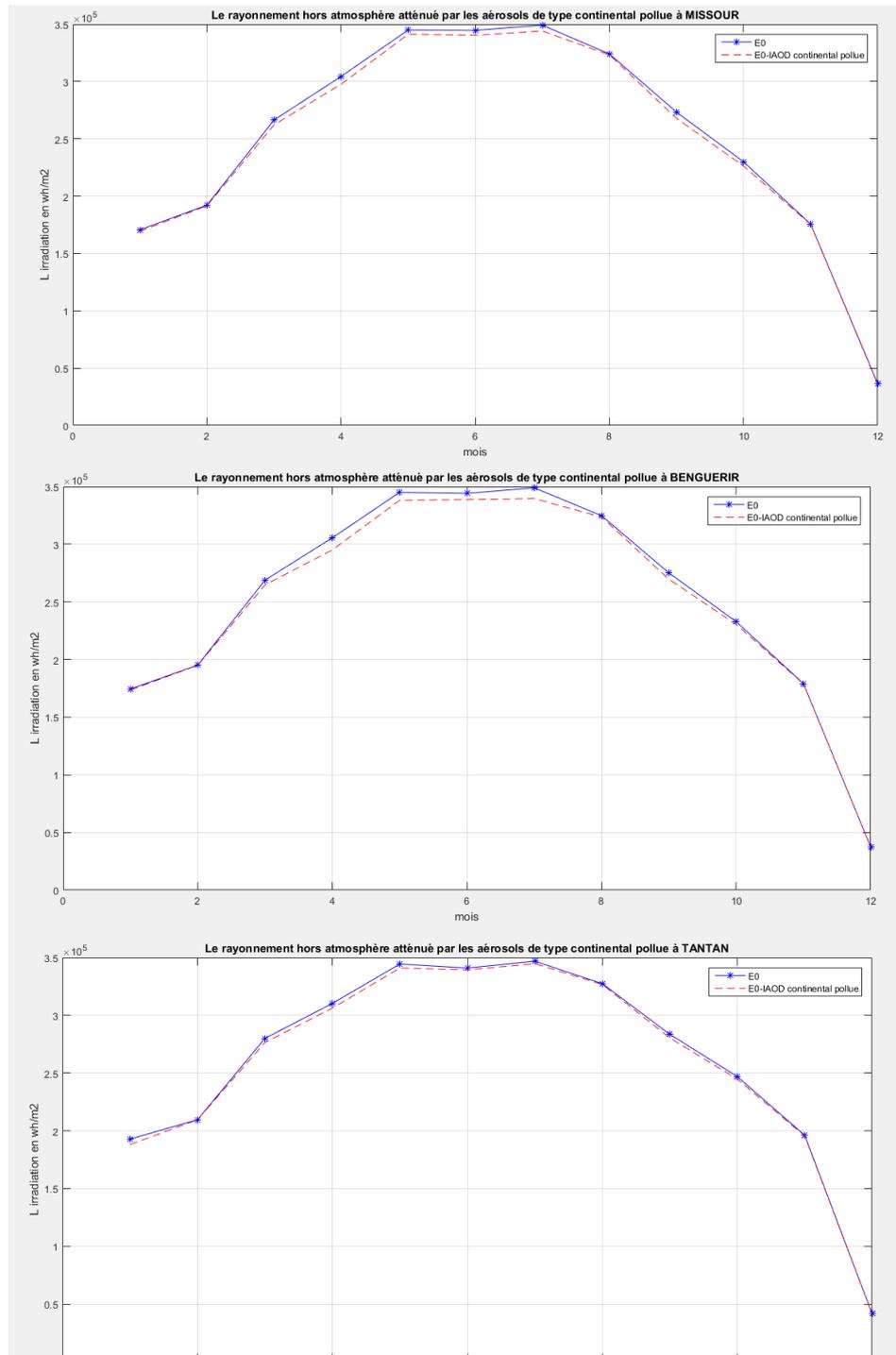


Figure 31 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type continental pollué à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



Le rayonnement hors atmosphère est plus atténué par les aérosols continental pollué à MISSOUR et BENGUERIR à cause de leur grande existence dans ces sites par rapport à TANTAN.

- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type urbain pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

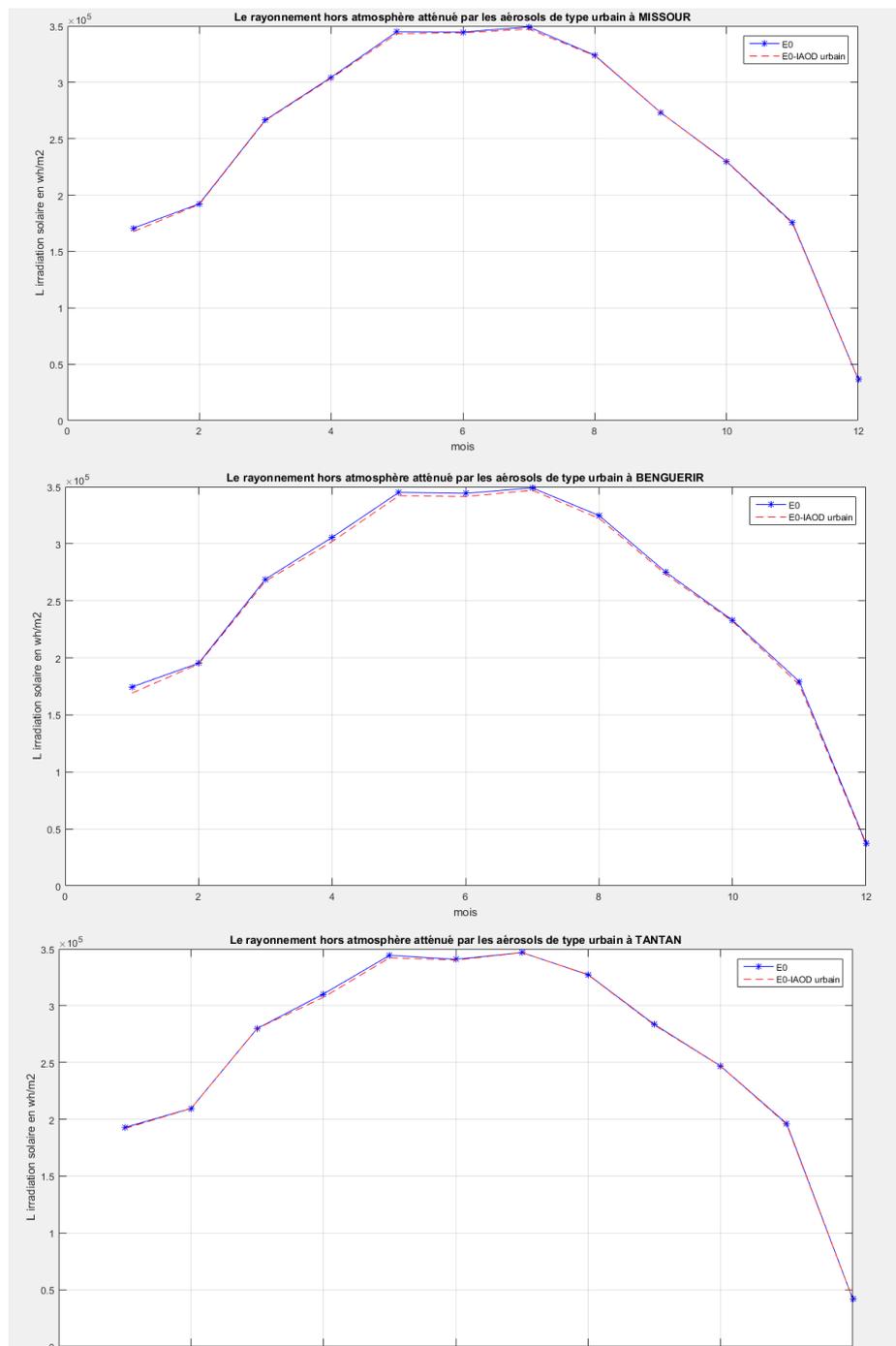


Figure 32 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type urbain à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



- Le rayonnement hors atmosphère atténué par les aérosols de type désertique pour les trois sites pour chaque mois de l'année 2015:

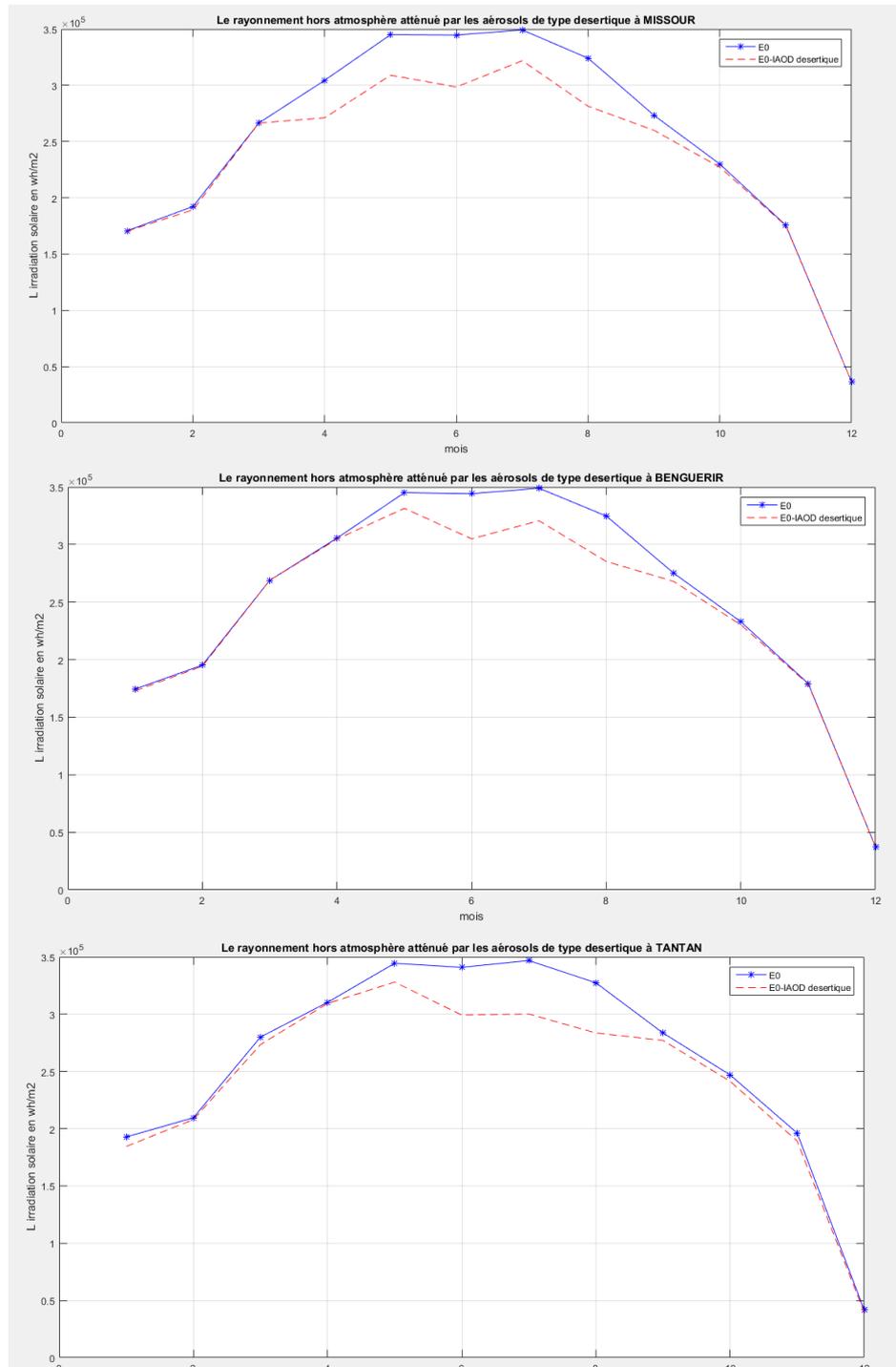


Figure 33 : Atténuation mensuelle du rayonnement hors atmosphère due aux aérosols de type désertique à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour l'année 2015



### Conclusion :

D'après les figures ci-dessus, on remarque que chaque type d'aérosols a une influence sur le rayonnement hors atmosphère mais d'après les résultats qu'on a eu les aérosols de type désertique sont plus pertinents et modifient le rayonnement hors atmosphère d'une façon marquante.

- Le rayonnement hors atmosphère atténué par tous les effets atmosphériques (les types des aérosols, la vapeur d'eau, l'ozone et les réflexions atmosphériques à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN durant l'année 2015 :

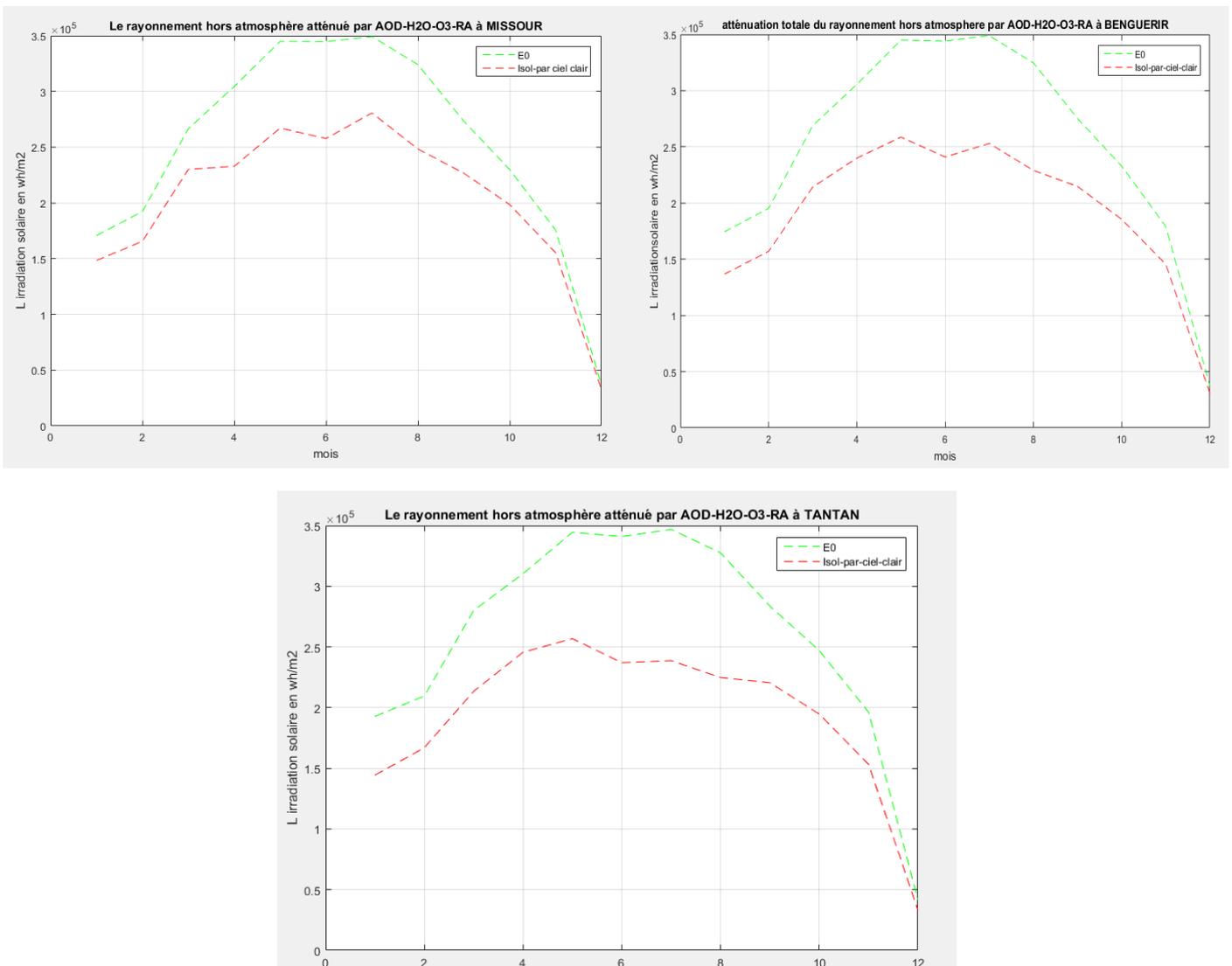


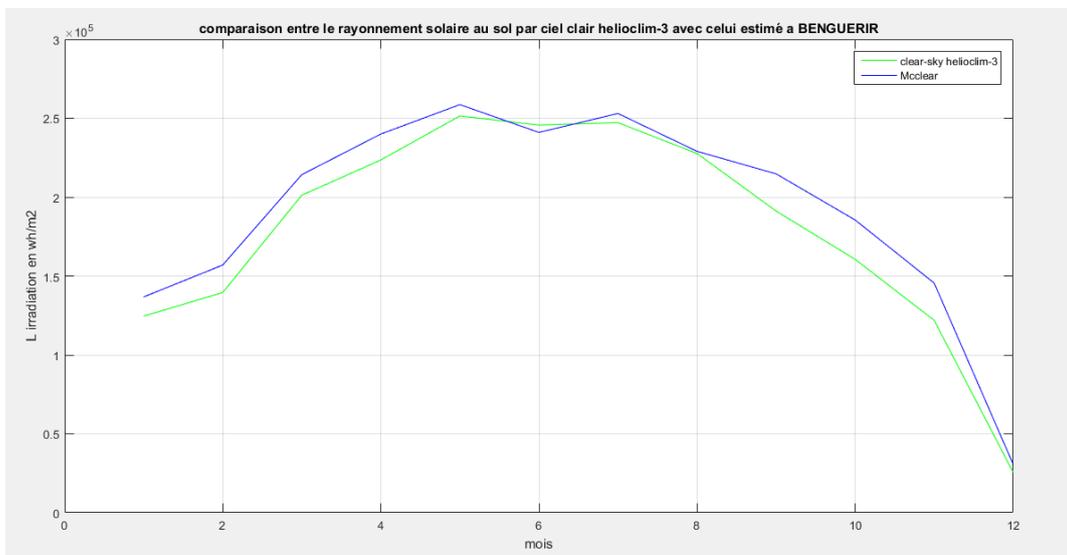
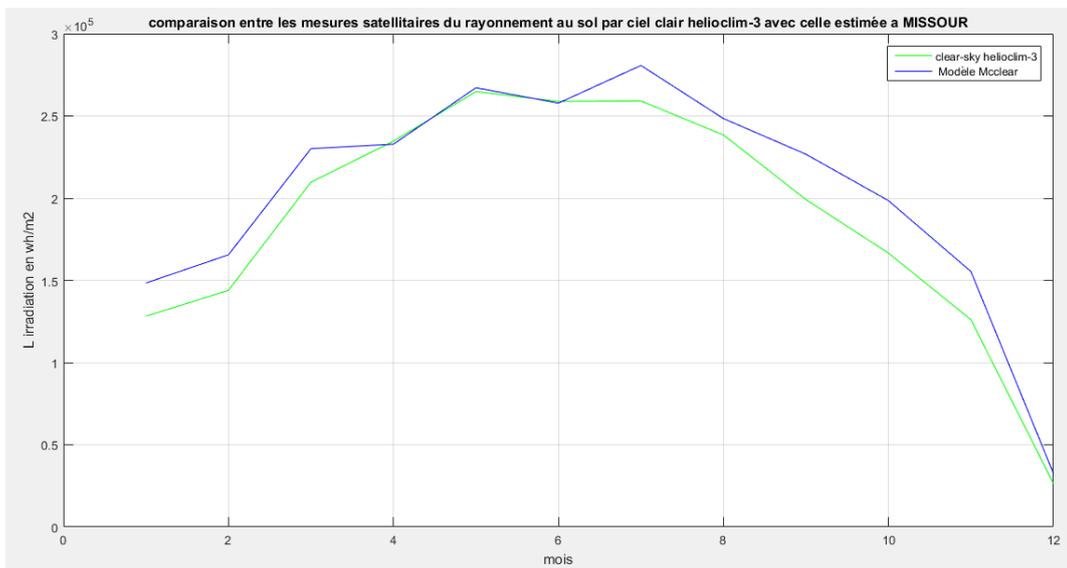
Figure 34 : Le rayonnement hors atmosphère atténué par tous les effets atmosphériques à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN pour chaque mois de l'année 2015



D'après les graphes ci-dessus, on remarque que l'impact des effets atmosphériques sur l'éclairement hors atmosphère est significatif et varie en fonction de chaque mois par exemple une grande atténuation est observée pour la période entre le mois trois et le mois dix, ce qui nous permet de conclure que la quantité des aérosols est plus grande pour les saisons du printemps et l'été.

## 5. Comparaison statistique :

Après une comparaison entre les mesures satellitaires par ciel clair de l'éclairement solaire avec celle estimées par le modèle McClear pour les trois sites on a eu le résultat suivant :



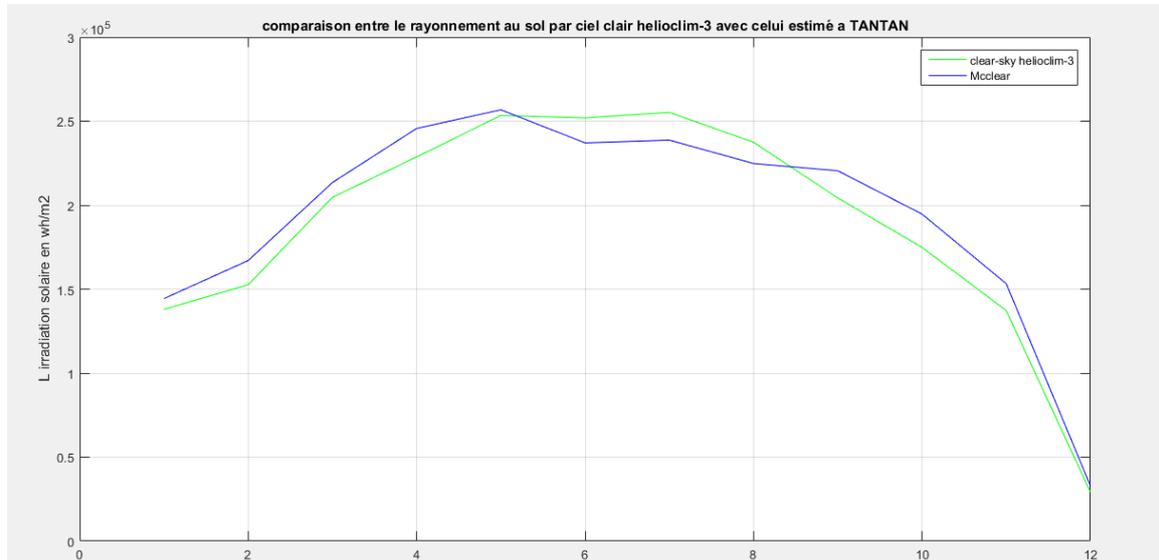


Figure 35 : Comparaison entre l'éclairement par ciel clair au sol issue de Helioclim-3 et celui estimé par le modèle McClear à MISSOUR, BENGUERIR et TANTAN durant l'année 2015

On remarque qu'on a eu presque la même allure concernant les trois figures avec des fluctuations en quelques points dues à l'absence des mesures des épaisseurs optiques des aérosols pour toutes les heures.

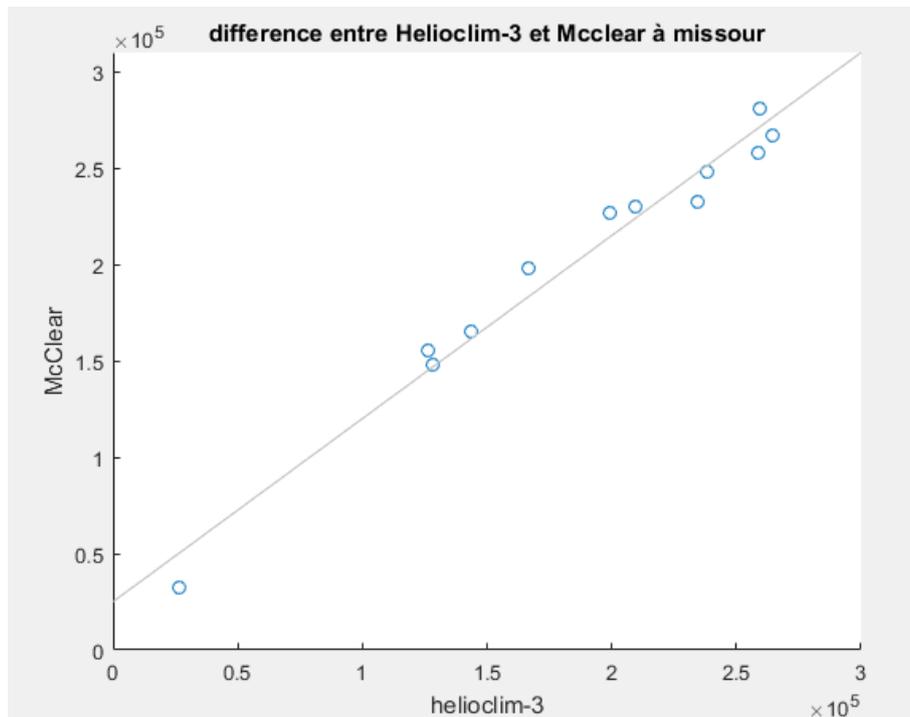


Figure 36 : Différence entre les mesures de helioclim-3 par ciel clair et celles du modèle McClear à MISSOUR durant l'année 2015

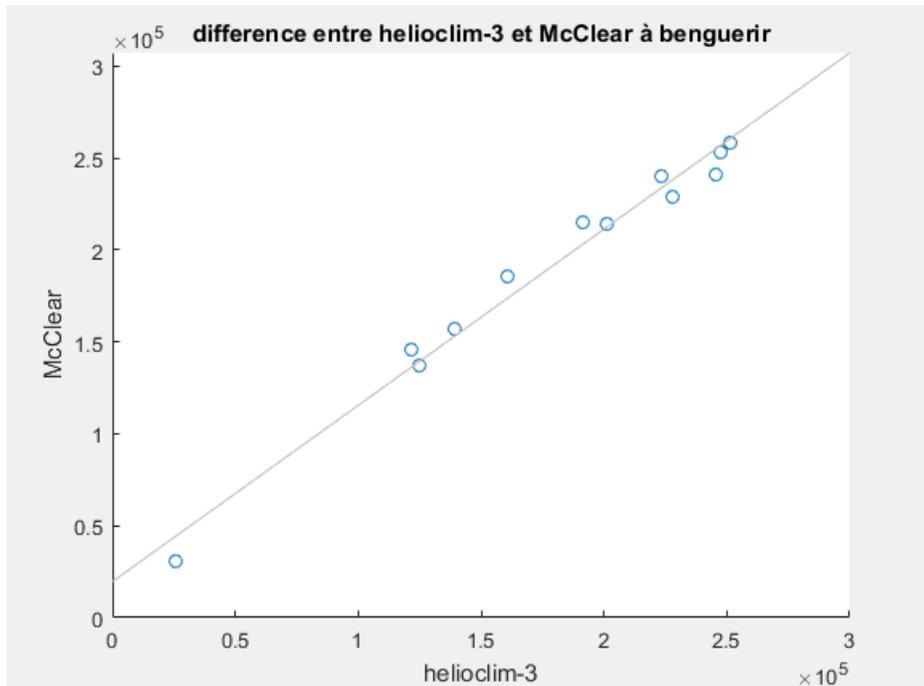


Figure 37 : Différence entre les mesures de helioclimate-3 par ciel clair et celles du modèle McClear à BENGUERIR durant l'année 2015

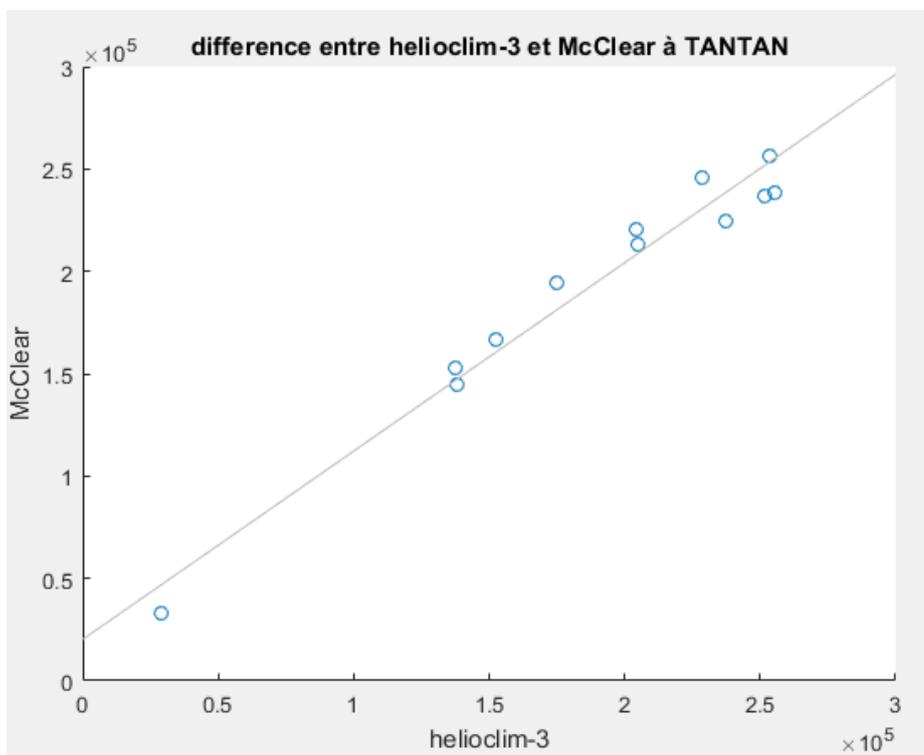


Figure 38 : Différence entre les mesures de helioclimate-3 par ciel clair et celles du modèle McClear à TANTAN durant l'année 2015



✚ Les erreurs statistiques :

▪ Le biais :

Le biais d'un estimateur est la différence entre la valeur de son espérance et la valeur de la variable aléatoire qu'il est censé estimer.[78]

$$\text{Biais} = E_{\text{clear-sky-helioclim3}} - E_{\text{McClear model}} \quad [33]$$

▪ Le RMSE:

Le RMSE (Root mean square error )d'une prédiction du modèle par rapport à une variable estimée est définie comme étant la racine carrée d'erreur quadratique moyenne [79]:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{\text{clear-sky-helioclim3}(i)} - E_{\text{McClear model}(i)})^2}{n}} \quad [34]$$

mois	helioclim_3	McClear_estime	biais en %	RMSE en %
1	128150	148350,4833	--15,76315513	4,550430929
2	143887	165513,7678	-5,03038343	4,338897958
3	209705	230107,8557	-9,72931294	2,808610722
4	234659	232811,5713	0,787282269	0,227268815
5	264815	267145,4331	-0,880023073	0,254040779
6	258792	257791,2981	0,38668193	0,111625458
7	259100	280701,6759	-8,337196411	2,406741296
8	238405	248404,9182	-4,194508588	1,210850331
9	199100	226687,3569	-13,85603059	3,999891495
10	166556	198461,8694	-19,15624138	5,52993056
11	126027	155358,9705	-23,27435431	6,718727362
12	26280	32508,7824	-23,70160731	6,842064679

Tableau 5 : Calcul des différents erreurs statistiques du modèle McClear à MISSOUR durant l'année 2015



mois	helioclim_3	McClear_estime	biais en %	RMSE en %
1	124577	136744,8698	-9,767348547	2,819590657
2	139521	156946,0881	-12,48922248	3,605327981
3	201203	214228,1229	-6,47362261	1,868773878
4	223554	239976,6254	-7,346155918	2,120652548
5	251415	258626,0205	-2,868174333	0,827970612
6	245681	240999,8212	1,905389021	0,550038432
7	247220	252997,2773	-2,336897217	0,674604119
8	227648	229019,878	-0,602631255	0,173964659
9	191179	214760,0344	-12,33453172	3,560672605
10	160586	185511,2373	-15,52142609	4,480649765
11	121954	145535,4304	-19,33633206	5,58191826
12	25515	30634,0407	-20,06286772	5,791651041

Tableau 6 : Calcul de différentes erreurs statistiques du modèle McClear à BENGUERIR durant l'année 2015

mois	helioclim_3	Mcclear_estime	biais en %	RMSE en %
1	137971	144387,1572	-4,650366526	1,342445183
2	152611	167020,6632	-9,442086874	2,725695699
3	204679	213463,427	-4,291806683	1,238937872
4	228734	245669,5534	-7,40403849	2,137361808
5	253419	256771,0046	-1,322712425	0,381834187
6	251962	237056,3116	5,915847787	1,707758156
7	255243	238718,9334	6,473856913	1,868841516
8	237446	224790,4199	5,329877151	1,538603004
9	204321	220492,9144	-7,914954606	2,284850586
10	174853	194685,8069	-11,34256026	3,274315111
11	137278	153253,1834	-11,63710383	3,359342515
12	29073	32847,8026	-12,98387714	3,74812248

Tableau 7 : Calcul de différentes erreurs statistiques du modèle McClear à TANTAN durant l'année 2015

## 7. Réalisation d'une interface graphique à MATLAB (GUI) :

Pour automatiser notre modèle, on a créé une interface graphique qui va nous faciliter la tâche sans besoin de refaire le même calcul pour les différentes régions au Maroc. Elle fournit des outils pour réaliser des interfaces utilisateurs pour des applications personnalisées et des contrôles tels que les menus, des boutons et des curseurs [79]. Pour plus de contrôle sur la conception et le développement, on crée également un code MATLAB qui définit chaque étape les propriétés et le comportement de notre modèle. Pour notre cas on entre seulement le nom du site et son latitude et le traitement commence de manière autonome en passant par chaque étape du modèle McClear.

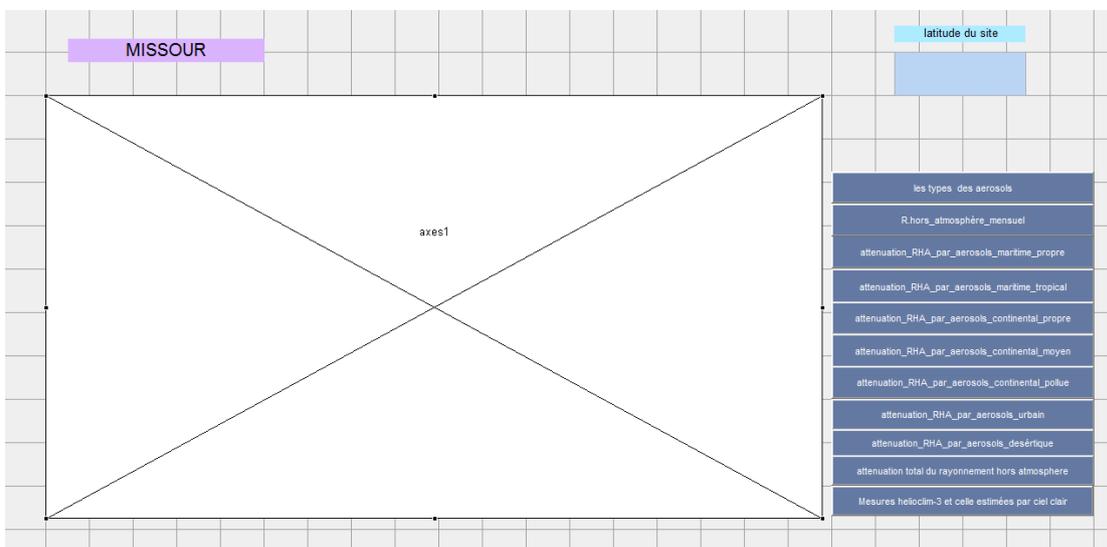


Figure 39 : Création d'une interface graphique

- On programme chaque étape nécessaire à notre modèle McClear correspondant à chaque bouton de la manière suivante :

```
gui.m  x  +
1  function varargout = gui(varargin)
2  % GUI MATLAB code for McClear Model réalisé par BOUNOUA ZINEB
3  % GUI, by itself, creates a new GUI or raises the existing
4  % singleton*.
5  %
6  % H = GUI returns the handle to a new GUI or the handle to
7  % the existing singleton*.
8  %
9  % GUI('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
10 % function named CALLBACK in GUI.M with the given input arguments.
11 %
12 % GUI('Property','Value',...) creates a new GUI or raises the
13 % existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
14 % applied to the GUI before gui_OpeningFcn gets called. An
15 % unrecognized property name or invalid value makes property application
16 % stop. All inputs are passed to gui_OpeningFcn via varargin.
17 %
18 % *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
19 % instance to run (singleton)".
20 %
21 % See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
22 %
23 % Edit the above text to modify the response to help gui
```

Figure 40 : Le code MATLAB correspondant à notre interface graphique

- On exécute notre interface et après le traitement du modèle McClear on aura la figure ci-dessous de notre application :

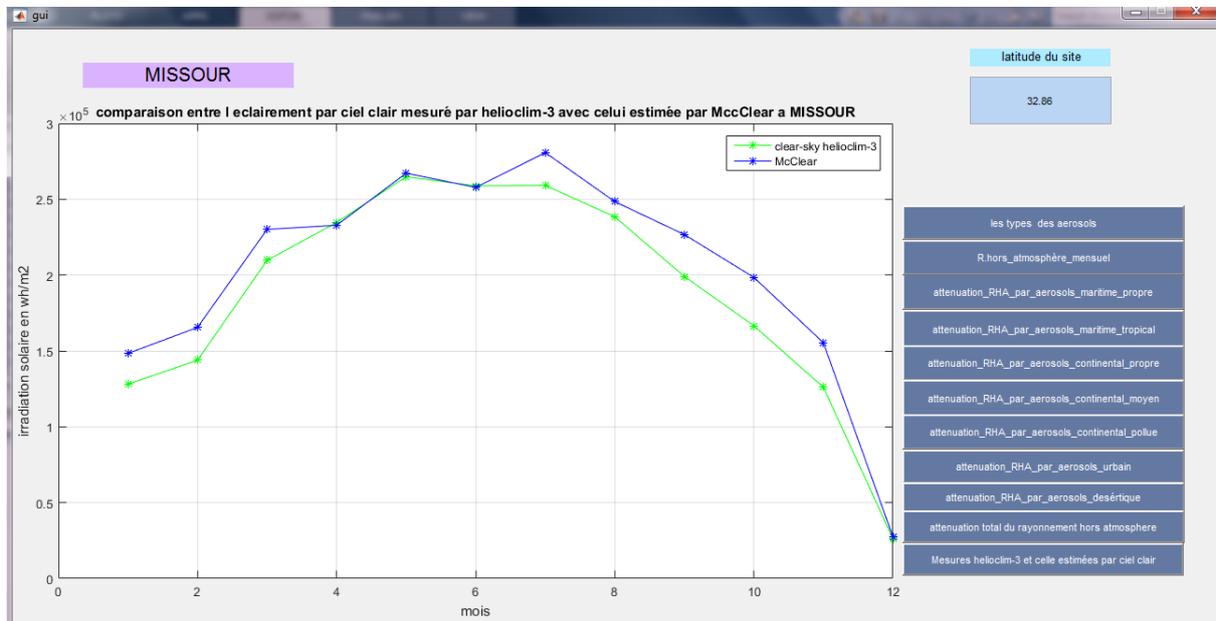


Figure 41 : L' interface graphique après exécution et traitement du modèle McClear

### Conclusion :

D'après les résultats qu'on a eu en évaluant l'effet de chacun des propriétés atmosphériques, on constate que es aérosols, la vapeur d'eau, l'ozone et les réflexions atmosphériques ont une influence remarquable qu'on doit absolument considérer pour estimer l'éclairement solaire au sol.

Les tableaux suivants donnent l'impact de ces différents paramètres pour les trois sites étudiés.

Les propriétés atmosphériques à MISSOUR	Influence sur le rayonnement hors atmosphère en %
<b>AOD des aérosols</b>	<b>9%</b>
<b>Quantité de la vapeur d'eau</b>	<b>2.5%</b>
<b>Quantité de l'ozone</b>	<b>0.7%</b>
<b>Les réflexions atmosphériques</b>	<b>8.5%</b>
<b>TOTAL</b>	<b>20.7%</b>

Tableau 8 : L'influence en pourcentage des propriétés atmosphériques sur le rayonnement hors atmosphère à MISSOUR en 2015



Les propriétés atmosphériques à BENGUERIR	Influence sur le rayonnement hors atmosphère en %
AOD des aérosols	8%
Quantité de la vapeur d'eau	7.5%
Quantité de l'ozone	2%
Les réflexions atmosphériques	9%
<b>TOTAL</b>	<b>26.5%</b>

Tableau 9 : L'influence en pourcentage des propriétés atmosphériques sur le rayonnement hors atmosphère à BENGUERIR en 2015

Les propriétés atmosphériques à TANTAN	Influence sur le rayonnement hors atmosphère en %
AOD des aérosols	9.15%
Quantité de la vapeur d'eau	7.5%
Quantité de l'ozone	2%
Les réflexions atmosphériques	10%
<b>TOTAL</b>	<b>28.65%</b>

Tableau 10 : L'influence en pourcentage des propriétés atmosphériques sur le rayonnement hors atmosphère à TANTAN en 2015



## Conclusion générale

Dans le présent travail, nous avons utilisé le modèle McClear de la méthode Heliosat-4 pour modéliser les effets des aérosols sur le rayonnement solaire. Ce modèle est basé sur des tables de recherches LUT et des fonctions d'interpolation.

Basé sur des tables de recherches LUT et des fonctions d'interpolation, le modèle McClear a été appliqué et validé en trois stations marocaines: BENGUERIR, MISSOUR et TANTAN.

Cette analyse nous a permis de conclure que les aérosols ainsi que d'autres constituants atmosphériques ont un rôle important dans l'atténuation du rayonnement solaire incident au sol pour les trois sites étudiés, surtout pour la saison d'été.

En ce qui concerne l'estimation de l'éclairement solaire global incident au sol par ciel clair, le modèle McClear montre une bonne performance en comparaison avec les mesures satellitaires par ciel clair avec des écarts quadratiques moyens compris entre 0.11 à 6.84% à MISSOUR, 0.17 à 5.79% à BENGUERIR et 0.38 à 3.74% à TANTAN.

Ce travail restera pour nous une référence et un point de départ pour apprendre, développer et améliorer notre savoir-faire ainsi que notre culture en énergies renouvelables.

Ce présent stage nous a permis de tisser des liens d'amitié avec beaucoup de personnes avec qui nous avons partagé de longs moments de travail.

Nous tenons à féliciter tous les membres de l'institut IRESEN et surtout l'équipe GEP pour leur professionnalisme, leurs sérieux et l'amour avec lequel ils exercent leurs travaux.



## Références:

- [1]: <http://www.iresen.org/fr/iresen.html> (consulté le 05/05/2016).
- [2]: [Plateforme Internationale de test, de recherche et de formation Green Energy Park Benguérir ppt](#) (consulté le 05/05/2016).
- [3]: <http://www.iresen.org/fr/membres.html> (consulté le 05/05/2016).
- [4]: <http://www.iresen.org/fr/structure.html> (consulté le 05/05/2016).
- [5]: <http://www.iresen.org/fr/iresen.html> (consulté le 05/05/2016).
- [6]: [Projet ORC-PLUS Présentation, objectifs et avantages industriels, économiques et sociaux.](#) (consulté le 05/05/2016)
- [7]: <http://www.iresen.org/fr/projets.html> (consulté le 05/05/2016)
- [8]: <http://www.greenenergypark.ma/#Presentation> (consulté le 05/05/2016)
- [9]: [https://www.google.co.ma/search?q=distribution+spectrale+du+rayonnement+solaire&biw=1366&bih=643&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjnrafzmeHMAhWDCy wKHYgADwUQ\\_AUIBigB#tbn=isch&q=distribution+spectrale+du+rayonnement+solaire+corps+noir&imgsrc=vsH8MDghXE0nnM%3A](https://www.google.co.ma/search?q=distribution+spectrale+du+rayonnement+solaire&biw=1366&bih=643&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjnrafzmeHMAhWDCy wKHYgADwUQ_AUIBigB#tbn=isch&q=distribution+spectrale+du+rayonnement+solaire+corps+noir&imgsrc=vsH8MDghXE0nnM%3A) (consulté le 16/05/2016)
- [10]: <http://www.newport.com/Introduction-au-rayonnement-solaire/411919/1036/content.aspx> (consulté le 16/05/2016)
- [11]: <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/thermo/corpsnoir.html> (consulté le 16/05/2016)
- [12]: Zhipeng QU, La nouvelle méthode Heliosat-4 pour l'évaluation du rayonnement solaire au sol, l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2013
- [13]: Cours : Introduction au rayonnement solaire de Mr MECHAQRANE Abdellah
- [14]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Latitude> (consulté le 16/05/2016)
- [15]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Longitude> (consulté le 16/05/2016)
- [16]: <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire.htm> (consulté le 18/05/2016)
- [17]: [https://moodle.insarouen.fr/pluginfile.php/33712/mod\\_folder/content/0/Rapport\\_P6\\_2013\\_26.pdf?forcedownload=1](https://moodle.insarouen.fr/pluginfile.php/33712/mod_folder/content/0/Rapport_P6_2013_26.pdf?forcedownload=1) (consulté le 18/05/2016)
- [18]: <http://www.photovoltaique.info/Les-composantes-de-la-lumiere,239.html> (consulté le 18/05/2016)
- [19]: [Présentation sur la station de mesure IRESEN ppt](#) (consulté le 18/05/2016)
- [20]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrh%C3%A9liom%C3%A8tre> (consulté le 18/05/2016)
- [21]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9liographe> (consulté le 18/05/2016)
- [22]: [http://iie.fing.edu.uy/~pmuse/docs/papers/alonso2012solar\\_energy.pdf](http://iie.fing.edu.uy/~pmuse/docs/papers/alonso2012solar_energy.pdf) (consulté le 18/05/2016)
- [23]: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rog.20009/pdf> (consulté le 18/05/2016)
- [24]: [Best Practices Handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications](#)
- [25]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rosol\\_atmosph%C3%A9rique](https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rosol_atmosph%C3%A9rique) (consulté le 18/05/2016)
- [26]: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215015155> (consulté le 18/05/2016)



- [27] : [https://books.google.co.ma/books?id=kNz6CAAAQBAJ&pg=PA348&lpg=PA348&dq=Hay,+Hanson+et+Hanson+\(1978\)++++these&source=bl&ots=7LiXo2C4Tn&sig=0\\_3AZVuMWmk56\\_IF-8veZo7raWM&hl=fr&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Hay%2C%20Hanson%20et%20Hanson%20\(1978\)%20%20%20these&f=false](https://books.google.co.ma/books?id=kNz6CAAAQBAJ&pg=PA348&lpg=PA348&dq=Hay,+Hanson+et+Hanson+(1978)++++these&source=bl&ots=7LiXo2C4Tn&sig=0_3AZVuMWmk56_IF-8veZo7raWM&hl=fr&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Hay%2C%20Hanson%20et%20Hanson%20(1978)%20%20%20these&f=false) (consulté le 18/05/2016)
- [28] : [https://books.google.co.ma/books?id=WWzgBwAAQBAJ&pg=PA346&dq=Gautier,+Diak+et+Masse+\(1980\)+these&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwixwp7VnufNAhWESHQKHvRBkUQ6AEILzAD#v=onepage&q=Gautier%2C%20Diak%20et%20Masse%20\(1980\)%20these&f=false](https://books.google.co.ma/books?id=WWzgBwAAQBAJ&pg=PA346&dq=Gautier,+Diak+et+Masse+(1980)+these&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwixwp7VnufNAhWESHQKHvRBkUQ6AEILzAD#v=onepage&q=Gautier%2C%20Diak%20et%20Masse%20(1980)%20these&f=false) (consulté le 18/05/2016)
- [29] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/METEOSAT> (consulté le 16/05/2016)
- [30] : <http://eduscol.education.fr/orbito/system/meteosat/met13.htm> (consulté le 16/05/2016)
- [31] : <https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00004169/document> (consulté le 16/05/2016)
- [32] : [https://books.google.co.ma/books?id=cdAAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=les+a%C3%A9rosols+atmosph%C3%A9riques&source=bl&ots=0TTM1OSlpr&sig=rV-4ygbdv7agHu99rg1tCjvlm8&hl=fr&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=les%20a%C3%A9rosols%20atmosph%C3%A9riques&f=false](https://books.google.co.ma/books?id=cdAAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=les+a%C3%A9rosols+atmosph%C3%A9riques&source=bl&ots=0TTM1OSlpr&sig=rV-4ygbdv7agHu99rg1tCjvlm8&hl=fr&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=les%20a%C3%A9rosols%20atmosph%C3%A9riques&f=false) (consulté le 16/05/2016)
- [33] : [https://www.google.com/search?q=les+a%C3%A9rosols&biw=1680&bih=949&source=lnms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwiW\\_ZLjKTLAhWGHhKHZp2AlwQ\\_AUIBigB#tbn=isch&q=les+a%C3%A9rosols+atmosph%C3%A9riques&imgsrc=kt83B\\_lo-F-tTM%3A](https://www.google.com/search?q=les+a%C3%A9rosols&biw=1680&bih=949&source=lnms&tbn=isch&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwiW_ZLjKTLAhWGHhKHZp2AlwQ_AUIBigB#tbn=isch&q=les+a%C3%A9rosols+atmosph%C3%A9riques&imgsrc=kt83B_lo-F-tTM%3A) (consulté le 18/05/2016)
- [34] : <http://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/aerosols-climat-par-olivier-boucher> (consulté le 18/05/2016)
- [35] : <http://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/aerosols-climat-par-olivier-boucher> (consulté le 18/05/2016)
- [36] : [https://books.google.co.ma/books?id=cdAAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=les+a%C3%A9rosols+atmosph%C3%A9riques&source=bl&ots=0TTM1OSlpr&sig=rV-4ygbdv7agHu99rg1tCjvlm8&hl=fr&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=les%20a%C3%A9rosols%20atmosph%C3%A9riques&f=false](https://books.google.co.ma/books?id=cdAAAAQBAJ&pg=PA7&lpg=PA7&dq=les+a%C3%A9rosols+atmosph%C3%A9riques&source=bl&ots=0TTM1OSlpr&sig=rV-4ygbdv7agHu99rg1tCjvlm8&hl=fr&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=les%20a%C3%A9rosols%20atmosph%C3%A9riques&f=false) (consulté le 18/05/2016)
- [37] : [http://www.lisa.univ-paris12.fr/~desboeufs/Aerosol\\_2012\\_intro.pdf](http://www.lisa.univ-paris12.fr/~desboeufs/Aerosol_2012_intro.pdf) (consulté le 18/05/2016)
- [38] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rosol\\_atmosph%C3%A9rique](https://fr.wikipedia.org/wiki/A%C3%A9rosol_atmosph%C3%A9rique) (consulté le 18/05/2016)
- [39] : <http://www.lmd.polytechnique.fr/~menut/slidesM1/aerosols.pdf>
- [40] : [http://fred.elie.free.fr/aerosols\\_atmospheriques.pdf](http://fred.elie.free.fr/aerosols_atmospheriques.pdf) (consulté le 28/05/2016)
- [41] : [NEDA BOYOUK, Caractérisation des aérosols de pollution dans le Nord de la France, Université des sciences et technologies de Lille,2009](#) (consulté le 28/05/2016)
- [42] : <http://edu.obs-mip.fr/mallette/fiches/Chimie-des-aerosols> (consulté le 29/05/2016)
- [43] : [http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/Air\\_23.PDF](http://documentation.bruxellesenvironnement.be/documents/Air_23.PDF) (consulté le 29/05/2016)
- [44] : [Colin THOMAS, Caractérisation des aérosols atmosphériques en milieu urbain par télédétection à très haute résolution spatiale, l'université de Toulouse,2010](#) (consulté le 18/03/2016)



- [45]: <http://www.tsi.com/instrument-de-pr%C3%A9sentation-d-a%C3%A9rosols-dusttrak-drx-8533/> (consulté le 29/05/2016)
- [46]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Exposant\\_d%27%C3%85ngstr%C3%B6m](https://fr.wikipedia.org/wiki/Exposant_d%27%C3%85ngstr%C3%B6m) (consulté le 29/05/2016)
- [47]: <http://omer7.sedoo.fr/mallette/fiches/Proprietes-optiques-des-aerosols>(consulté le 29/05/2016)
- [48]: [http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb14/02\\_aerosols.htm](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim1/biblio/pigb14/02_aerosols.htm) (consulté le 29/05/2016)
- [49]: [Jean-Christophe Péré, Simulation de l'impact climatique des aérosols en Europe, Université Toulouse 3 Paul Sabatier,2010](#) (consulté le 29/05/2016)
- [50]: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3370070302/full> (consulté le 01/06/2016)
- [51]: [Daniel Cano, A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellites data , Mines Paris Tech,2010](#) (consulté le 01/06/2016)
- [52] : <https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00248968/document> (consulté le 01/06/2016)
- [53]: [Thomas P. Charlock, THE GLOBAL SURFACE AND ATMOSPHERE RADIATION BUDGET: AN ASSESSMENT OF ACCURACY WITH 5 YEARS OF CALCULATIONS AND OBSERVATIONS](#) (consulté le 01/06/2016)
- [54]: <https://hal-ensmp.archives-ouvertes.fr/hal-00361373/document> (consulté le 01/06/2016)
- [55]: [http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9781447146483-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355440-p174668845](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781447146483-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355440-p174668845) (consulté le 01/06/2016)
- [56]: [http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9781447146483-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355440-p174668845](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781447146483-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355440-p174668845) 01/06/2016
- [57]: <https://geospatial.ncsu.edu/osgeorel/publications/ChileSolar2011.pdf> 01/06/2016
- [58]: [http://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_FILE&dDocName=PDF\\_CONF\\_P59\\_S2\\_02\\_JOURNE\\_V&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web](http://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_CONF_P59_S2_02_JOURNE_V&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web) (consulté le 01/06/2016)
- [59]: <http://www.oie.mines-paristech.fr/Valorisation/Outils/Heliosat/#heliosat2> (consulté le 06/05/2016)
- [60]: [Lamissa DIABATE , DETERMINATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A L'AIDE D'IMAGES SATELLITAIRES, L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS ,1989](#)(consulté le 06/05/2016)
- [61]: <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/atmosphere/construction/heliosat.html> (consulté le 06/05/2016)
- [62] <https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00361364/document> (consulté le 06/05/2016)
- [63] : <https://books.google.co.ma/books?id=N8kl8k-ED18C&pg=PA455&dq=Mueller+et+al.,+2004++heliosat+3&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKewj-976HpefNAhViLsAKHehXcnkQ6AEIJTAA#v=onepage&q=Mueller%20et%20al.%2C%202004%20%20heliosat%203&f=false> (consulté le 06/05/2016)



- [64]: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00957358/document> (consulté le 27/04/2016)
- [65]: [https://www.google.co.ma/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwix6J-sh9LMAhVFiRoKHebdD0MQjhwIAw&url=http%3A%2F%2Fwww.soda-pro.com%2Fdocuments%2F10157%2F95595%2Fmeteo\\_2015\\_90\\_53.pdf%2Fb08be986-cfad-4ea585ff404ffbc3add5&bvm=bv.121658157,d.ZGg&psig=AFQjCNFO47P9Wz2FWb6lclXuyRFXHAuGQw&ust=1463057269140290](https://www.google.co.ma/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKEwix6J-sh9LMAhVFiRoKHebdD0MQjhwIAw&url=http%3A%2F%2Fwww.soda-pro.com%2Fdocuments%2F10157%2F95595%2Fmeteo_2015_90_53.pdf%2Fb08be986-cfad-4ea585ff404ffbc3add5&bvm=bv.121658157,d.ZGg&psig=AFQjCNFO47P9Wz2FWb6lclXuyRFXHAuGQw&ust=1463057269140290) (consulté le 11/05/2016)
- [66]: <http://www.mdpi.com/2072-4292/4/3/622/pdf> (consulté le 11/05/2016)
- [67]: <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63112.pdf> (consulté le 11/05/2016)
- [68]: <http://www.oie.mines-paristech.fr/Valorisation/Outils/HelioClim/> (consulté le 27/04/2016)
- [69]: <http://www.soda-is.com/eng/index.html> (consulté le 04/05/2016)
- [70]: <http://www.gmes-atmosphere.eu/about/project/> (consulté le 11/05/2016)
- [71]: [Best Practices Handbook for the collection and use of solar resource data for solar energy applications](#) (consulté le 27/04/2016)
- [72]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Missour> (consulté le 27/04/2016)
- [73]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ben\\_Guerir](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ben_Guerir) (consulté le 02/06/2016)
- [74]: <http://fr.climate-data.org/location/8429/> (consulté le 02/06/2016)
- [75]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tan-Tan> (consulté le 02/06/2016)
- [76]: <http://www.oie.mines-paristech.fr/Valorisation/Outils/HelioClim/> (consulté le 27/04/2016)
- [77]: [http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/contenu/alternative/alter\\_etape1\\_4.html](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/contenu/alternative/alter_etape1_4.html) (consulté le 27/04/2016)
- [78]: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais\\_\(statistique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Biais_(statistique)) (consulté le 04/05/2016)
- [79]: <https://www.google.co.ma/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiZkO3uz8LMAhWGuBoKHVBzCc4QFggeMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ctec.ufal.br%2Fprofessor%2Fcrfj%2FGraduacao%2FMESH%2FModel%2520evaluation%2520methods.doc&usq=AFQjCNGpg8UCAQI6SuRjBqCVemKgCXPZpw&sig2=g1uNISNYqmVKQ1wJskEV4A&bvm=bv.121099550,d.d2s> (consulté le 27/04/2016)
- [80]: <http://www.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html> (consulté le 02/06/2016)