République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la technologie
Département des Sciences de la matière

جامعة محمد البشير الابراهيمي برج بوعريريج
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم علوم المادة



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE Master

Filière : Physique
Option : Physique énergétique et énergie renouvelables.

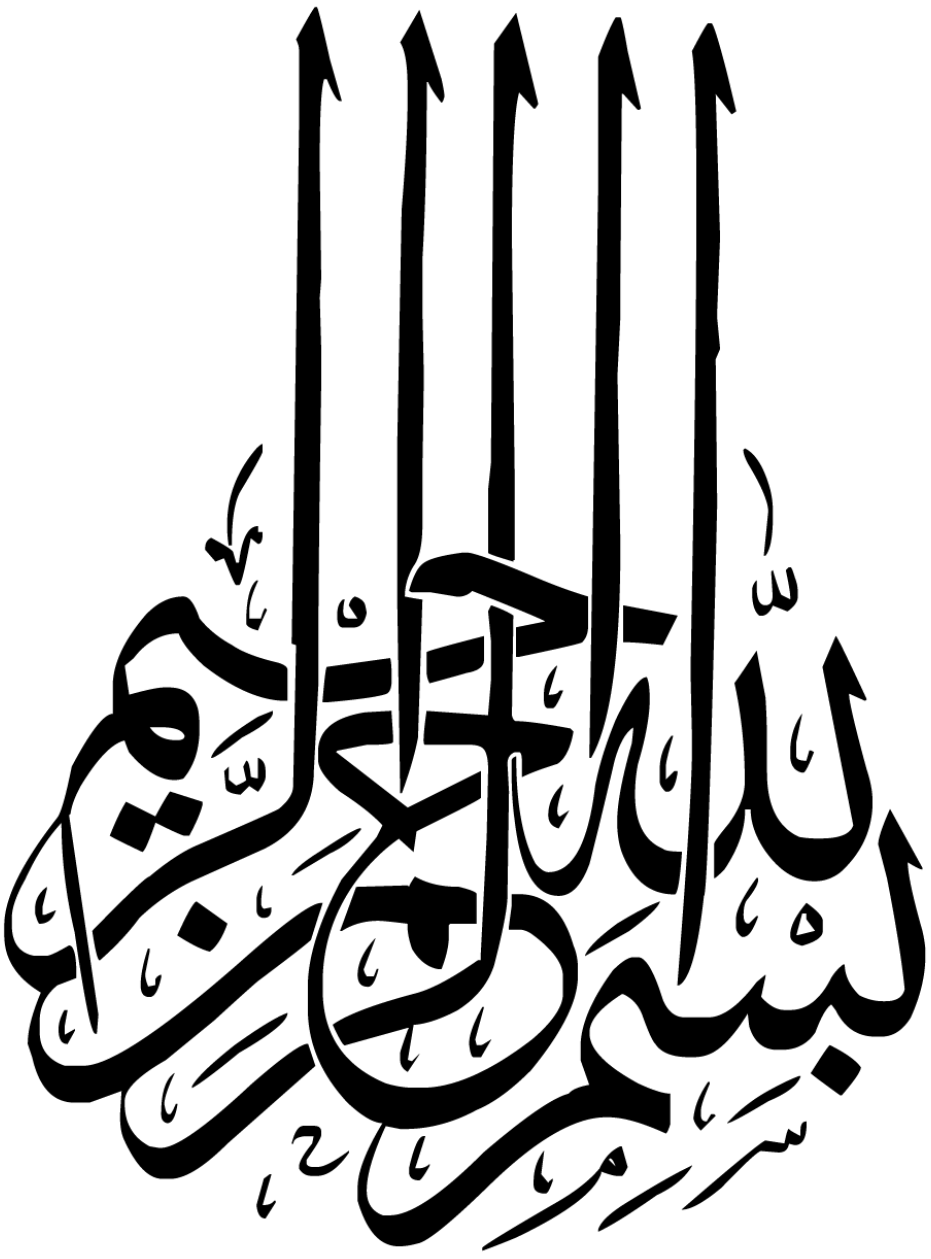
THÈME : Modélisation de la composante diffusée du rayonnement solaire par la méthode des moindres carrés

Préparé par : Zitouni Ichrak
Soutenu le : 23 Juin 2026

Devant le Jury :

Mechouma Farid	MAA	***Président***	Université de Bordj Bou Arréridj
SAHNOUNE Yassine	MCA	***Encadreur***	Université de Bordj Bou Arréridj
IMAKHLAF Anis	MCA	***Examinateur* 1**	Université de Bordj Bou Arréridj
KOUSSA Walid	MCB	***Examinateur*2**	Université de Bordj Bou Arréridj

Année Universitaire 2025/2026


بسم الله الرحمن الرحيم

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu, Seigneur de l'univers, qui m'a accordé la force, la patience et la réussite nécessaires pour accomplir ce travail, et qui m'a guidé sur le chemin du savoir et du succès.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à mon encadrant, le Docteur Sahnoun Yassine, pour ses précieux conseils, ses orientations et son suivi rigoureux tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens également à reconnaître mes propres efforts, ainsi que la persévérance et la détermination dont j'ai fait preuve durant cette période d'études, malgré les difficultés rencontrées.

J'exprime ma profonde gratitude à mes parents ainsi qu'à mes frères et sœurs pour leur soutien moral, leur patience et leurs sacrifices constants.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toute personne qui m'a soutenu, de près ou de loin, dans la réalisation de ce travail.



DEDICACE

Tous mes remerciements et ma gratitude à Monsieur le Professeur Yassine Sahnoune pour tous les efforts qu'il a déployés et ses précieux conseils tout au long de ce parcours.

Comme je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury Mchouma, Imakhlaf et Koussa qui ont accepté d'évaluer mon travail de recherche.

Et enfin, j'exprime ma profonde reconnaissance à l'ensemble des enseignants qui m'ont guidé et instruit durant mon cursus universitaire.



Sommaire

REMERCIEMENTS
DEDICACE
TABLE DES MATIÈRES …… I
LISTE DES FIGURES …… IV
LISTE DES TABLEAUX …… V
INTRODUCTION GÉNÉRALE …… 2

CHAPITRE I

I.1 — Introduction ……... **5**
I.2 — Le Soleil : Caractéristiques et Structure …… **5**
I.2.1 Définition et place dans l'Univers ……... **5**
I.2.2 Données physiques fondamentales …… **5**
I.2.3 Structure interne …….. **6**
I.2.4 La constante solaire …… **7**
I.3 — Le Rayonnement Solaire ……... **8**
I.3.1 Origine et mécanismes de production …… **8**
I.3.2 Le cycle proton-proton (pp) …… **8**
I.3.3 Le cycle carbone-azote-oxygène (CNO) …… **8**
I.3.4 Le spectre électromagnétique du rayonnement extraterrestre …… **9**
I.4 — Interactions avec l'Atmosphère Terrestre …… **10**
I.4.1 Structure verticale de l'atmosphère …… **10**
I.4.2 Le concept de masse d'air atmosphérique ……... **13**
I.4.3 Absorption et diffusion du rayonnement …… **14**
I.4.4 Réfraction atmosphérique ……... **15**
I.4.5 Bilan radiatif de la terre …….. **15**
I.5 — Composantes du Rayonnement Solaire au Sol ……..... **16**
I.6 — Instruments de Mesure du Rayonnement Solaire …… **17**
I.7 — Conclusion …… **22**

CHAPITRE II

II.1 — Introduction …… **24**
II.2 — Gisement Solaire en Algérie …… **24**
II.3 — Repérage Géographique et Astronomique ……... **25**
II.3.1 Paramètres de localisation terrestre ……... **25**
II.3.2 Mouvements de la Terre …… **26**
II.3.3 La déclinaison solaire δ …… **27**
II.3.4 L'angle horaire ω ……... **28**
II.4 — Position Apparente du Soleil ……... **29**
II.4.1 La hauteur solaire h ……... **29**

II.4.2 L'azimut solaire a ……..…….. **29**
II.5 — Durée du Jour et Angle Horaire au Coucher ……... **30**
II.6 — Composantes de l'Irradiation Solaire ……... **30**
II.6.1 Irradiation extraterrestre instantanée ……. **30**
II.6.2 Irradiation journalière extraterrestre H_0 ……. **30**
II.6.3 La fraction d'insolation σ ……... **31**
II.7 — Sites d'Étude en Algérie ……... **31**
II.8 — Sélection des Jours Types Mensuels ……... **32**
II.9 — Le Modèle Empirique d'Angström-Prescott ……..…….. **32**
II.9.1 Principe et formulation …….. **32**
II.9.2 Indicateurs statistiques d'évaluation …….. **32**
II.9.3 Extensions du modèle …… **33**
II.10 Avantages et limites …… **33**
II.11 — Conclusion …… **34**

CHAPITRE III

III.1 — Introduction …… **36**
III.2 — Irradiation Extraterrestre Calculée (H_0) ……. **36**
III.3 — Résultats …… **39**
III.3.1 Alger …… **39**
III.3.2 Oran …… **40**
III.3.3 Tamanrasset …… **42**
III.3.4 Bordj Bou Arreridj ……... **43**
III.3.5 Résultats comparatifs : Alger, Oran, Tamanrasset vs Bordj Bou Arreridj …… **45**
III.4 — Analyse des Coefficients a et b …….. **45**
III.5 — Conclusion …….. **46**
CONCLUSION GÉNÉRALE …….. 48
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES
RÉSUMÉ

Chapitre 1

Fig. I.1 — Coupe schématique des couches internes du Soleil ……... **7**
Fig. I.2 — Diagramme du cycle proton-proton (pp), carbone-azote-oxygène (CNO) …… **9**
Fig. I.3 — Spectre du rayonnement solaire extraterrestre (AM0) …….. **10**
Fig. I.4 — Structure verticale de l'atmosphère terrestre …….. **13**
Fig. I.5 — Illustration du concept de masse d'air atmosphérique ……... **14**
Fig. I.6 —Bilan radiatif de la Terre et interactions atmosphériques……..… **15**
Fig. I.7—Schéma des composantes du rayonnement solaire au sol (direct, diffus, réfléchi) ……..... **16**
Fig. I.8 — Pyranomètre ……. **18**
Fig. I.9 — Pyranomètre à Ombre …… **19**
Fig. I.10 — Pyrhéliomètre ……. **20**
Fig. I.11 — Héliographe de Campbell-Stokes (durée d'ensoleillement) …… **21**

Chapitre 2

Fig. II.1 — Carte mondiale de l'irradiation solaire (source : SolarGIS, 2013) ……. **25**
Fig. II.2 — Représentation de la rotation terrestre autour de son axe …….. **26**
Fig. II.3 — Schéma de la révolution de la Terre autour du Soleil ……..…… **27**
Fig. II.4 — Variation annuelle de la déclinaison solaire …… **28**
Fig. II.5 — Repérage de la position du Soleil (azimut et hauteur) ……. **29**

Chapitre 3

Fig. III.1— Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Alger ……. **37**
Fig. III.2 — Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Oran ……. **37**
Fig. III.3 —Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Tamanrasset ……. **38**
Fig. III.4 —Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Bordj Bou Arreridj **38**
Fig. III.5 — Irradiation estimée vs mesurée à Alger …….. **40**
Fig. III.6 — Irradiation estimée vs mesurée à Oran ……... **41**
Fig. III.7 — Irradiation estimée vs mesurée à Tamanrasset ……... **43**
Fig. III.8 — Irradiation estimée vs mesurée à Bordj Bou Arreridj ……. **44**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 — Indicateurs du gisement solaire par région en Algérie ……. **24**

Tableau II.2 —Fractions d'insolation mensuelles pour les quatre sites ……. **31**

Tableau II.3 — Coordonnées géographiques des quatre stations d'étude ……. **31**

Tableau II.4 — Jours types retenus pour chaque mois de l'année …… **32**

Tableau III.1 — Valeurs de l'irradiation extraterrestre journalière moyenne mensuelle H_0 pour les sites d'étude ……... **36**

Tableau III.2—Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station d'Alger …….. **39**

Tableau III.3 —Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station d'Oran …… **41**

Tableau III.4 —. Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station de Tamanrasset …….. **42**

Tableau III.5 — . Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station de Bordj Bou Arreridj …… **44**

Tableau III.6 —Comparaison des coefficients a et b d'Angström-Prescott et des RMSE pour les sites d'étude …… **45**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie constitue aujourd'hui l'un des enjeux stratégiques les plus cruciaux de notre siècle. La dépendance croissante des sociétés modernes aux combustibles fossiles, conjuguée à l'épuisement progressif de ces ressources non renouvelables et à leurs effets délétères sur le climat — notamment les émissions massives de gaz à effet de serre responsables du dérèglement climatique global — imposent de repenser fondamentalement les paradigmes de production et de consommation énergétiques. Dans ce contexte, les énergies renouvelables s'imposent comme une alternative viable, durable et respectueuse de l'environnement. [1].

Parmi les ressources renouvelables disponibles à l'échelle planétaire, l'énergie solaire occupe une position de premier plan. Elle se distingue par son caractère inépuisable à l'échelle humaine, sa répartition géographique large et sa faible empreinte carbone. L'Algérie, de par sa situation géographique privilégiée, bénéficie de l'un des plus importants potentiels solaires au monde : certaines régions du Sahara enregistrent plus de 3 500 heures d'ensoleillement annuel, soit parmi les valeurs les plus élevées du bassin méditerranéen et d'Afrique du Nord [2]. Ce gisement solaire exceptionnel représente une opportunité considérable pour le développement d'une économie énergétique diversifiée et décarbonée. [3].

Cependant, pour exploiter efficacement cette richesse naturelle et concevoir des systèmes solaires performants, une connaissance précise et quantifiée du rayonnement solaire disponible est indispensable. La modélisation de l'irradiation solaire globale — qui intègre les composantes directe, diffuse et réfléchie du rayonnement atteignant une surface horizontale — constitue à cet égard une étape fondamentale. Elle permet, en effet, de déterminer les flux énergétiques exploitables, d'optimiser l'orientation et le dimensionnement des capteurs, et d'évaluer les performances attendues des installations solaires photovoltaïques ou thermiques. [4] [9].

Dans cette perspective, le présent travail s'attache à modéliser l'irradiation solaire diffuse dans quatre villes algériennes choisies pour leur représentativité climatique contrastée : Alger (littoral méditerranéen), Oran (semi-aride occidental), Tamanrasset (désertique saharien) et Bordj Bou Arreridj (semi-aride des Hauts Plateaux). La démarche adoptée s'appuie sur le modèle empirique d'Angström-Prescott, [5] [19] l'un des outils les plus utilisés dans la littérature scientifique pour estimer le rayonnement global à partir de la durée d'ensoleillement mesurée. Afin d'améliorer la précision de ce modèle et d'ajuster ses coefficients aux spécificités locales de chaque site, la méthode des moindres carrés a été appliquée pour calibrer les coefficients du modèle sur quatre sites représentatifs : Alger, Oran, Tamanrasset et Bordj Bou Arreridj.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre constitue un socle théorique dédié au rayonnement solaire : il aborde les caractéristiques physiques du Soleil, les mécanismes de production et de propagation de son rayonnement, les interactions avec l'atmosphère terrestre, et décrit les instruments de mesure actinométrique utilisés.
- Le deuxième chapitre expose les outils mathématiques et géométriques nécessaires au calcul de l'irradiation solaire, présente le modèle d'Angström-Prescott ainsi que la méthode des moindres carrés pour la calibration, ainsi que le potentiel solaire algérien.
- Le troisième chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et la discussion des résultats numériques obtenus pour les quatre sites, en comparant les estimations du modèle — avant et après optimisation par méthode des moindres carrés — aux données mesurées disponibles.

Une conclusion générale synthétise les principaux enseignements de ce travail et ouvre des perspectives pour des recherches futures.

CHAPITRE I

INTRODUCTION AU RAYONNEMENT SOLAIRE

I.1 — Introduction

Ce premier chapitre est consacré à l'établissement des fondements théoriques indispensables à la compréhension du rayonnement solaire. Il aborde successivement la nature et les caractéristiques physiques du Soleil, l'origine et la propagation de son rayonnement énergétique, les interactions de ce dernier avec les différentes couches de l'atmosphère terrestre, ainsi que la répartition des composantes du rayonnement à la surface du sol. Enfin, ce chapitre présente les différents instruments et dispositifs expérimentaux

I.2 — Le Soleil : Caractéristiques et Structure

I.2.1 Définition et place dans l'Univers

Le Soleil est l'unique étoile du système solaire et la source d'énergie primaire de la quasi-totalité des phénomènes naturels se produisant sur Terre. Il s'agit d'une gigantesque sphère de plasma ionisé, dont la masse colossale — représentant à elle seule 99,8 % de la masse totale du système solaire — génère par gravité les conditions de température et de pression nécessaires aux réactions de fusion thermonucléaire. Distant en moyenne de 149,6 millions de kilomètres de notre planète, soit une unité astronomique (UA), le Soleil est l'étoile la plus proche de la Terre ; la seconde étoile la plus proche, Proxima du Centaure, se situe à environ 4,2 années-lumière. [10] [11].

I.2.2 Données physiques fondamentales

De type spectral G2V, le Soleil présente une couleur légèrement jaunâtre correspondant à une température de surface d'environ 5 785 K. Il se distingue par les caractéristiques suivantes :

- Diamètre : 1 392 000 km, soit environ 109 fois le diamètre terrestre, ce qui confère au Soleil un volume 1,3 million de fois supérieur à celui de la Terre.
- Masse : $1{,}99 \times 10^{30}$ kg, soit 330 000 fois la masse terrestre. Le Soleil perd environ 4 millions de tonnes par seconde par conversion de masse en énergie.
- Densité moyenne : 1,41 g/cm³, avec des variations considérables entre le coeur (~10^5 kg/m³) et les couches externes.
- Température : 15 millions de K au noyau, 5 785 K en surface (photosphère), et plus d'un million de K dans la couronne.

- Composition : 75 % d'hydrogène, 25 % d'hélium, et environ 0,1 % d'éléments plus lourds dits métaux en astronomie.
- Rotation différentielle : de 25,6 jours à l'équateur à 36 jours aux pôles, révélant la nature gazeuse et non rigide de l'astre. [11]

I.2.3 Structure interne

Le Soleil est organisé en couches concentriques présentant des propriétés physiques distinctes :

- Le noyau : siège des réactions de fusion thermonucléaire. Les conditions extrêmes de température (15×10^6 K), de pression (2×10^{11} bar) et de densité ($\sim 1{,}5 \times 10^5$ kg/m^3) permettent la fusion de l'hydrogène en hélium, libérant une énergie colossale sous forme de rayonnement gamma.
- La zone radiative : l'énergie produite dans le noyau se propage vers l'extérieur par diffusion radiative. Ce trajet est extrêmement lent en raison des interactions répétées des photons avec la matière dense.
- La zone convective : au-delà de la zone radiative, des mouvements convectifs turbulents assurent le transport d'énergie jusqu'à la surface.
- La photosphère : couche visible du Soleil, d'environ 300 à 500 km d'épaisseur, affichant une température de surface de 5 770 K. C'est de là qu'est émise la quasi-totalité du rayonnement solaire perçu depuis la Terre.
- La chromosphère : atmosphère solaire inférieure, épaisse d'environ 8 000 km, avec une température avoisinante 20 000 K.
- La couronne : enveloppe externe du Soleil, atteignant plusieurs millions de kelvins, visible uniquement lors des éclipses totales de Soleil. [7] [11]

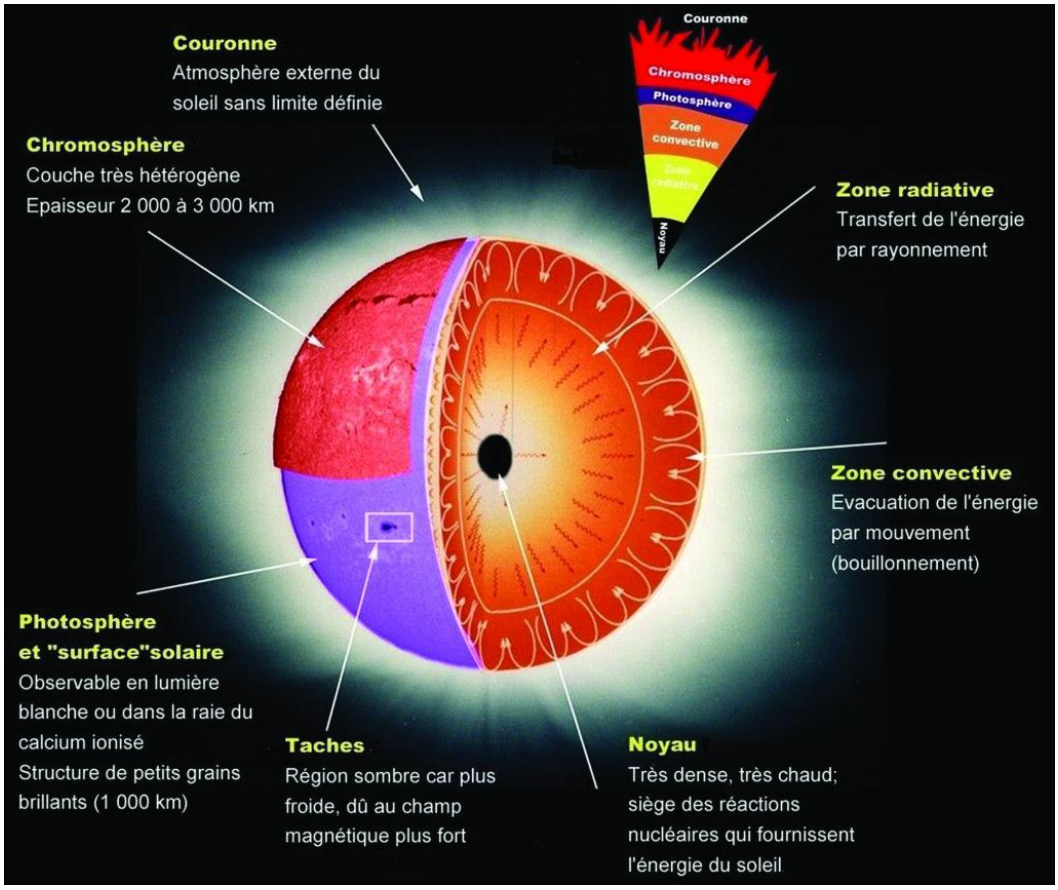


Fig. I.1 — Coupe schématique des couches internes du Soleil. [11]

Cette figure illustre l'organisation en couches concentriques du Soleil : le cœur, la zone radiative, la zone convective, puis la photosphère, la chromosphère et la couronne. Chaque couche joue un rôle distinct dans le transport de l'énergie produite par les réactions de fusion thermonucléaire vers la surface.

I.2.4 La constante solaire : La constante solaire I_0 représente la densité de flux d'énergie solaire reçue par unité de surface perpendiculaire aux rayons solaires, à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, pour une distance Terre-Soleil moyenne. Sa valeur conventionnellement adoptée est :

$$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2 \text{ (spectre AM0)} \qquad \textbf{(I.1)}$$

Cette valeur varie légèrement au cours de l'année (de +3,3 %) en raison de l'excentricité de l'orbite terrestre. La constante solaire corrigée s'exprime par :

$$I(j) = I_0 \times [1 + 0{,}034 \cos\times (360/365 \times (j - 2))] \qquad \textbf{(I.2)}$$

où j désigne le numéro du jour dans l'année (j = 1 pour le ler janvier). [12] [18]

I.3 — Le Rayonnement Solaire

I.3.1 Origine et mécanismes de production

Le Soleil fonctionne comme un réacteur thermonucléaire naturel, libérant une puissance rayonnée totale d'environ $3{,}82 \times 10^{26}$ watts. Cette énergie résulte de la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium, processus au cours duquel une fraction de masse est convertie en énergie selon la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$. Concrètement, quelque 596 millions de tonnes d'hydrogène sont fusionnées chaque seconde pour produire 592 millions de tonnes d'hélium, les 4 millions de tonnes restants étant transformées en rayonnement électromagnétique. Seule une infime fraction de cette énergie colossale (environ 5×10^{-9}) parvient jusqu'à la Terre, mais elle suffit à alimenter l'ensemble des processus biophysiques terrestres. [7] [10]

I.3.2 Le cycle proton-proton (pp)

Responsable de 90 % de l'énergie produite dans le Soleil, le cycle proton-proton se déroule selon les réactions suivantes :

$$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + \beta^{+} + \nu_e \qquad \textbf{(I.3)}$$

$$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma \qquad \textbf{(I.4)}$$

$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H \qquad \textbf{(I.5)}$$

Ces réactions produisent des positrons (β^+), des neutrinos (ν_e) et des photons gamma (γ), dont l'énergie est progressivement thermoralisée lors du long trajet vers la surface solaire. [10] [11]

I.3.3 Le cycle carbone-azote-oxygène (CNO)

Découvert en 1938 par Hans Bethe et Carl von Weizsäcker, ce cycle contribue aux 10 % restants de la production énergétique solaire. Le carbone intervient ici comme catalyseur, étant régénéré à l'issue du cycle qui transforme in fins quatre protons en un noyau d'hélium 4, avec émission de deux positrons, deux neutrinos et libération d'énergie sous forme de rayonnement gamma. [10] [11]

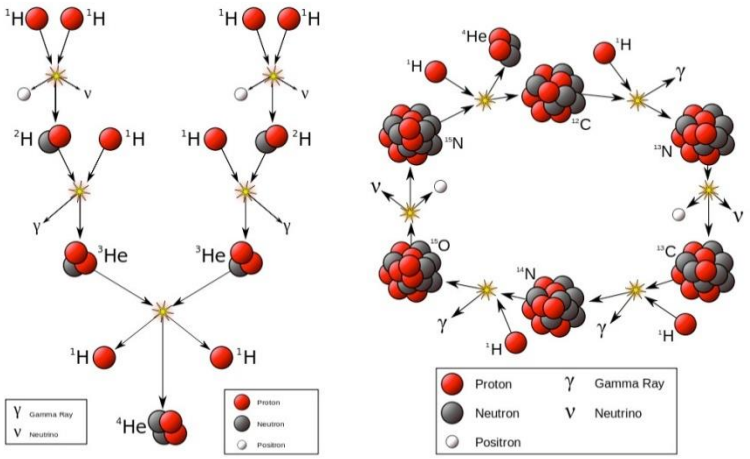


Fig. I.2 — Diagramme du cycle proton-proton (pp), carbone-azote-oxygène (CNO). [10]

Ce diagramme représente les deux cycles de fusion thermonucléaire solaire : le cycle proton-proton (pp), dominant dans les étoiles de masse faible à intermédiaire comme le Soleil, et le cycle carbone-azote-oxygène (CNO), dans lequel ces éléments servent de catalyseurs pour transformer quatre protons en un noyau d'hélium-4, libérant ainsi de l'énergie sous forme de rayonnement gamma et de neutrinos.

I.3.4 Le spectre électromagnétique du rayonnement extraterrestre

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique couvrant une large gamme de longueurs d'onde, répartie en trois domaines principaux :

- Ultraviolet (UV) : de 100 à 400 nm, subdivisé en UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) et UVA (315-400 nm). Biologiquement actif, partiellement filtré par la couche d'ozone stratosphérique.
- Visible : de 400 à 700 nm, domaine perçu par l'oeil humain. Il concentre environ 44 % de l'énergie solaire totale.
- Infrarouge (IR) : de 700 à 4 000 nm, subdivisé en IR à ondes courtes (700-2 500 nm) et IR à ondes longues (2 500-4 000 nm). Il représente environ 49 % de l'énergie totale.

La compréhension de ce spectre est fondamentale pour la conception des systèmes photovoltaïques (sensibles principalement au visible et au proche IR) et des capteurs thermiques solaires. [12] [13]

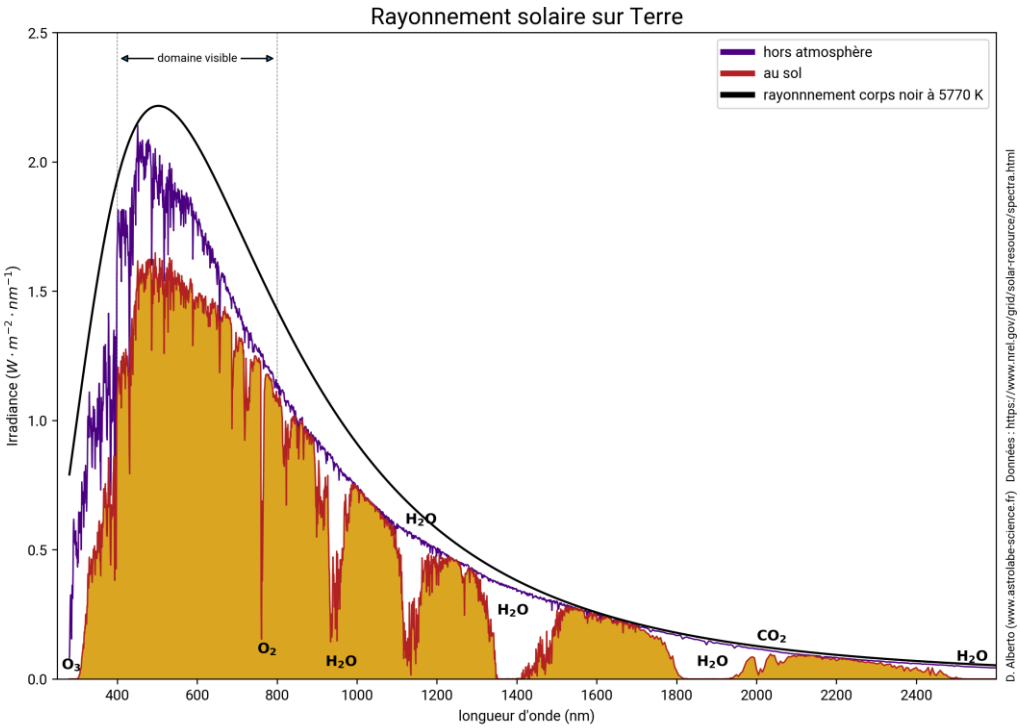


Fig. I.3 — Spectre du rayonnement solaire extraterrestre (AM0)

Ce graphe montre la distribution spectrale de l'irradiance solaire extraterrestre en fonction de la longueur d'onde, avant toute interaction avec l'atmosphère (condition AM0). Le spectre s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge, avec un pic dans le visible (~500 nm), et s'apparente au spectre d'un corps noir à ~5 778 K.

I.4 — Interactions avec l'Atmosphère Terrestre

I.4.1 Structure verticale de l'atmosphère

L'atmosphère terrestre est constituée d'un mélange gazeux dont la composition dans les trois premières couches est relativement stable : 78 % d'azote moléculaire (N_2), 21 % d'oxygène moléculaire (O_2), 0,9 % d'argon (Ar) et des traces de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et d'autres gaz. Elle est structurée verticalement en plusieurs couches distinctes, définies par leur profil thermique. [13] [14]

1- Troposphère

- **Altitude :** 0 à 10-15 km (variable selon latitude et saison ; ~8 km aux pôles, ~16 km à l'équateur).

- **Masse atmosphérique :** contient environ 80 % de la masse totale de l'atmosphère et 99 % de la vapeur d'eau.
- **Profil thermique :** la température décroît avec l'altitude selon un gradient adiabatique moyen de 6,5 °C/km, passant d'environ +15 °C au sol à environ −56 °C à la tropopause. Ce gradient est à l'origine de la convection et de l'instabilité atmosphérique.
- **Rôle météorologique :** siège de tous les phénomènes météorologiques (vents, nuages, précipitations, orages, cyclones). La troposphère est la couche qui joue le plus grand rôle dans l'atténuation du rayonnement solaire incident au sol.
- **Tropopause :** limite supérieure de la troposphère, caractérisée par une inversion thermique (stabilisation de la température). Elle constitue une barrière naturelle aux échanges verticaux entre troposphère et stratosphère.
- **Interactions avec le rayonnement solaire :** absorption partielle par la vapeur d'eau et le CO_2 (bandes infrarouges) ; diffusion de Rayleigh et de Mie par les molécules gazeuses, les aérosols et les gouttelettes nuageuses. L'épaisseur optique de la troposphère est le facteur dominant de l'atténuation du rayonnement global au sol.

2- **Stratosphère**

- **Altitude :** 12 à 50 km environ.
- **Profil thermique inversé :** contrairement à la troposphère, la température croît avec l'altitude, passant d'environ −56 °C à la tropopause à près de 0 °C à la stratopause. Cette inversion thermique stabilise la couche et empêche la convection verticale.
- **Couche d'ozone (O_3) :** concentrée entre 15 et 35 km, avec un pic autour de 25 km. Elle absorbe la quasi-totalité des rayons UVC (100–280 nm) et une grande partie des UVB (280–315 nm) par le cycle de Chapman.

L'ozone est le principal écran protecteur contre les rayonnements biologiquement nocifs.

- **Aérosols stratosphériques :** après des éruptions volcaniques majeures, des aérosols soufrés peuvent persister dans la stratosphère pendant 1 à 3 ans, réduisant significativement le rayonnement solaire atteignant le sol et affectant les estimations des modèles d'irradiation.
- **Importance pour la modélisation :** l'épaisseur totale de la colonne d'ozone (mesurée en unités Dobson) influence directement le spectre du rayonnement UV atteignant la surface, ce qui est un paramètre clé dans les modèles spectraux avancés.

3- **Mésosphère**

- **Altitude :** 50 à 85 km environ.

- **Profil thermique :** la température décroît à nouveau avec l'altitude (gradient thermique standard), atteignant le minimum atmosphérique de −80 à −90 °C à la mésopause (~85 km). C'est la couche la plus froide de l'atmosphère.
- **Désintégration des météorites :** la densité encore suffisante de la mésosphère provoque l'échauffement par friction et la désintégration des corps rocheux de moins de quelques mètres entrant dans l'atmosphère (phénomène des étoiles filantes).
- **Nuages mésosphériques :** des nuages noctilucents (les plus hauts de l'atmosphère) se forment à la mésopause par condensation de cristaux de glace sur des noyaux de poussière météoritique. Ils sont observables par ciel clair après le coucher du soleil.
- **Rôle pour le rayonnement solaire :** la mésosphère absorbe une partie des UVC résiduels non captés par la stratosphère, via la photolyse de l'oxygène moléculaire et de l'ozone. Son influence directe sur le rayonnement diffusé au sol reste cependant secondaire.

4- **Thermosphère**

- **Altitude :** 85 km jusqu'à 500–1000 km (transition vers l'exosphère).
- **Profil thermique :** la température augmente très fortement avec l'altitude, pouvant dépasser 1 000 à 2 000 K selon l'activité solaire. Cette élévation n'est cependant pas "ressentie" au sens thermodynamique classique, car la densité est si faible que les échanges par conduction sont quasi nuls.
- **Ionisation intense :** l'absorption du rayonnement X et UV solaire ionise les atomes d'oxygène et d'azote, créant l'ionosphère — région de forte conductivité électrique utilisée pour la réflexion des ondes radio. Lors des éruptions solaires, l'ionisation accrue perturbe les communications.
- **Aurores polaires :** les particules chargées du vent solaire, guidées par le champ magnétique terrestre vers les pôles, excitent les atomes de la thermosphère qui émettent des lumières colorées (vert par l'oxygène à 557,7 nm, rouge par l'oxygène à 630 nm, bleu-violet par l'azote).
- **Satellites et ISS :** la Station Spatiale Internationale (ISS) orbite à ~400 km dans la thermosphère, subissant une légère traînée atmosphérique résiduelle. [14]

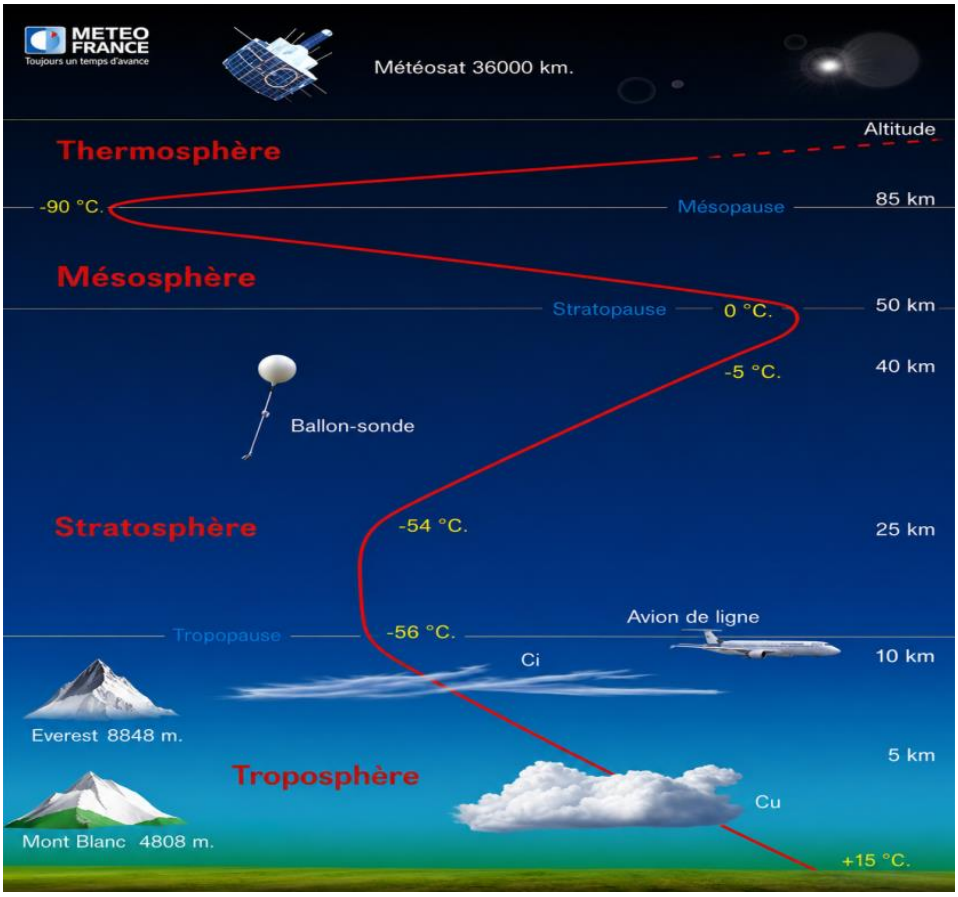


Fig. I.4 — Structure verticale de l'atmosphère terrestre . [13]

Cette figure représente les différentes couches de l'atmosphère terrestre (troposphère, stratosphère, mésosphère, thermosphère) en fonction de l'altitude, avec leurs profils de température caractéristiques. Elle montre comment l'atmosphère filtre et atténue le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne le sol.

I.4.2 Le concept de masse d'air atmosphérique

La masse d'air (notée AM, pour Air Mass) est une grandeur adimensionnelle qui quantifie l'épaisseur relative de l'atmosphère traversée par le rayonnement solaire. Elle est définie comme le rapport entre la longueur du trajet parcouru par le rayonnement et l'épaisseur verticale de l'atmosphère (approximée à 7,8 km en conditions standard) :

$$m = (P / P_0) \times (1 / \sin(h)) \times \exp(-z / 7{,}8) \qquad \textbf{(I.6)}$$

Avec P la pression locale (hPa), P_0 = 1013 hPa la pression de référence, h la hauteur solaire (°) et z l'altitude (km). Au niveau de la mer, cela se simplifie en :

$$m = 1 / \sin(h) \qquad \textbf{(I.7)}$$

Les conditions de référence AM0, AM1, AM1,5 et AM2 correspondent respectivement à : hors atmosphère, soleil au zénith (h = 90°), h ≈ 41,8° (condition standard photovoltaïque), et h ≈ 30°. [15] [18]

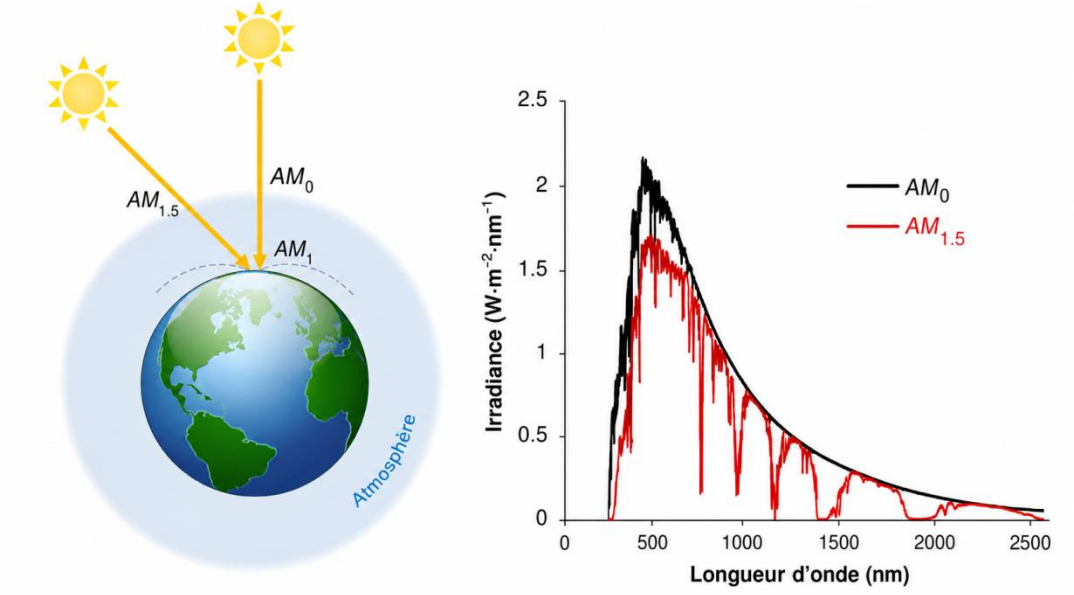


Fig. I.5 — Illustration du concept de masse d'air atmosphérique. [15]

Cette illustration montre comment la longueur du trajet optique parcouru par le rayonnement solaire dans l'atmosphère varie en fonction de l'angle zénithal. La masse d'air AM = 1/cos(θz) est minimale au zénith (AM1) et augmente considérablement à faible hauteur solaire, entraînant une atténuation plus importante du rayonnement.

I.4.3 Absorption et diffusion du rayonnement

Le rayonnement solaire est atténué lors de sa traversée de l'atmosphère par deux processus complémentaires :

- **L'absorption** : phénomène sélectif par lequel certains gaz atmosphériques absorbent le rayonnement à des longueurs d'onde spécifiques. Les principaux absorbants sont la vapeur d'eau (H_2O), l'ozone (O_3), l'oxygène (O_2) et le dioxyde de carbone (CO_2), responsables des bandes d'absorption caractéristiques visibles dans le spectre au sol.

- **La diffusion** : redistribution du rayonnement dans toutes les directions sans modification de longueur d'onde. Elle se manifeste sous deux formes : la diffusion de Rayleigh (par les molécules gazeuses, inversement proportionnelle à $I(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^4}$ Ce phénomène explique la couleur bleue du ciel, et la diffusion de Mie (par les aérosols et gouttelettes d'eau, peu sélective spectralement). [13] [16]

I.4.4 Réfraction atmosphérique

La diminution de la densité atmosphérique avec l'altitude induit une variation progressive de l'indice de réfraction, ce qui incurve les trajectoires des rayons lumineux vers le bas. Conséquence directe : la hauteur apparente du Soleil observée depuis la surface est légèrement supérieure à sa hauteur géométrique réelle. Ce phénomène allonge la durée effective du jour, notamment aux hautes latitudes. [13] [17]

I.4.5 Bilan radiatif de la Terre

Le bilan radiatif de la Terre représente l'ensemble des échanges d'énergie entre la Terre, l'atmosphère et l'espace. Il est fondé sur l'équilibre entre le rayonnement solaire incident reçu par la Terre et le rayonnement infrarouge réémis vers l'espace. Cet équilibre énergétique joue un rôle fondamental dans la régulation du climat terrestre et des températures globales. [13] [14]

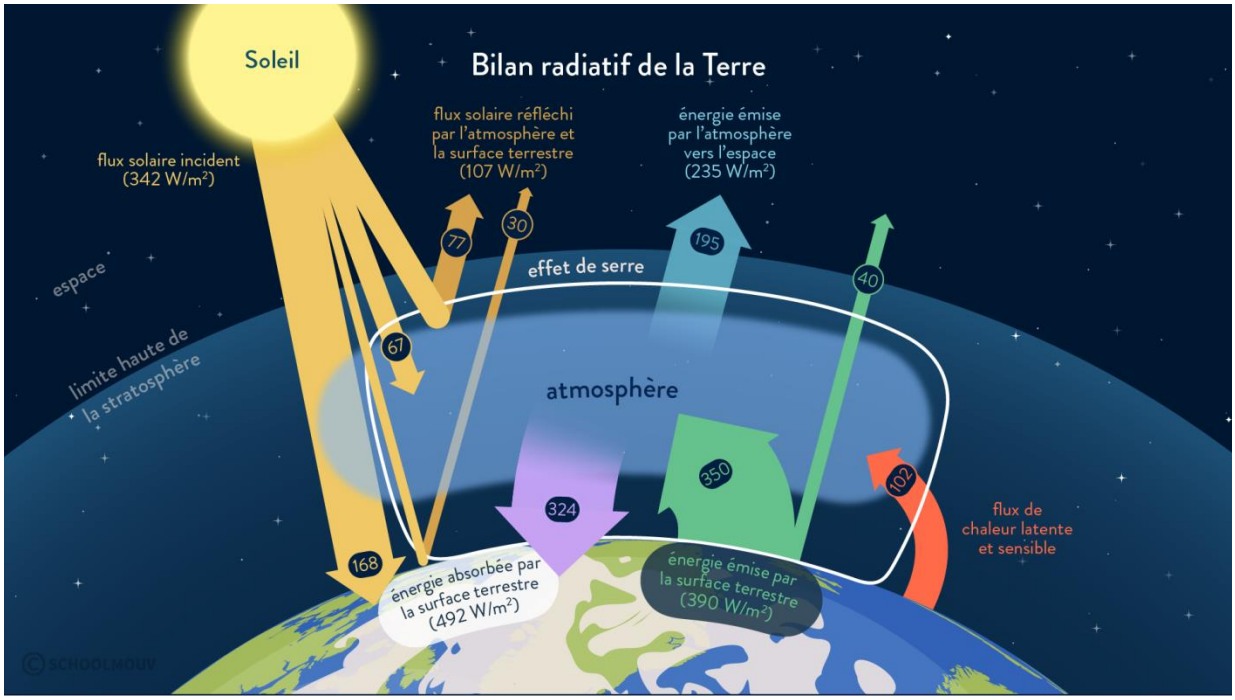


Fig. 1.6 – Bilan radiatif de la Terre et interactions atmosphériques. [14]

I.5 — Composantes du Rayonnement Solaire au Sol

Après traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire atteignant la surface terrestre se décompose en trois composantes :

- **Le rayonnement direct (Ib)** : fraction du rayonnement solaire parvenant au sol sans avoir subi de diffusion, c'est-à-dire en provenance directe du disque solaire. C'est la composante exploitée par les concentrateurs solaires et les systèmes à suivi solaire.
- **Le rayonnement diffus (Id)** : fraction dispersée dans toutes les directions par les molécules gazeuses, les aérosols et les nuages. Il provient de la totalité de la voûte céleste et constitue l'essentiel du rayonnement par temps couvert.
- **Le rayonnement réfléchi (Ir)** ou albédo : fraction du rayonnement global renvoyée vers l'observateur par les surfaces environnantes (sol, neige, eau, etc.). Il est caractérisé par le coefficient d'albédo α, compris entre 0 (surface absorbante parfaite) et 1 (réflecteur parfait).

Le rayonnement global (H) reçu sur une surface horizontale est la somme de ces trois composantes. [9] [18]

$$H = Ib + Id + Ir \qquad \textbf{(I.8)}$$

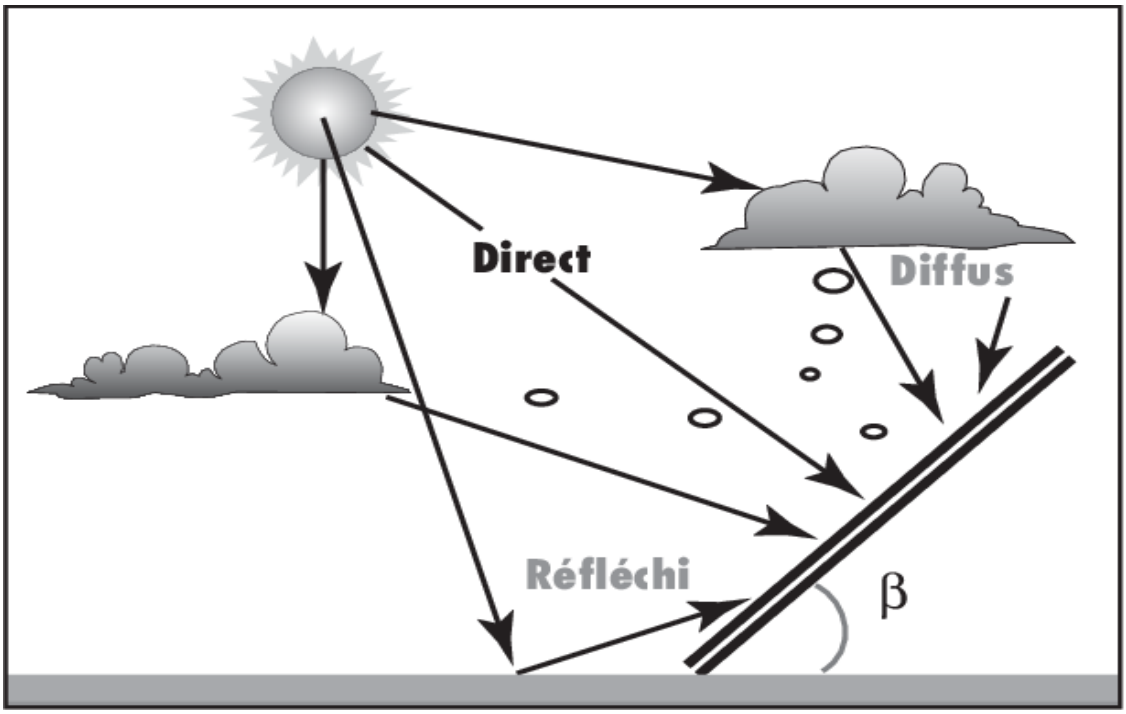


Fig I. 7 : Schéma des composantes du rayonnement solaire au sol (direct, diffus, réfléchi).

I.6 — Instruments de Mesure du Rayonnement Solaire

Les mesures de l'irradiation solaire reposent sur des instruments actinométriques spécialisés :

Pyranomètre

Principe de mesure : instrument de référence pour la mesure du rayonnement global hémisphérique (direct + diffus), exprimé en W/m². Il repose sur l'effet thermoélectrique : une thermopile (ensemble de thermocouples en série) convertit l'énergie solaire absorbée par un disque noir en tension électrique proportionnelle au flux incident. Élément sensible : disque noir en surface absorbante (coefficient d'absorption > 97 %), entouré de surfaces réfléchissantes blanches servant de référence thermique. La différence de température entre les zones noire et blanche génère la tension de sortie.

Dôme de protection : double coupole en verre borosilicaté ou en silice fondue, assurant la transmission du rayonnement sur la plage 300–3000 nm (couvrant l'ensemble du spectre solaire utile) tout en protégeant la thermopile des intempéries et des échanges convectifs.

Classes de précision (ISO 9060) : trois classes existent selon la norme ISO 9060 : classe A (Secondary Standard, incertitude < 2 %), classe B (First Class, < 5 %) et classe C (Second Class, < 10 %). Les pyranomètres Kipp & Zonen CM11 utilisés en Algérie appartiennent à la classe A ou B.

Applications : mesure du rayonnement global sur plan horizontal (données de référence pour calibration des modèles), monitoring des centrales photovoltaïques, études climatologiques et agrométéorologiques.

Correction thermique : les pyranomètres de haute précision intègrent une sonde de température pour corriger la dérive thermique de la sensibilité de la thermopile (environ −0,1 %/°C).

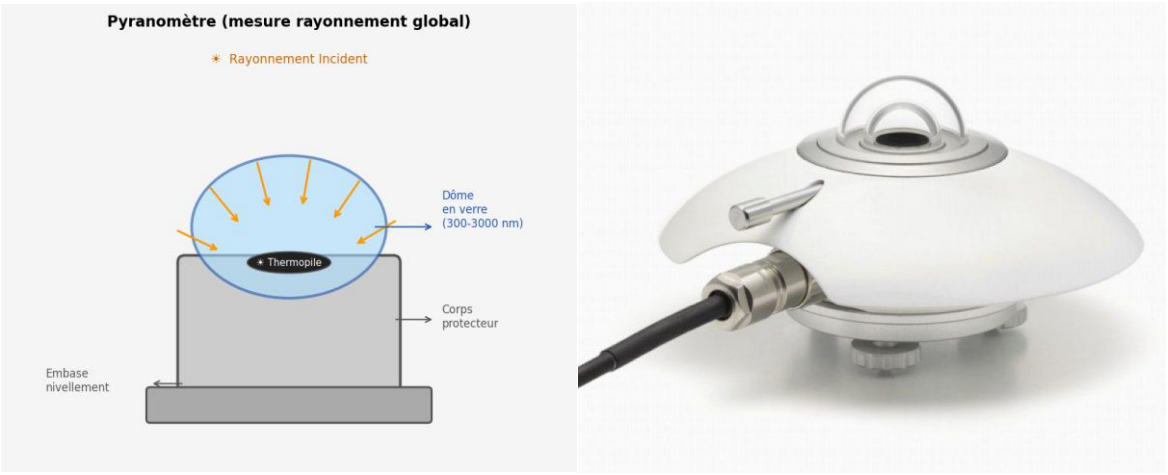


Fig. I.8 — Pyranomètre [20]

Le pyranomètre est l'instrument de référence pour la mesure du rayonnement global horizontal. Il est équipé d'un capteur thermopile recouvert d'un dôme en verre transparent qui transmet le rayonnement sur la plage spectrale 0,3–3 µm. La tension générée est proportionnelle à l'irradiance solaire reçue.

5- Pyranomètre à Ombre

- **Principe de mesure :** variante du pyranomètre standard dans laquelle le disque solaire est masqué en permanence par un anneau d'ombrage (shadow band), permettant de mesurer exclusivement la composante diffuse du rayonnement hémisphérique (rayonnement provenant de la voûte céleste sans la contribution directe du Soleil).
- **Anneau d'ombrage :** bande métallique orientée dans le plan de l'équateur céleste, dont la largeur et le rayon sont calculés pour occulter précisément le disque solaire tout au long de la journée. Sa position doit être réajustée régulièrement (tous les quelques jours) pour compenser la variation de déclinaison solaire.
- **Correction de l'occultatoin partielle du ciel :** l'anneau masque non seulement le Soleil mais aussi une fraction du rayonnement diffus provenant de la région voisine du disque solaire (circumsolaire). Une correction empirique (facteur 1,05 à 1,12 selon la latitude et la saison) doit être appliquée aux mesures brutes pour obtenir la valeur vraie du diffus.
- **Calcul du direct :** le rayonnement direct peut être obtenu par différence entre le rayonnement global mesuré par un pyranomètre standard et le rayonnement diffus mesuré par le pyranomètre ombré. Utilisation en Algérie : des mesures de diffus sont disponibles pour quelques stations (Bejaïa, Ghardaïa) mais restent rares. La décomposition diffus/direct est généralement réalisée par modèles empiriques à partir du seul rayonnement global.

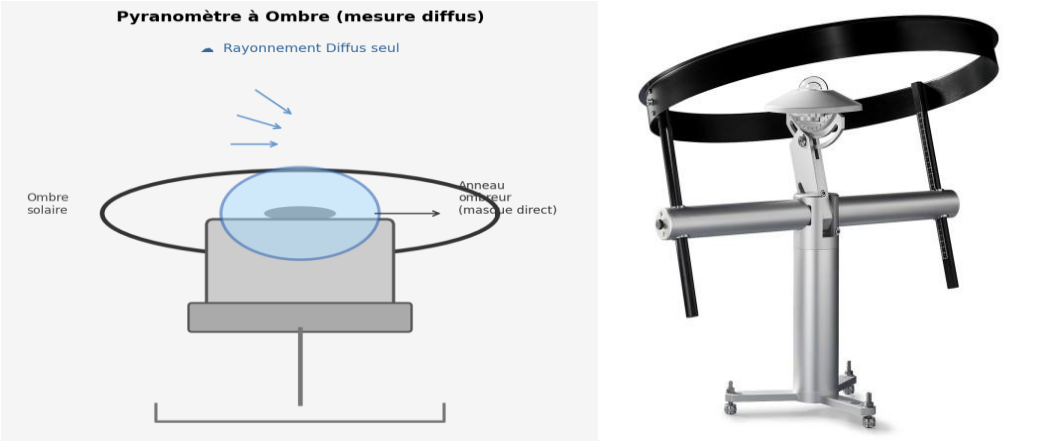


Fig. I.9 — Pyranomètre à Ombre.[20]

Le pyranomètre à ombre (ou à disque ombrant) permet de mesurer uniquement la composante diffuse du rayonnement solaire en bloquant le rayonnement direct à l'aide d'un disque ou d'un anneau ombrant aligné sur la trajectoire du Soleil. La différence avec la mesure globale donne la composante directe.

6- Pyrhéliomètre

Principe de mesure : instrument à champ de vue très restreint (demi-angle d'acceptance de 2,5° selon l'OMM, ou 5,7° selon la norme WMO), monté sur un suiveur solaire à deux axes, mesurant exclusivement le rayonnement direct normal (DNI) provenant du disque solaire et de son auréole immédiate. Collimateur à diaphragmes : tube long (rapport longueur/diamètre > 10) muni d'une série de diaphragmes internes qui limitent rigoureusement l'angle solide de réception. Seul le rayonnement arrivant dans l'axe optique (aligné sur le centre du Soleil) atteint le détecteur. Détecteur : thermopile de haute sensibilité ou cellule photoélectrique placée au fond du collimateur, dont la surface est protégée par une fenêtre en verre ou en quartz. Suivi solaire automatisé : le pyrhéliomètre est monté sur un tracker solaire à deux axes (azimut + élévation), commandé par un calculateur intégrant les éphémérides solaires pour maintenir l'axe optique pointé en permanence vers le centre du Soleil. Applications : mesure du DNI indispensable pour le dimensionnement des systèmes solaires à concentration (CSP : centrales à tour, paraboliques, Fresnel) qui ne peuvent exploiter que le rayonnement direct. Très rare en Algérie (un seul recensé à Tamanrasset selon les données OMM/NOAA). Précision : les pyrhéliomètres de classe « Absolute Cavity » (référence primaire mondiale) atteignent une précision de 0,1 %. Les instruments de terrain (classe B) ont une incertitude typique de 1–2 %.

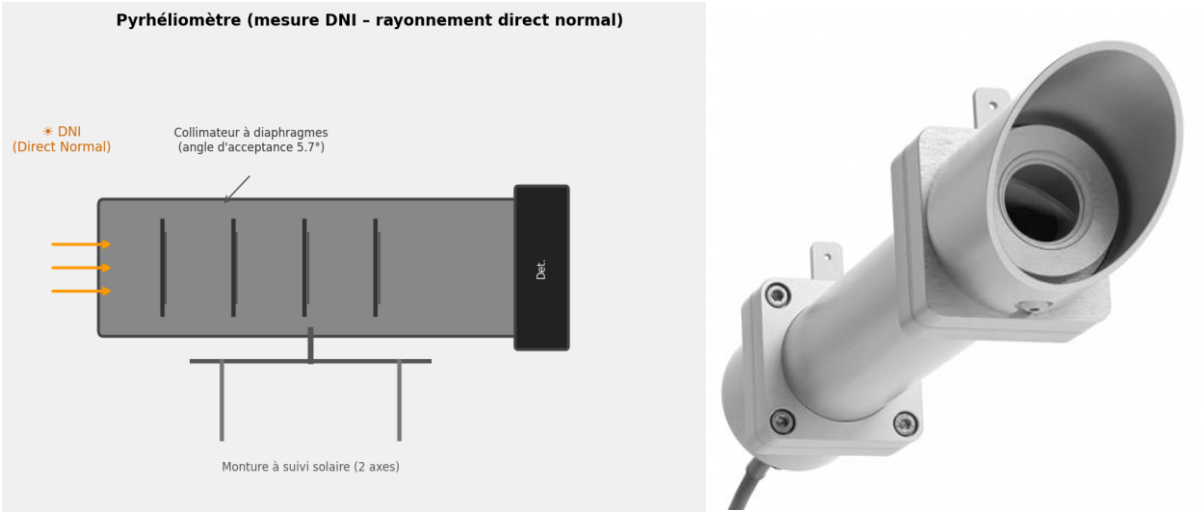


Fig. I.10 — Pyrhéliomètre [20]

Le pyrhéliomètre est un instrument de précision destiné à mesurer le rayonnement solaire direct normal (DNI). Monté sur un système de suivi solaire à deux axes, il pointe en permanence vers le centre du disque solaire. Son tube colimateur accepte un demi-angle d'ouverture de 2,5°, conformément aux normes WMO.

7- Héliographe de Campbell-Stokes

Principe de mesure : instrument classique qui enregistre la durée effective d'ensoleillement (heures de soleil) en concentrant le rayonnement solaire direct par une sphère de verre cristal (diamètre ~10 cm) sur une bandelette de papier cartonné gradué placée dans une coupelle de maintien. Mécanisme d'enregistrement : lorsque l'intensité solaire dépasse un seuil de ~120 W/m² (condition d'ensoleillement effectif selon l'OMM), le point focal brûle la bandelette, laissant une trace visible. La longueur cumulée des traces brûlées sur 24 heures donne la durée d'ensoleillement journalier S (en heures). Bandelettes de papier : trois types selon la saison (droite en hiver, recourbée en été, symétrique aux équinoxes) pour suivre l'arc solaire diurne. La lecture quotidienne par un observateur constitue une source de données longue durée (certaines stations algériennes disposent de séries de plus de 50 ans). Donnée centrale pour le modèle d'Angström-Prescott : la durée d'ensoleillement mesurée S est l'unique variable d'entrée du modèle empirique utilisé dans ce mémoire. Le rapport $\sigma = S/S_0$ (fraction d'insolation) est calculé à partir de S et de la durée astronomique S_0.

Limites et évolution : les héliographes modernes utilisent des capteurs photoélectriques (pyranomètres à seuil ou capteurs CCD) pour une numérisation directe des données, supprimant la lecture manuelle des bandelettes. Cependant, les données historiques provenant des Campbell-Stokes restent la principale source de longues séries climatologiques en Algérie.

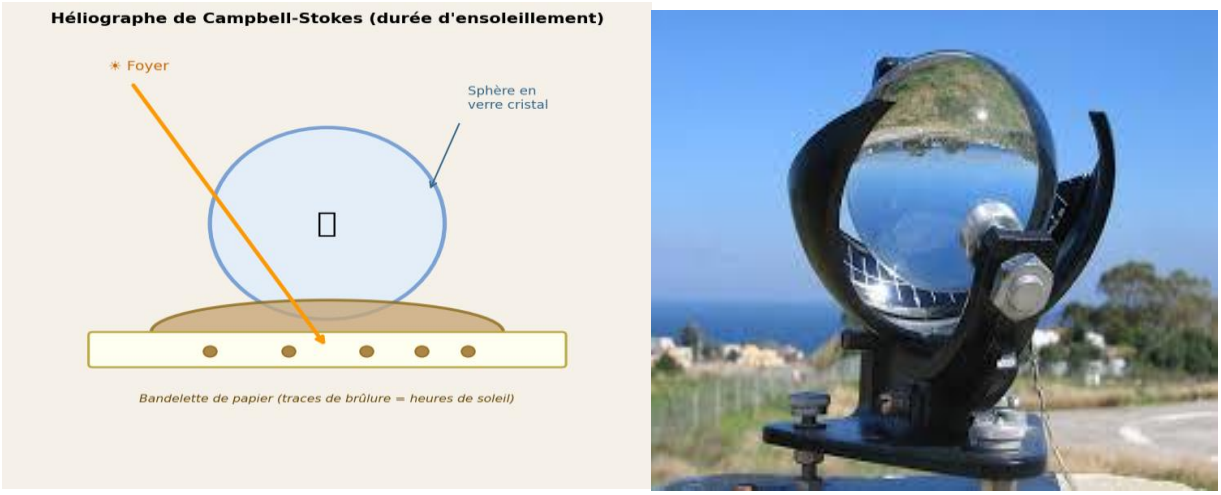


Fig. I.11 — Héliographe de Campbell-Stokes (durée d'ensoleillement).[20]

L'héliographe de Campbell-Stokes est un instrument classique qui enregistre mécaniquement la durée d'ensoleillement en concentrant le rayonnement solaire à travers une sphère de verre sur une bande de papier graduée. Les plages brûlées indiquent les périodes d'ensoleillement effectif, permettant le calcul de la fraction d'insolation $\sigma = S/S_0$, paramètre fondamental du modèle d'Angström-Prescott utilisé dans ce travail.

Pour les sites dépourvus de mesures directes, une interpolation spatiale à partir des stations voisines peut être effectuée, au prix d'une dégradation de la précision proportionnelle à l'éloignement. [20] [21]

I.7 — Conclusion

Ce chapitre a permis d'établir les bases physiques et astronomiques du rayonnement solaire. Après avoir décrit la structure et les caractéristiques du Soleil, les mécanismes de production de son rayonnement thermonucléaire et la nature de son spectre électromagnétique, nous avons analysé les phénomènes d'absorption, de diffusion et de réfraction que subit ce rayonnement lors de sa traversée de l'atmosphère. L'inventaire des composantes du rayonnement au sol et l'état du gisement solaire algérien confirment le potentiel considérable dont dispose l'Algérie pour le développement des énergies solaires. Ces éléments théoriques constituent le socle indispensable à la démarche de modélisation développée dans les chapitres suivants.

CHAPITRE II

BASES THÉORIQUES ET MÉTHODOLOGIE

II.1 — Introduction

Ce chapitre expose l'ensemble des outils mathématiques, géométriques et statistiques utilisés pour modéliser l'irradiation solaire diffusée. Il présente successivement les paramètres astronomiques et géographiques, les expressions analytiques pour le calcul de l'irradiation extraterrestre et des fractions d'insolation, le modèle empirique d'Angström-Prescott, et la méthode des moindres carrés utilisée pour la calibration locale des coefficients du modèle sur quatre sites algériens.

II.2 — Gisement Solaire en Algérie

L'Algérie figure parmi les pays les mieux dotés au monde en termes de ressource solaire. Son territoire, dont 86 % est constitué de zones sahariennes, bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel :

Tableau II.1 — Indicateurs du gisement solaire par région en Algérie

Région	Superficie (%)	Ensoleillement (h/an)	Énergie reçue (kWh/m²/an)
Zones côtières	**4 %**	**2 650**	**1 700**
Hauts Plateaux	**10 %**	**3 000**	**1 900**
Sahara	**86 %**	**3 500**	**2 650**

L'Agence Spatiale Allemande (DLR) a évalué le potentiel solaire algérien à plus de 169 000 TWh/an pour le solaire thermique à concentration (CSP) et à 13,9 TWh/an pour le photovoltaïque (PV). À titre de comparaison, ce potentiel est équivalent à la découverte d'une dizaine de gisements de gaz naturel de la taille de Hassi R'Mel. [6] [21]

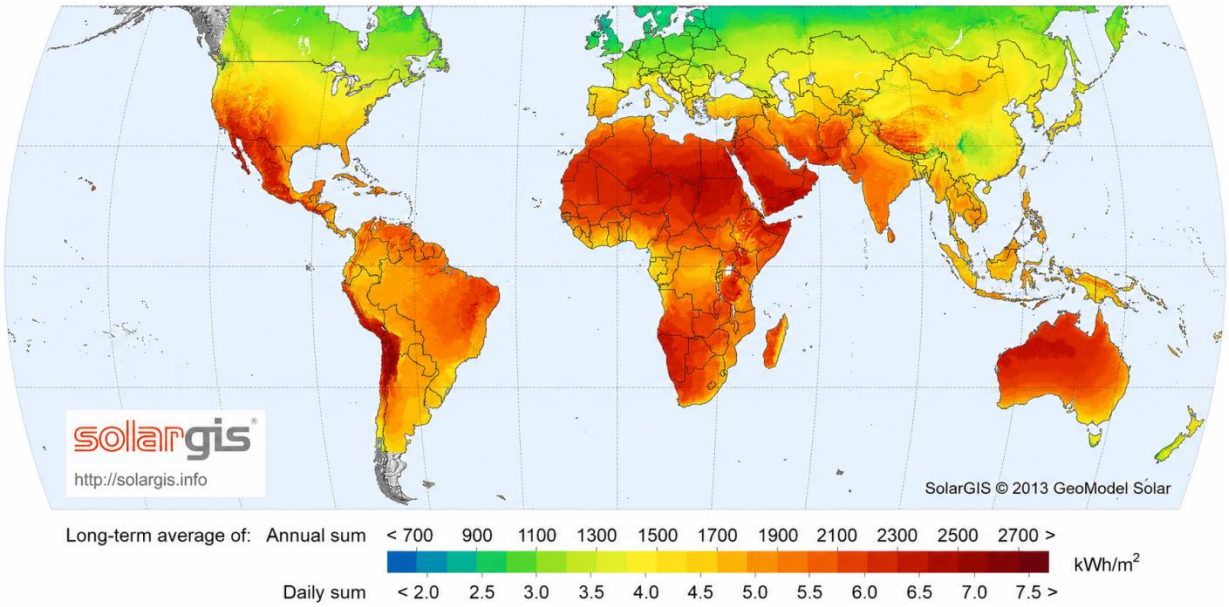


Fig. II.1 — Carte mondiale de l'irradiation solaire (source : SolarGIS, 2013)

Cette carte mondiale illustre la distribution géographique de l'irradiation solaire globale horizontale annuelle (GHI). Elle met en évidence les zones à fort potentiel solaire, notamment le Sahara, la péninsule arabique et le désert de Gobi. L'Algérie apparaît parmi les pays les mieux dotés, avec des valeurs dépassant 2 500 kWh/m²/an dans le Sud.

II.3 — Repérage Géographique et Astronomique

II.3.1 Paramètres de localisation terrestre

La position d'un lieu sur la surface terrestre est définie par trois coordonnées géographiques :

- La latitude φ : angle entre le plan équatorial et la direction du point considéré depuis le centre terrestre. Elle varie de −90° (pôle Sud) à +90° (pôle Nord), avec φ > 0 pour l'hémisphère Nord.
- La longitude L : angle mesuré à l'est ou à l'ouest par rapport au méridien de Greenwich. Elle varie de −180° à +180°.
- L'altitude z : hauteur au-dessus du niveau moyen de la mer, exprimée en mètres.

L'axe de rotation terrestre est incliné de 23°27' par rapport à la normale au plan de l'écliptique (obliquité). Cette inclinaison est à l'origine des saisons et de la variation de la durée du jour au fil de l'année. [17] [18]

II.3.2 Mouvements de la Terre

Les deux mouvements fondamentaux de la Terre conditionnent la géométrie du rayonnement solaire reçu :

- La rotation propre : la Terre effectue une rotation complète sur elle-même en 24 heures (jour solaire moyen), dans le sens trigonométrique direct (d'ouest en est), ce qui explique le mouvement apparent du Soleil dans le ciel.
- La révolution autour du Soleil : la Terre décrit une orbite elliptique de période 365,25 jours, avec le Soleil occupant l'un des foyers de l'ellipse. La distance Terre-Soleil varie entre 147 millions de km (périhélie, début janvier) et 152 millions de km (aphélie, début juillet), avec une valeur moyenne de 149,6 millions de km. [17] [18]

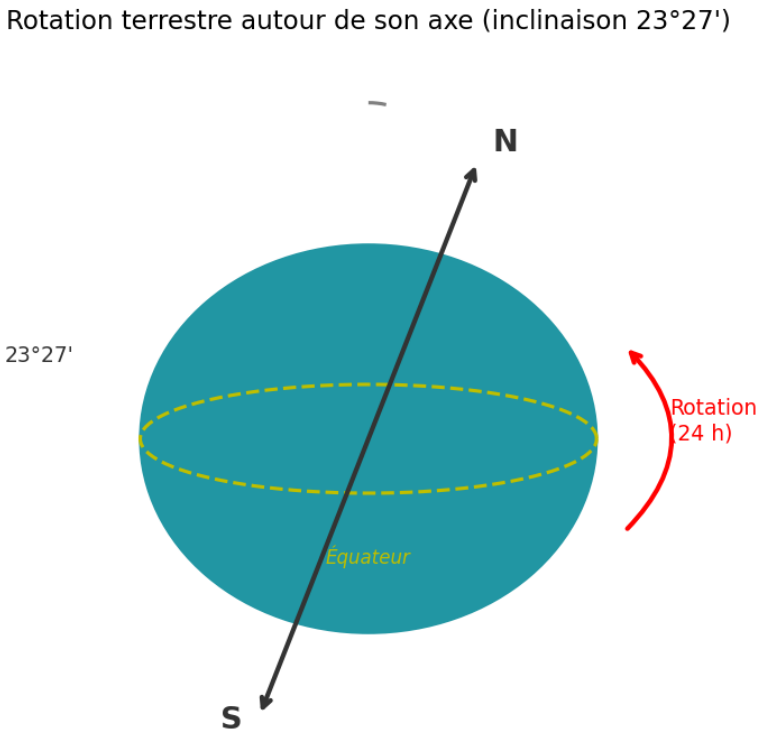


Fig. II.2 — Représentation de la rotation terrestre autour de son axe. [17]

Cette figure illustre la rotation diurne de la Terre autour de son axe polaire (période de 24 heures), qui est à l'origine de l'alternance jour/nuit et du mouvement apparent du Soleil dans le ciel. L'inclinaison de l'axe terrestre (~23,27°) par rapport au plan de l'écliptique explique également les variations saisonnières de l'angle d'incidence du rayonnement.

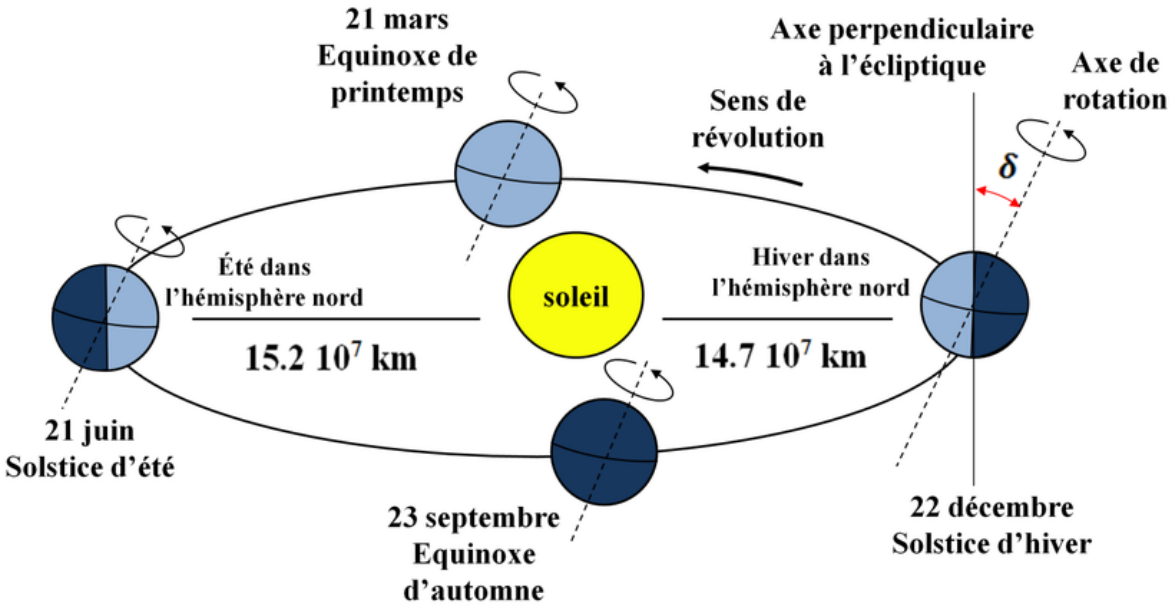


Fig. II.3 — Schéma de la révolution de la Terre autour du Soleil

Ce schéma représente la trajectoire elliptique de la Terre autour du Soleil (période d'un an), avec les positions caractéristiques des solstices et des équinoxes. La variation de la distance Terre-Soleil (périhélie en janvier, aphélie en juillet) entraîne une fluctuation de ~3,3 % de la constante solaire au cours de l'année.

II.3.3 La déclinaison solaire δ

La déclinaison solaire δ est l'angle formé entre le rayon vecteur Terre-Soleil et le plan équatorial. Elle résulte directement de l'inclinaison de l'axe terrestre et varie périodiquement au cours de l'année, entre +23°27' au solstice d'été boréal (21 juin) et −23°27' au solstice d'hiver boréal (21 décembre), s'annulant aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). Elle est donnée par la formule approchée :

$$\delta = 23{,}45 \times \sin\left[0{,}980 \times (j + 284)\right] \quad \text{(en degrés)} \qquad \textbf{(II.1)}$$

où j est le numéro du jour de l'année. [17]

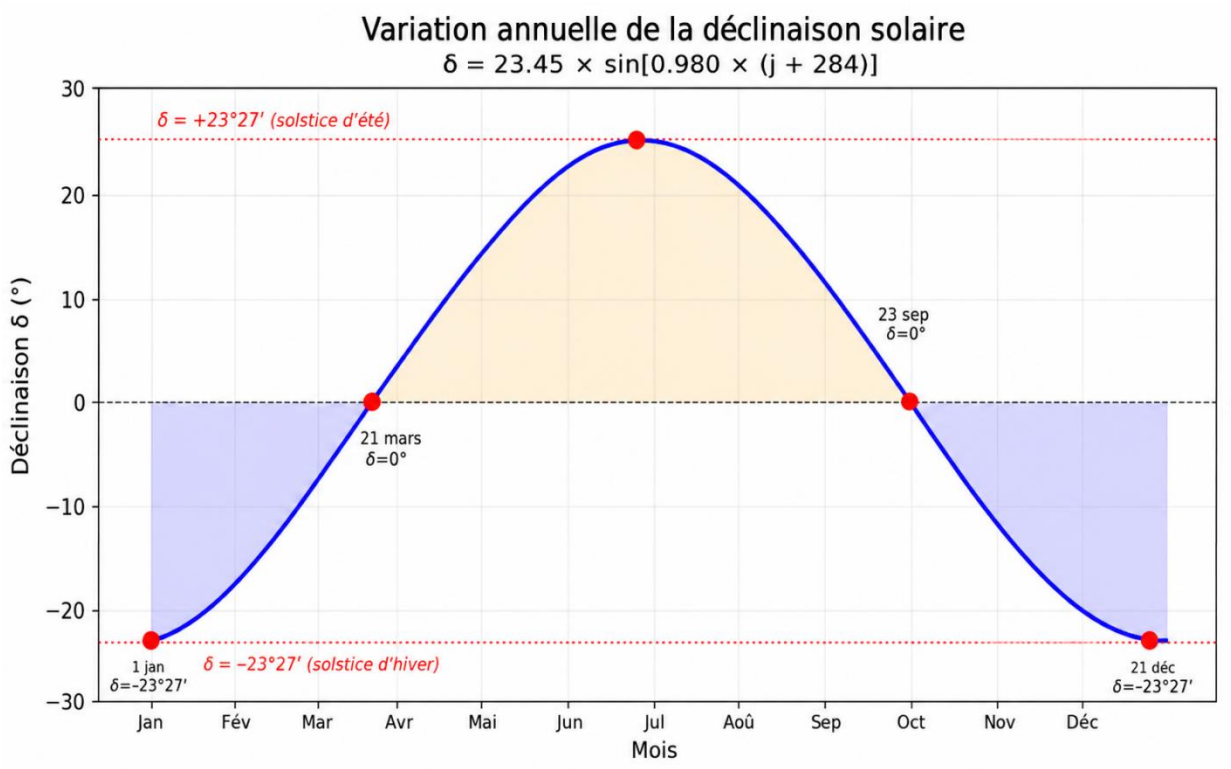


Fig. II.4 — Variation annuelle de la déclinaison solaire

Ce graphe montre l'évolution de la déclinaison solaire δ au fil des mois de l'année, oscillant entre −23,45° (solstice d'hiver) et +23,45° (solstice d'été). La déclinaison détermine la hauteur maximale du Soleil au-dessus de l'horizon et conditionne directement la durée du jour ainsi que l'angle d'incidence du rayonnement sur une surface horizontale.

II.3.4 L'angle horaire ω

L'angle horaire ω mesure l'écart angulaire entre la position actuelle du Soleil et sa position au méridien local (midi solaire). Il est nul à midi solaire, négatif le matin et positif l'après-midi, avec une variation de 15° par heure :

$$\omega = 15° \times (HSL - 12) \qquad \textbf{(II.2)}$$

où HSL est l'heure solaire locale exprimée en heures. [17]

II.4 — Position Apparente du Soleil

II.4.1 La hauteur solaire h

La hauteur solaire h est l'angle d'élévation du Soleil au-dessus du plan horizontal. Elle est calculée à partir de la latitude du lieu φ, de la déclinaison δ et de l'angle horaire ω :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \times \sin(\delta) + \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \qquad \textbf{(II.3)}$$

À h = 0°, le Soleil est à l'horizon (lever ou coucher). La distance zénithale θz est l'angle complémentaire de h : θz = 90° − h. [9] [18]

II.4.2 L'azimut solaire a

L'azimut solaire a désigne la direction du Soleil dans le plan horizontal, mesurée à partir du Nord (pour l'hémisphère nord). Il est calculé par :

$$\text{Sin}(a) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) / \cos(h) \qquad \textbf{(II.4)}$$

L'azimut est négatif le matin (côté est) et positif l'après-midi (côté ouest). [9] [18]

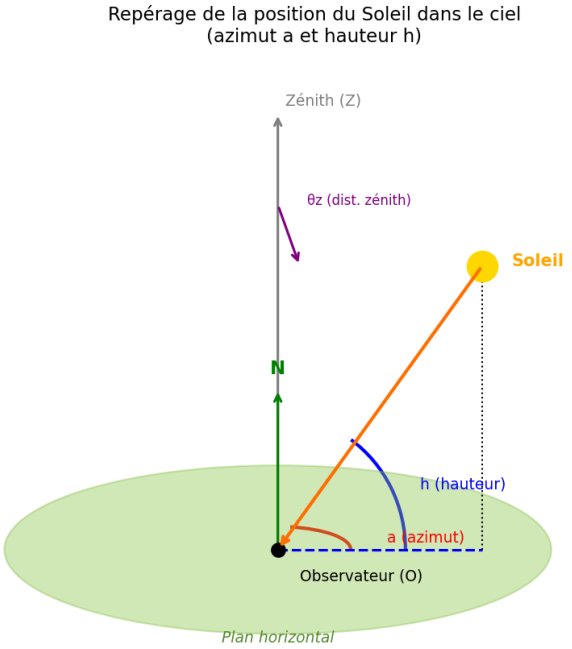


Fig. II.5 — Repérage de la position du Soleil (azimut et hauteur)

Ce schéma tridimensionnel illustre le système de coordonnées horizontales utilisé pour repérer la position apparente du Soleil dans le ciel local : la hauteur solaire h (angle entre la

direction du Soleil et le plan horizontal) et l'azimut a (angle mesuré depuis le Nord dans le plan horizontal). Ces deux angles permettent de calculer l'orientation et l'inclinaison optimales des capteurs solaires.

II.5 — Durée du Jour et Angle Horaire au Coucher

La durée astronomique du jour S_0 correspond à l'intervalle de temps entre le lever et le coucher du Soleil L'angle horaire au coucher ω_s (en radians) est obtenu en posant h = 0 dans l'expression de la hauteur solaire : [17] [9]

$$\text{Cos}\,(\omega_s) = -\tan(\varphi) \times \tan(\delta) \qquad \textbf{(II.5)}$$

La durée astronomique du jour est alors :

$$S_0 = (2/15) \times \omega_s \ \text{(en heures, avec } \omega_s \text{ en degrés)} \qquad \textbf{(II.6)}$$

ou, en radians :

$$S_0 = (24/\pi) \times \omega_s \ \text{(en heures)} \qquad \textbf{(II.7)}$$

II.6 — Composantes de l'Irradiation Solaire

II.6.1 Irradiation extraterrestre instantanée

Le flux solaire instantané reçu par une surface horizontale à l'extérieur de l'atmosphère est la projection du flux normal sur cette surface :

$$I_{oh} = I_{cs} \times \sin(h) \qquad \textbf{(II.8)}$$

où I_{cs} est la constante solaire corrigée pour le jour j. [9] [18]

II.6.2 Irradiation journalière extraterrestre H_0

L'intégration du flux instantané sur la durée du jour (lever au coucher) fournit l'irradiation journalière hors atmosphère H_0 [9] [18] :

$$H_0 = (24 \times I_0 / \pi) \times (1 + 0{,}033 \times \cos\,(360j/365)) \times Z \qquad \textbf{(II.9)}$$

Avec :

$$Z = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \sin\,(\omega_s) + (2\pi/360) \times \omega_s \times \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \qquad \textbf{(II.10)}$$

Cette grandeur dépend uniquement de la latitude φ, de la déclinaison δ (fonction du jour j) et de la constante solaire I_0. Elle sert de référence pour normaliser l'irradiation mesurée au sol.

II.6.3 La fraction d'insolation σ

La fraction d'insolation σ est le rapport entre la durée effective d'ensoleillement S (mesurée par héliographe) et la durée astronomique maximale du jour S_0 :

$$\sigma = S / S_0 \qquad \textbf{(II.11)}$$

C'est un indicateur de la transparence atmosphérique moyenne journalière. Une valeur de σ proche de 1 indique un ciel dégagé, tandis qu'une valeur faible témoigne d'une nébulosité importante. [5] [19]

Les fractions d'insolation mensuelles, obtenues à partir des données héliographiques sur 25 ans, sont présentées ci-dessous.

Tableau II. 2 — Fractions d'insolation mensuelles pour les quatre sites

Site	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
Alger	**0,48**	**0,56**	**0,60**	**0,61**	**0,71**	**0,71**	**0,78**	**0,80**	**0,74**	**0,62**	**0,51**	**0,49**
Oran	**0,53**	**0,53**	**0,54**	**0,63**	**0,69**	**0,69**	**0,80**	**0,79**	**0,72**	**0,66**	**0,53**	**0,53**
Tamanrasset	**0,78**	**0,81**	**0,84**	**0,77**	**0,76**	**0,96**	**0,75**	**0,77**	**0,73**	**0,77**	**0,81**	**0,97**
B.B. Arreridj	**0,50**	**0,55**	**0,58**	**0,60**	**0,65**	**0,72**	**0,76**	**0,75**	**0,68**	**0,60**	**0,50**	**0,48**

II.7 — Sites d'Étude en Algérie

L'étude porte sur quatre localités algériennes choisies pour leur représentativité climatique et leur contraste géographique marqué :

Tableau II. 3 — Coordonnées géographiques des quatre stations d'étude en Algérie

Paramètre	Alger	Oran	Tamanrasset	Bordj Bou Arreridj
Latitude (°N)	**36,43**	**35,63**	**22,47**	**36,07**
Longitude (°E/O)	**3,15 E**	**0,38 O**	**5,53 E**	**4,76 E**
Altitude (m)	**25**	**109**	**1 378**	**870**
Climat	**Méditerranéen**	**Semi-aride**	**Désertique saharien**	**Semi-aride continental**

Les données utilisées couvrent une période d'au moins 25 ans pour l'ensoleillement (héliographe de type Campbell-Stokes) et une décennie pour l'irradiation (pyranomètres Robitzsch et Kipp-Zonen). [2] [21]

II.8 — Sélection des Jours Types Mensuels

Pour simplifier les calculs tout en préservant la représentativité des résultats, la notion de jour type mensuel — introduite par Klein — est adoptée. Il s'agit d'un jour représentatif dont les caractéristiques (déclinaison, irradiation extraterrestre, etc.) approchent au mieux la moyenne mensuelle réelle. Les jours types retenus, indexés dans le calendrier julien, sont les suivants. [22] [18]

Tableau II.4 — Jours types retenus pour chaque mois de l'année

Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

II.9 — Le Modèle Empirique d'Angström-Prescott

II.9.1 Principe et formulation

Proposé initialement par Anders Angström en 1924 et amélioré par Prescott, ce modèle établit une relation linéaire entre le rapport irradiation globale/irradiation extraterrestre et la fraction d'insolation :

$$H / H_0 = a_1 + b_1 \times (S / S_0) \qquad \textbf{(II.12)}$$

Les coefficients a_1 et b_1 sont des constantes empiriques dépendant des conditions atmosphériques locales (turbidité, teneur en vapeur d'eau, altitude, etc.). Ils doivent être déterminés par régression à partir des données mesurées localement. [5] [19]

II.9.2 Indicateurs statistiques d'évaluation

La performance des modèles est quantifiée par les indicateurs suivants :

- Erreur Absolue Moyenne (MAE) : $MAE = (1/n) \times \Sigma|d_i|$ **(II.13)**
- Erreur Moyenne de Biais (MBE) : $MBE = (1/n) \times \Sigma d_i$ **(II.14)**
- Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) : $RMSE = \sqrt{[(1/n) \times \Sigma d_i^2]}$ **(II.15)**

Où $d_i = (H_i \text{ mesurée} - H_i \text{ calculée}) \times (100 / H_i \text{ mesurée})$ est l'erreur relative pour le mois i. [23]

II.9.3 Extensions du modèle [3] [4]

Des formulations élargies intègrent des variables météorologiques supplémentaires afin d'affiner les estimations :

- Modèle avec température : $H/H_0 = a + b\times\sigma + c\times Tn$ (Tn = T/Tmax : température normalisée)
- Modèle avec humidité relative : $H/H_0 = a + b\times\sigma + c\times R$ (R : humidité relative moyenne en %).
- Modèle combiné : $H/H_0 = a + b\times\sigma + c\times Tn + d\times R$

II.10 Avantages et limites

La méthode des moindres carrés présente plusieurs atouts majeurs pour l'application au modèle d'Angström-Prescott :

- Simplicité et rapidité de calcul : solution analytique explicite, ne nécessitant aucune itération.
- Optimalité statistique : dans les conditions du théorème de Gauss-Markov (résidus non corrélés, de variance constante), les estimateurs de la méthode des moindres carrés sont les meilleurs estimateurs linéaires non biaisés BLUE.
- Interprétabilité : les coefficients a et b ont une signification physique directe — a représente l'irradiation relative minimale (ciel entièrement couvert) et b l'irradiation relative maximale (ciel totalement dégagé).

Ses principales limites sont la sensibilité aux valeurs aberrantes et l'hypothèse de linéarité de la relation entre σ et H/H_0, qui peut être mise en défaut pour certains sites à climatologie particulière comme Tamanrasset. [3] [23]

II.11 — Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble du cadre méthodologique de notre étude. Les outils de calcul géométrique et astronomique permettent de déterminer précisément la position du Soleil et d'en déduire l'irradiation extraterrestre pour chaque jour de l'année. Le modèle d'Angström-Prescott, calibré par la méthode des moindres carrés, constitue le coeur de notre démarche d'estimation de du rayonnement solaire diffus au sol sur quatre sites algériens. Les instruments de mesure ont été décrits pour assurer la traçabilité des données expérimentales utilisées. Les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1 — Introduction

Ce chapitre constitue le coeur analytique du mémoire. Il présente et discute les résultats obtenus à partir de l'application du modèle d'Angström-Prescott calibré par la méthode des moindres carrés pour l'estimation de l'irradiation solaire diffusée à Alger, Oran, Tamanrasset et Bordj Bou Arreridj. Les résultats calculés sont systématiquement confrontés aux données expérimentales mesurées pour chacun des quatre sites.

III.2 — Irradiation Extraterrestre Calculée (H_0)

L'irradiation extraterrestre journalière moyenne mensuelle H_0, calculée par la formule (II.10) pour les jours types de chaque mois, est présentée dans le tableau suivant pour les quatre sites. Ces valeurs constituent la référence de normalisation pour le modèle d'Angström-Prescott.

Tableau III.1 — Valeurs de l'irradiation extraterrestre journalière moyenne mensuelle H_0 pour les sites d'étude

Mois	Alger	Oran	Tamanrasset	B.B. Arreridj
Janvier	**17,00**	**17,66**	**25,21**	**17,39**
Février	**22,18**	**22,77**	**29,30**	**22,53**
Mars	**28,66**	**29,13**	**33,82**	**28,94**
Avril	**35,46**	**35,71**	**37,72**	**35,61**
Mai	**39,91**	**39,95**	**39,60**	**39,94**
Juin	**41,73**	**41,66**	**40,10**	**41,69**
Juillet	**40,85**	**40,83**	**39,76**	**40,84**
Août	**37,27**	**37,42**	**38,36**	**37,36**
Septembre	**31,22**	**31,60**	**35,21**	**31,44**
Octobre	**24,26**	**24,81**	**30,69**	**24,59**
Novembre	**18,27**	**18,91**	**26,18**	**18,65**
Décembre	**15,62**	**16,28**	**24,03**	**16,01**

Le tableau ci-dessus (III.1) montre la différence entre les quatre sites. En analysant plus en détail ses données, on observe des profils climatiques distincts qui reflètent parfaitement la géographie variée de l'Algérie, comme illustré dans les courbes ci-dessous.

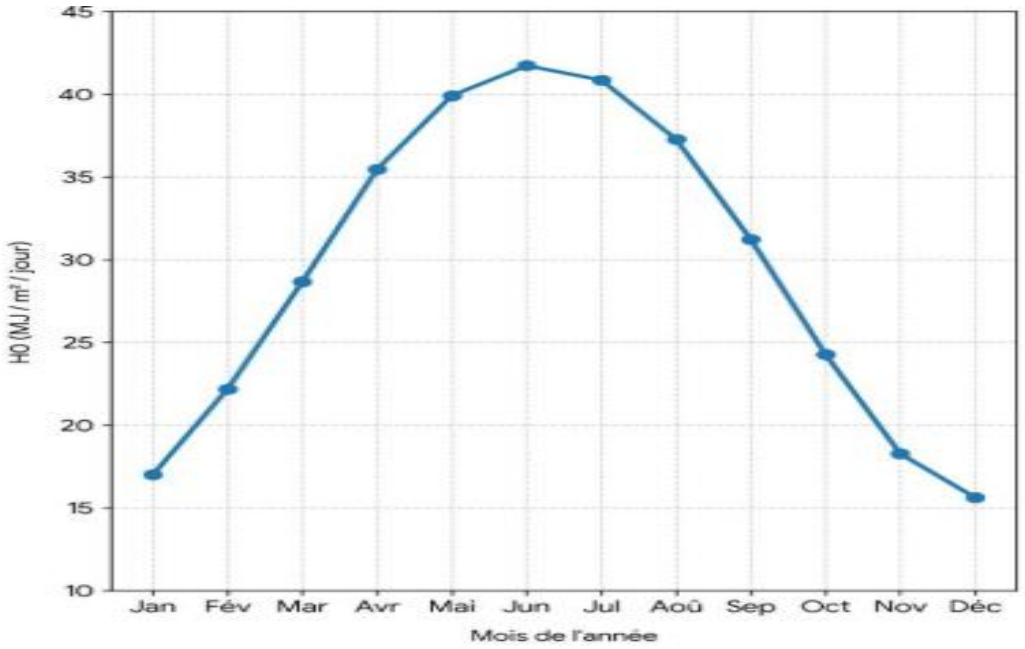


Fig. III.1 Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Alger

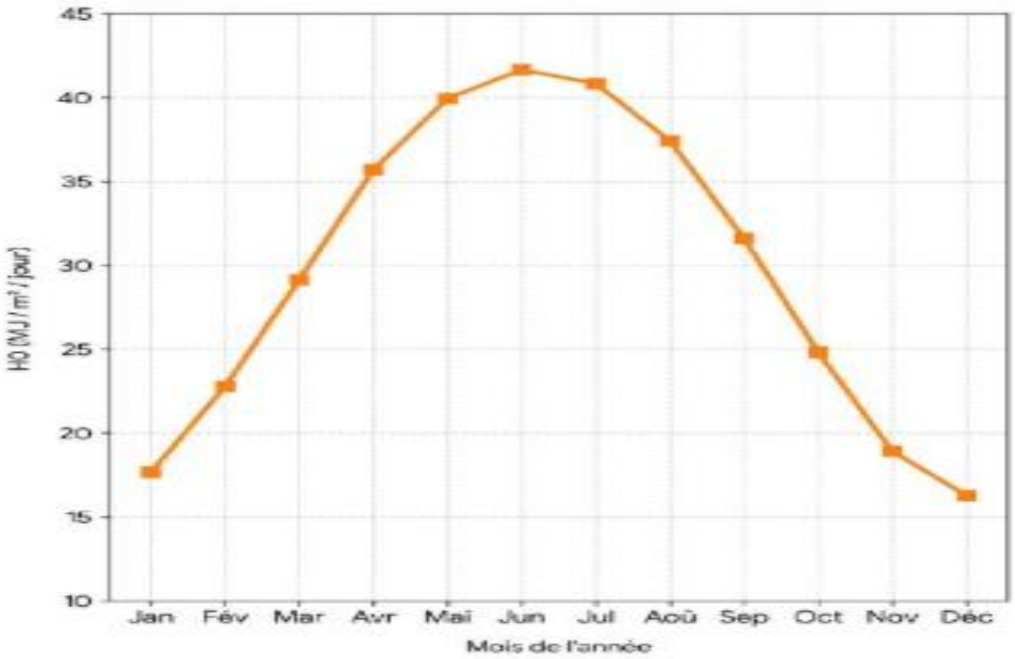


Fig. III.2 Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Oran

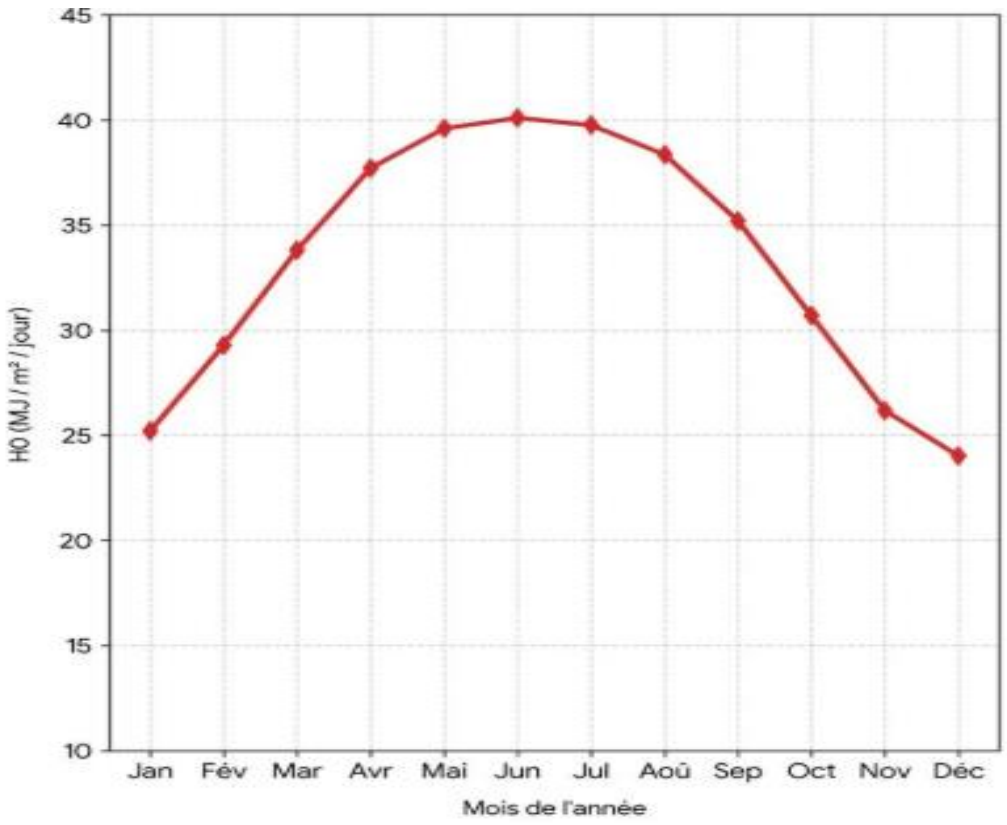


Fig. III. 3 Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Tamanrasset

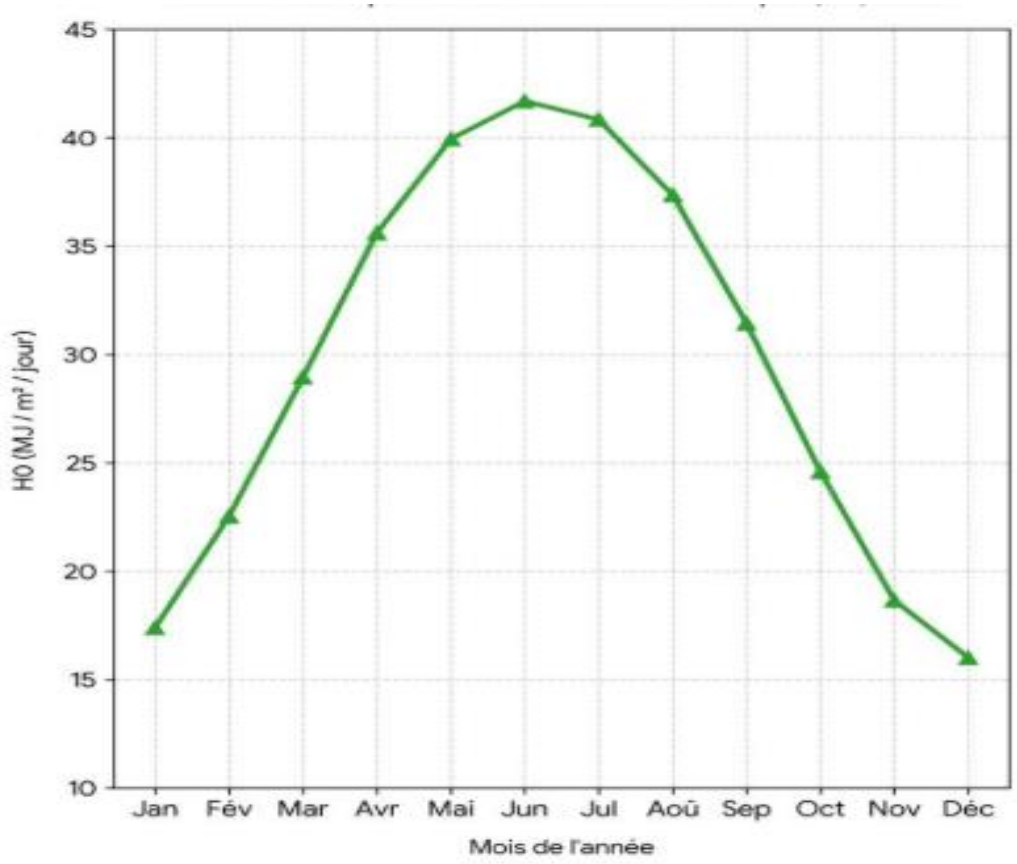


Fig. III.4 Évolution du rayonnement solaire global extraterrestre à Bordj Bou Arreridj

L'analyse des quatre courbes d'évolution de l'irradiation journalière moyenne extraterrestre (H_0) montre deux comportements distincts selon la position géographique des stations. Pour les trois sites du Nord, les profils affichent une forte variation saisonnière en forme de cloche : (Alger) varie d'un minimum de 15,62 en décembre à un maximum de 41,73(MJ/m²/jour) en juin, (Oran) varie de 16,28 en décembre à 41,66(MJ/m²/jour) en juin, et Bordj Bou Arreridj (BBA) varie de 16,01 en décembre à 41,69 (MJ/m²/jour) en juin. À l'inverse, la station saharienne de (Tamanrasset) se distingue par une courbe nettement plus stable et linéaire tout au long de l'année, maintenant un gisement hivernal très élevé de 24,03 (MJ/m²/jour) en décembre pour un maximum de 40,10 (MJ/m²/jour) en juin. Ces résultats confirment sur le plan théorique que l'irradiation reçue en dehors de l'atmosphère dépend uniquement des facteurs foudroyants astronomiques et de la latitude de chaque site.

III.3 — Résultats

III.3.1 Alger

. La station d'Alger, située dans la wilaya d'Alger, a été sélectionnée pour étudier le rayonnement solaire diffus. Les données présentées dans le tableau suivant correspondent aux valeurs mensuelles calculées et mesurées, utilisées pour analyser le comportement du rayonnement diffus et évaluer la fiabilité du modèle adopté.

Tableau III.2— Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station d'Alger

Mois	δ (°)	H_0 (MJ/m²/j)	H_d calculée (MJ/m²/j)	H_d mesurée (MJ/m²/j) [24]	ω_s (rad)
Janvier	**−21,27**	**17,00**	**4,62**	**4,68**	**1,28**
Février	**−12,61**	**22,18**	**5,88**	**5,76**	**1,40**
Mars	**−2,04**	**28,66**	**7,51**	**7,20**	**1,54**
Avril	**9,48**	**35,46**	**9,19**	**8,64**	**1,69**
Mai	**18,67**	**39,91**	**10,05**	**9,72**	**1,82**
Juin	**23,04**	**41,73**	**10,39**	**10,44**	**1,89**
Juillet	**21,35**	**40,85**	**10,04**	**10,08**	**1,86**
Août	**13,99**	**37,27**	**9,09**	**9,36**	**1,75**
Septembre	**3,34**	**31,22**	**7,79**	**7,92**	**1,61**
Octobre	**−8,22**	**24,26**	**6,26**	**6,48**	**1,46**
Novembre	**−18,04**	**18,27**	**4,90**	**5,04**	**1,32**
Décembre	**−22,84**	**15,62**	**4,23**	**4,32**	**1,25**

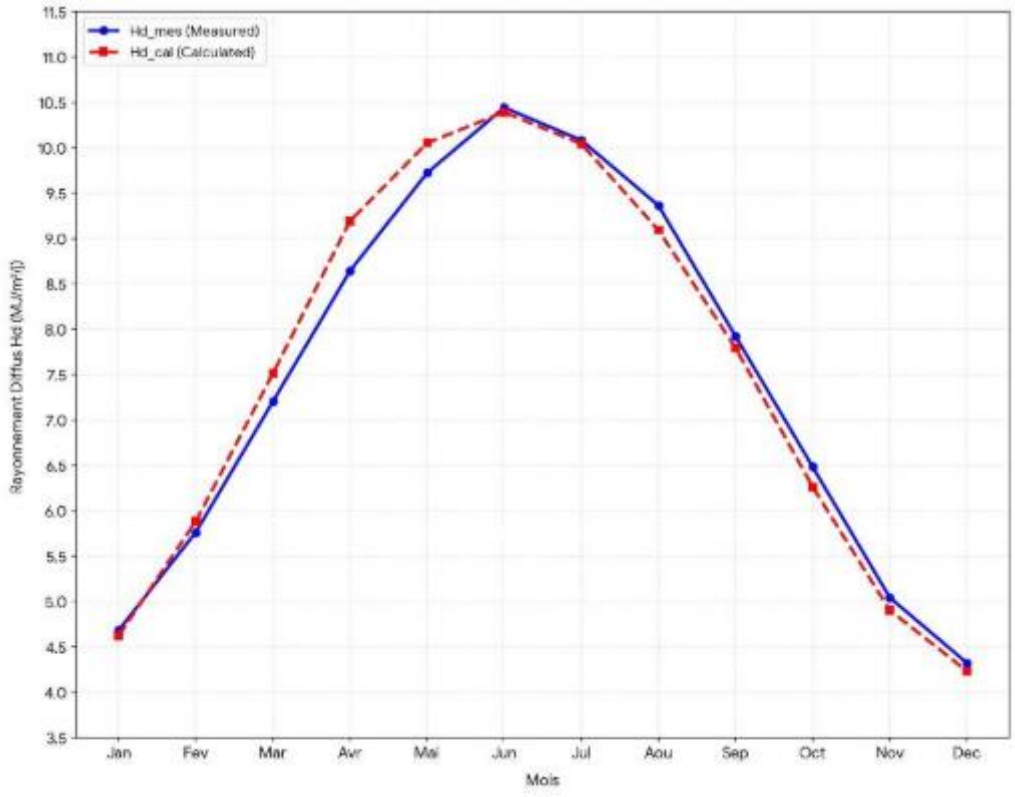


Fig. III.2 — Irradiation estimée vs mesurée à Alger

Le graphe montre une excellente concordance dans l'évolution mensuelle entre les valeurs mesurées et calculées du rayonnement diffus pour la station d'Alger. Les valeurs augmentent progressivement pour atteindre leur maximum en Juin avec 10.44 ($MJ/m^2/j$) pour le mesuré et 10.39 ($MJ/m^2/j$) pour le calculé. En revanche, le minimum est enregistré en Décembre avec 4.32 ($MJ/m^2/j$) pour le mesuré et 4.23($MJ/m^2/j$)) pour le calculé, ce qui confirme la précision du modèle mathématique.

III.3.2 Oran

La station d'Oran a été retenue comme site d'étude en raison de sa situation géographique représentative de la région ouest de l'Algérie. Les données mensuelles du rayonnement solaire diffus calculées et mesurées, présentées dans le tableau suivant, permettent d'évaluer les performances du modèle utilisé et d'analyser les variations saisonnières de ce rayonnement.

Tableau III. 3 — Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station d'Oran

Mois	δ (°)	H_0 (MJ/m²/j)	H_d calculée (MJ/m²/j)	H_d mesurée (MJ/m²/j) [25]	ω_s (rad)
Janvier	−21,27	17,66	4,24	4,32	1,276
Février	−12,61	22,77	5,45	5,40	1,403
Mars	−2,04	29,13	6,82	6,48	1,544
Avril	9,48	35,71	8,32	7,92	1,696
Mai	18,67	39,95	9,20	9,00	1,826
Juin	23,04	41,66	9,58	9,72	1,893
Juillet	21,35	40,83	9,17	9,36	1,866
Août	13,99	37,42	8,42	8,64	1,758
Septembre	3,34	31,60	7,23	7,20	1,614
Octobre	−8,22	24,81	5,74	5,76	1,463
Novembre	−18,04	18,91	4,52	4,68	1,325
Décembre	−22,84	16,28	3,90	3,96	1,251

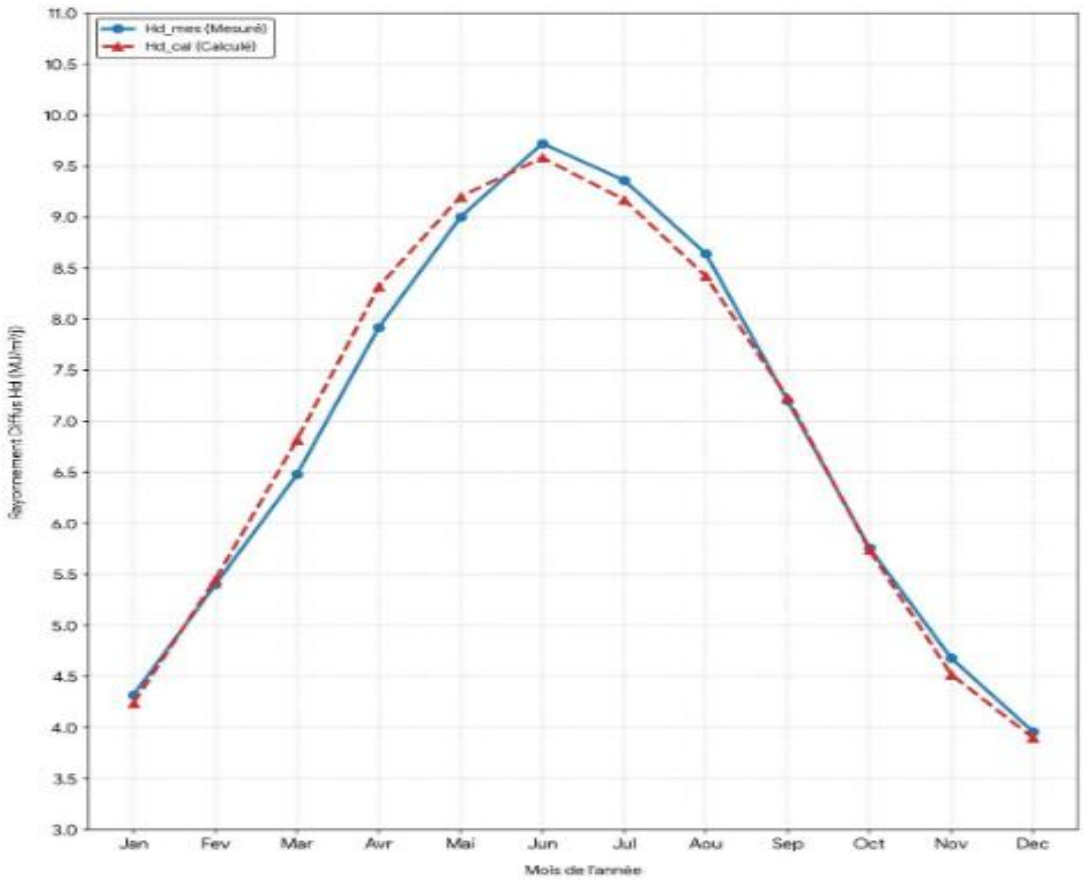


Fig. III.3 — Irradiation estimée vs mesurée à Oran

Le graphe montre une excellente concordance dans l'évolution mensuelle entre les valeurs mesurées et calculées du rayonnement diffus pour la station d'Oran. Les valeurs augmentent progressivement pour atteindre leur maximum en Juin avec 9.72($MJ/m^2/j$) pour le mesuré et 9.58($MJ/m^2/j$) pour le calculé. En revanche, le minimum est enregistré en Décembre avec 3.96 ($MJ/m^2/j$) pour le mesuré et 3.90($MJ/m^2/j$) pour le calculé, ce qui confirme la précision du modèle mathématique utilisé.

III.3.3 Tamanrasset

La station de Tamanrasset a été choisie pour cette étude en raison de sa localisation dans le sud algérien, caractérisé par un fort potentiel solaire. Les valeurs mensuelles du rayonnement solaire diffus calculées et mesurées, présentées dans le tableau suivant, permettent d'examiner l'évolution de ce rayonnement et d'apprécier la précision du modèle adopté.

Tableau III.4 — Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station de Tamanrasset

Mois	δ (°)	H_0 ($MJ/m^2/j$)	H_d calculée ($MJ/m^2/j$)	H_d mesurée ($MJ/m^2/j$) [26]	ω_s (rad)
Janvier	**−21,27**	**25,21**	**3,82**	**3,24**	**1,445**
Février	**−12,61**	**29,645**	**4,16**	**3,96**	**1,519**
Mars	**−2,04**	**33,82**	**4,49**	**5,04**	**1,593**
Avril	**9,48**	**37,72**	**5,78**	**5,76**	**1,664**
Mai	**18,67**	**39,60**	**6,19**	**6,48**	**1,726**
Juin	**23,04**	**40,10**	**7,11**	**6,84**	**1,749**
Juillet	**21,35**	**39,76**	**6,32**	**7,20**	**1,739**
Août	**13,99**	**38,36**	**5,86**	**6,84**	**1,705**
Septembre	**3,34**	**35,21**	**5,82**	**5,76**	**1,643**
Octobre	**−8,22**	**30,69**	**4,70**	**4,68**	**1,561**
Novembre	**−18,04**	**26,18**	**3,71**	**3,60**	**1,470**
Décembre	**−22,84**	**24,03**	**3,56**	**2,88**	**1,431**

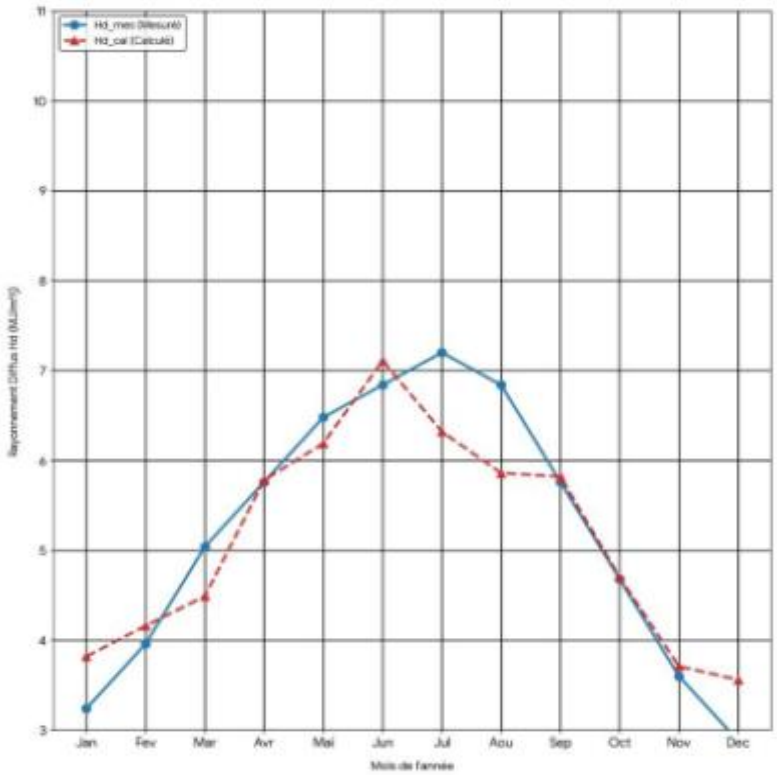


Fig. III.4 — Irradiation estimée vs mesurée à Tamanrasset

Le graphe montre une évolution mensuelle distincte pour la station de Tamanrasset, avec un décalage visible entre les deux courbes qui prouve qu'elles ne sont pas identiques. Le rayonnement diffus réel atteint son maximum en Juillet avec 7.20 $(MJ/m^2/j)$ alors que le modèle calculé anticipe son pic en Juin avec 7.11$(MJ/m^2/j)$ En revanche, le minimum annuel est enregistré en Décembre avec 2.88 $(MJ/m^2/j)$ pour le mesuré et 3.56$(MJ/m^2/j)$ pour le calculé. Ce décalage durant la période estivale s'explique par les spécificités du climat saharien et l'influence de l'écosystème désertique sur la réception des rayonnements.

III.3.4 Bordj Bou Arreridj

La station de Bordj Bou Arreridj a été retenue pour cette étude afin d'analyser le comportement du rayonnement solaire diffus dans les Hauts Plateaux algériens. Les données mensuelles calculées et mesurées présentées dans le tableau suivant permettent de comparer les résultats obtenus et d'évaluer la performance du modèle utilisé.

Tableau III.5 —Valeurs mensuelles calculées et mesurées du rayonnement solaire diffus pour la station de Bordj Bou Arreridj

Mois	δ (°)	H_0 (MJ/m²/j)	H_d calculée (MJ/m²/j)	H_d mesurée (MJ/m²/j) [27]	ω_s (rad)
Janvier	**−21,27**	**17,39**	**4,28**	**4,32**	**1,276**
Février	**−12,61**	**22,53**	**5,50**	**5,40**	**1,403**
Mars	**−2,04**	**28,94**	**7,04**	**6,84**	**1,544**
Avril	**9,48**	**35,61**	**8,59**	**8,28**	**1,696**
Mai	**18,67**	**39,94**	**9,57**	**9,36**	**1,826**
Juin	**23,04**	**41,69**	**9,95**	**10,08**	**1,893**
Juillet	**21,35**	**40,84**	**9,71**	**9,72**	**1,866**
Août	**13,99**	**37,36**	**8,86**	**9,00**	**1,758**
Septembre	**3,34**	**31,44**	**7,52**	**7,56**	**1,614**
Octobre	**−8,22**	**24,59**	**5,93**	**6,12**	**1,463**
Novembre	**−18,04**	**18,65**	**4,57**	**4,68**	**1,325**
Décembre	**−22,84**	**16,01**	**3,94**	**3,96**	**1,251**

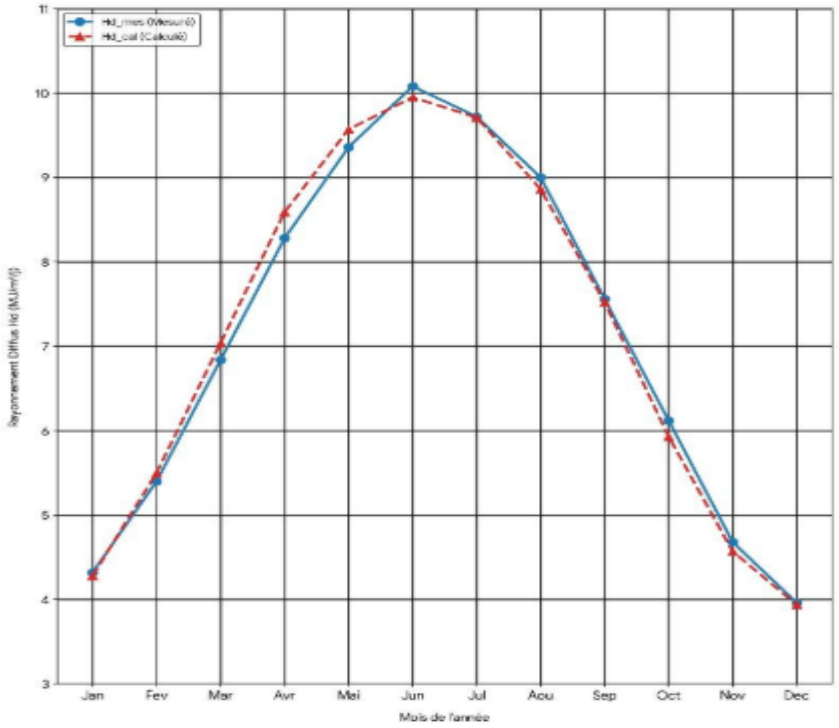


Fig. III.5 — Irradiation estimée vs mesurée à Bordj Bou Arreridj

Le graphe montre une excellente concordance dans l'évolution mensuelle entre les valeurs mesurées et calculées du rayonnement diffus pour la station de Bordj Bou Arreridj. Les valeurs augmentent progressivement pour atteindre leur maximum en Juin avec 10.08(MJ/m²/j) pour le mesuré et 9(MJ/m²/j). pour le calculé. En revanche, le minimum est enregistré en Décembre avec 3.96(MJ/m²/j) pour le mesuré et 3.94(MJ/m²/j) pour le calculé, ce qui confirme la haute précision du modèle mathématique linéaire utilisé.

III.3.5 Résultats comparatifs : Alger, Oran, Tamanrasset vs Bordj Bou Arreridj

La comparaison des résultats pour les quatre sites révèle que la méthode des moindres carrés fournit des estimations de qualité comparable pour Alger, Oran et Bordj Bou Arreridj, dont les profils climatiques méditerranéens et semi-arides sont bien décrits par le modèle linéaire. Tamanrasset présente quant à lui une variabilité plus importante, en raison des particularités du milieu désertique saharien (aérosols, forte irradiation directe). La cohérence des résultats entre les trois sites nordiques confirme la robustesse de la calibration locale par moindres carrés.

III.4 — Analyse des Coefficients a et b

Le tableau suivant synthétise les valeurs des coefficients du modèle d'Angström-Prescott obtenus par la méthode des moindres carrés pour les quatre sites, ainsi que les RMSE correspondants :

Tableau III.6 — comparaison des coefficients a et b d'Angström-Prescott et des RMSE pour les sites d'étude

Site	Coefficient a	Coefficient b	RMSE	Climat
Alger	**−0,0738**	**0,3042**	**3,19**	**Méditerranéen**
Oran	**−0,0447**	**0,2612**	**2,85**	**Semi-aride**
Tamanrasset	**−0,3020**	**0,3857**	**9,69**	**Désertique**
B.B. Arreridj	**−0,0167**	**0,2517**	**2,14**	**Semi-aride continentale.**

Les coefficients d'Angström-Prescott obtenus pour les différentes stations mettent en évidence l'influence du climat local sur le comportement du rayonnement solaire diffus. Alger, caractérisée par un climat méditerranéen, présente des coefficients a = -0,0738 et b = 0,3042. Oran, de climat semi-aride, affiche des valeurs a = -0,0447 et b = 0,2612. Bordj Bou Arreridj, située dans une région semi-aride continentale, présente des coefficients a = -0,0167 et b = 0,2517. En revanche, Tamanrasset, caractérisée par un climat désertique, se distingue par un coefficient a plus négatif (a = -0,3020) et la valeur la plus élevée de b (b = 0,3857), traduisant l'influence des conditions atmosphériques sahariennes. Les valeurs de RMSE obtenues confirment globalement la bonne performance du modèle d'Angström-Prescott pour l'estimation du rayonnement solaire diffus dans les sites étudiés.

III.5 — Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre valident l'approche méthodologique adoptée. Le modèle d'Angström-Prescott, calibré par la méthode des moindres carrés, fournit des estimations satisfaisantes pour les quatre sites étudiés. L'ajout de Bordj Bou Arreridj à l'étude confirme la représentativité des Hauts Plateaux orientaux et enrichit la base de données radiométrique algérienne. Ces résultats ouvrent la voie à une extension de la modélisation à d'autres wilayas algériennes.

CONCLUSION
GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail a été consacré à l'étude et à l'estimation du rayonnement solaire diffus pour quelques sites représentatifs du territoire algérien. Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des ressources énergétiques renouvelables et de l'amélioration des méthodes d'évaluation du potentiel solaire, élément essentiel pour le dimensionnement et l'optimisation des systèmes énergétiques solaires.

Dans un premier temps, les notions fondamentales relatives au rayonnement solaire, à ses composantes ainsi qu'aux phénomènes atmosphériques influençant sa propagation ont été présentées. Les paramètres astronomiques et géométriques intervenant dans le calcul du rayonnement solaire ont également été étudiés afin de mieux comprendre les mécanismes qui régissent la disponibilité de l'énergie solaire à la surface terrestre.

L'étude a porté sur quatre sites algériens présentant des caractéristiques climatiques différentes : Alger, Oran, Bordj Bou Arreridj et Tamanrasset. L'analyse des données disponibles a permis de mettre en évidence l'influence des conditions géographiques et météorologiques sur la variation du rayonnement solaire et de ses différentes composantes.

Le modèle empirique d'Angström-Prescott a été utilisé pour l'estimation du rayonnement solaire à partir de la fraction d'insolation. Les coefficients du modèle ont été déterminés par la méthode des moindres carrés, permettant d'obtenir un ajustement satisfaisant entre les valeurs calculées et les données expérimentales. Les résultats obtenus montrent que cette méthode constitue un outil simple, efficace et adapté à l'estimation du rayonnement solaire dans les régions étudiées.

Par ailleurs, l'étude confirme l'importance du potentiel solaire dont dispose l'Algérie, notamment dans les régions sahariennes où les niveaux d'irradiation sont particulièrement élevés tout au long de l'année. Ce potentiel représente un atout majeur pour le développement des technologies photovoltaïques et thermiques ainsi que pour la transition énergétique du pays.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étendre cette étude à un nombre plus important de stations météorologiques, d'intégrer d'autres paramètres climatiques tels que la température, l'humidité relative et la nébulosité, et d'explorer l'utilisation de techniques avancées de modélisation afin d'améliorer davantage la précision des estimations du rayonnement solaire.

En conclusion, ce travail a permis de mettre en évidence l'intérêt des modèles empiriques dans l'estimation du rayonnement solaire et a confirmé l'efficacité de la méthode des moindres

carrés pour la détermination des paramètres du modèle d'Angström-Prescott appliqué aux conditions climatiques algériennes.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Hanène, M., Modélisation et simulation des performances des panneaux solaires photovoltaïques sous Matlab/Simulink, Mémoire de Master, Université Constantine 1, Constantine, Algérie, 2021.

[2] Capderou, M., Atlas Solaire de l'Algérie : Modèles Théoriques et Mesures Expérimentales. Alger, Algérie : Office des Publications Universitaires (OPU), 1988.

[3] Amani, B., Modélisation du rayonnement solaire global et diffus par les approches empiriques, Mémoire de Master, Université d'Oran, Oran, Algérie, 2023.

[4] Faiza, M., Estimation du rayonnement solaire par modèles empiriques : Application à la région de Mostaganem, Mémoire de Magister, Université de Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 2013.

[5] Angström, A., "Solar and terrestrial radiation," Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 50, no. 210, pp. 121–126, 1924.

[6] Ricaud, A., Gisement solaire et transferts énergétiques. Paris, France : Éditions Technip, 2011.

[7] Benkacial, S., Étude de la structure interne du Soleil et transfert de rayonnement, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, Algérie, 2018.

[8] Şen, Z., Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. London, UK : Springer, 2008.

[9] Duffie, J. A. and Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed. Hoboken, NJ, USA : John Wiley & Sons, 2013.

[10] Clayton, D. D., Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis. Chicago, IL, USA : University of Chicago Press, 1983.

[11] Kippenhahn, R., Weigert, A. and Weiss, A., Stellar Structure and Evolution, 2nd ed. Berlin, Germany : Springer, 2012.

[12] Gueymard, C. A., “The Sun’s Total and Spectral Irradiance for Solar Energy Applications and Solar Radiation Models,” Solar Energy, vol. 76, no. 4, pp. 423–453, 2004.

[13] Liou, K. N., An Introduction to Atmospheric Radiation, 2nd ed. San Diego, CA, USA : Academic Press, 2002.

[14] Salby, M. L., Physics of the Atmosphere and Climate. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2012.

[15] Kasten, F. and Young, A. T., “Revised optical air mass tables and approximation formula,” Applied Optics, vol. 28, no. 22, pp. 4735–4738, 1989.

[16] Coakley, J. A. and Yang, P., Atmospheric Transmission and Radiative Transfer. Weinheim, Germany : Wiley-VCH, 2014.

[17] Meeus, J., Astronomical Algorithms, 2nd ed. Richmond, VA, USA : Willmann-Bell, 1998.

[18] Iqbal, M., An Introduction to Solar Radiation. New York, NY, USA : Academic Press, 1983.

[19] Page, J. K., “The Estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation from Sunshine Records,” Proceedings of the United Nations Conference on New Sources of Energy, vol. 4, pp. 378–390, 1961.

[20] World Meteorological Organization (WMO), Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, WMO-No. 8. Geneva, Switzerland, 2018.

[21] Office National de la Météorologie (ONM), Données radiométriques et climatiques des stations algériennes. Alger, Algérie, 2022.

[22] Klein, S. A., “Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces,” Solar Energy, vol. 19, no. 4, pp. 325–329, 1977.

[23] Stone, R. J., “Improved Statistical Procedure for the Evaluation of Solar Radiation Estimation Models,” Solar Energy, vol. 51, no. 4, pp. 289–291, 1993.

[24] NASA POWER. (2020). Données de l'irradiation solaire diffuse à surface (ALLSKY_SFC_SW_DIFF) pour la région d'Alger (Lat: 36.43, Lon: 3.15) sur la

période 1990-2020. Base de données NASA/POWER Project. Disponible sur : nasa.go

[25] NASA POWER. (2020). Données de l'irradiation solaire diffuse à surface (ALLSKY_SFC_SW_DIFF) pour la région d'Oran (Lat: 35.63, Lon: -0.38) sur la période 1990-2020. Base de données NASA/POWER Project. Disponible sur : nasa.gov3.

[26]NASA POWER. (2020). Données de l'irradiation solaire diffuse à surface (ALLSKY_SFC_SW_DIFF) pour la région de Tamanrasset (Lat: 22.47, Lon: 5.53) sur la période 1990-2020. Base de données NASA/POWER Project. Disponible sur : nasa.gov4

[27] NASA POWER. (2020). Données de l'irradiation solaire diffuse à surface (ALLSKY_SFC_SW_DIFF) pour la région de Bordj Bou Arréridj (Lat: 36.07, Lon: 4.76) sur la période 1990-2020. Base de données NASA/POWER Project. Disponible sur : nasa.gov


RÉSUMÉ

RÉSUMÉ

Ce mémoire de Master en Physique Énergétique et Énergies Renouvelables porte sur la modélisation de l'irradiation solaire diffuse dans quatre villes algériennes représentatives : Alger, Oran, Tamanrasset et Bordj Bou Arreridj. L'Algérie, dont 86 % du territoire est saharien, dispose d'un potentiel solaire exceptionnel atteignant 3 500 heures d'ensoleillement par an dans le Sud.

Le modèle empirique d'Angström-Prescott adapté au rayonnement diffus est utilisé pour estimer l'irradiation diffuse à partir de la durée d'ensoleillement mesurée. Ses coefficients locaux (a, b) sont calibrés par la méthode des moindres carrés (MMC), appliquée à des données météorologiques représentatives. Le code MATLAB développé permet de déterminer les coefficients optimaux du modèle et d'évaluer ses performances.

Le modèle calibré fournit de bonnes estimations pour Alger (RMSE = 3,19 %), Bordj Bou Arreridj (RMSE = 2,14 %) et Oran (RMSE = 2,85 %). Tamanrasset présente une erreur plus élevée (RMSE = 9,69 %), en raison des particularités atmosphériques du milieu saharien. Les coefficients obtenus varient selon les sites étudiés, avec des valeurs de a comprises entre -0,3020 et -0,0167 et des valeurs de b comprises entre 0,2517 et 0,3857.

Mots clés : Angström-Prescott, moindres carrés, rayonnement solaire diffus, Algérie, MATLAB.

ملخص:

تتناول هذه المذكرة لنيل شهادة الماستر في فيزياء الطاقة والطاقات المتجددة نمذجة الإشعاع الشمسي المنتشر في أربع مدن جزائرية تمثل مناطق مناخية مختلفة، وهي: الجزائر العاصمة، وهران، تمنراست، وبرج بوعريريج. تتمتع الجزائر بإمكانات شمسية استثنائية، إذ تصل مدة التشميس في الجنوب الصحراوي إلى حوالي 3500 ساعة سنوياً، كما أن ما يقارب 86٪ من مساحة البلاد يقع ضمن المجال الصحراوي.

يُستخدم نموذج أنغستروم–بريسكوت المعدل للإشعاع المنتشر لتقدير الإشعاع انطلاقاً من مدة التشميس المقاسة. وتمت معايرة معاملاته المحلية a) و (b باستعمال طريقة المربعات الصغرى، كما تم تطوير برنامج باستخدام MATLAB لتحديد معاملات النموذج وتقييم أدائه في مختلف المواقع المدروسة.

أعطى النموذج المعاير نتائج مرضية لكل من الجزائر العاصمة(RMSE = 3.19 ٪)، وبرج بوعريريج(RMSE = 2.14 ٪)، ووهران(RMSE = 2.85 ٪)، في حين سجلت تمنراست قيمة أعلى للخطأ(RMSE = 9.69 ٪) (بسبب الخصائص المناخية والجوية المميزة للوسط الصحراوي. وقد تراوحت قيم المعامل a بين -0.3020 و -0.0167، بينما تراوحت قيم المعامل b بين 0.2517 و0.3857، مما يعكس الاختلافات المناخية بين المناطق المدروسة.

الكلمات المفتاحية: أنغستروم–بريسكوت، طريقة المربعات الصغرى، الإشعاع الشمسي المنتشر، الجزائر

Abstract :

This Master's thesis in Energy Physics and Renewable Energies focuses on modeling diffuse solar irradiation across four representative Algerian cities: Algiers, Oran, Tamanrasset, and Bordj Bou Arreridj. Algeria benefits from an exceptional solar resource, with up to 3,500 sunshine hours per year in the Saharan south, which covers about 86% of the national territory. The Angström-Prescott empirical model adapted to diffuse solar radiation is used to estimate diffuse irradiation from measured sunshine duration. Its local coefficients (a, b) are calibrated using the Least Squares Method (LSM). A MATLAB program was developed to determine the optimal model coefficients and evaluate its performance for each study site. The calibrated model provides satisfactory estimates for Algiers (RMSE = 3.19%), Bordj Bou Arreridj (RMSE = 2.14%), and Oran (RMSE = 2.85%). Tamanrasset shows a higher error (RMSE = 9.69%) due to the specific atmospheric conditions of the Saharan environment. The obtained coefficients vary according to the site, with a values ranging from -0.3020 to -0.0167 and b values ranging from 0.2517 to 0.3857.

Key Word : Angström-Prescott, Least Squares Method, Diffuse Solar Radiation, Algeria.