

SYSTEMES DE CONVERSION DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE ET EOLIENNE

Dr. BENTATA Khadidja

1.0 26/03/2026

Table des matières

I - CHAPITRE I : Rayonnement solaire	3
1. Définition et composition.....	3
2. Quantité de rayonnement solaire et facteurs de variation	4
2.1. Facteurs astronomiques.....	4
2.2. Facteurs atmosphériques.....	6
2.3. Facteurs géographiques et topographiques.....	8
2.4. Facteurs environnementaux secondaires	9
2.5. Tableau de synthèse des facteurs.....	10
2.6. Stratégie pratique d'optimisation (cas de Sétif).....	10
Glossaire	11
Abréviations	13
Références	14
Nomenclature	15

CHAPITRE I : Rayonnement solaire

1. Définition et composition

Le *rayonnement solaire** désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil, couvrant les domaines ultraviolet (10–400 nm), visible (400–700 nm) et infrarouge (700 nm–1 mm).

Pour les technologies photovoltaïques, seule une partie de ce spectre est convertie en électricité : le silicium cristallin, par exemple, est sensible entre environ 300 nm et 1200 nm, avec un maximum dans le visible et le proche infrarouge. La compréhension de cette **adéquation spectrale*** est essentielle pour interpréter les performances des modules selon les conditions d'ensoleillement.

C'est un flux d'énergie indispensable à la vie terrestre, qui fournit chaleur, lumière et énergie à la photosynthèse, tout en commandant une grande partie de la dynamique climatique via l'absorption atmosphérique et les cycles orbitaux (notamment les cycles de Milankovitch).

La *constante solaire** moyenne au sommet de l'atmosphère est d'environ 1366 W/m². Cette valeur connaît une très faible variation (~0,1 %) sur les cycles d'activité solaire de 11 ans, négligeable devant les autres facteurs de variabilité. L'*irradiance** maximale au sol atteint typiquement ~1000 W/m² par temps clair et pour un Soleil proche du zénith.

Entre le sommet de l'atmosphère et la surface, les processus d'absorption et de diffusion réduisent donc significativement le flux disponible pour les systèmes photovoltaïques.[1]
[1]*,[2][2]*,[3][3]*

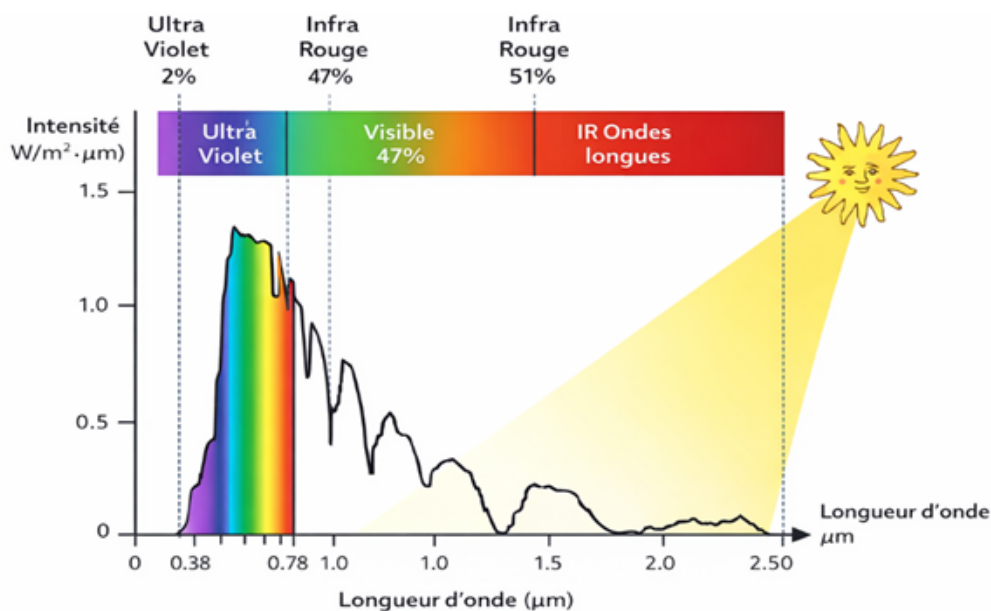


Fig1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde

2. Quantité de rayonnement solaire et facteurs de variation

La quantité de *rayonnement solaire** qui parvient à la surface terrestre n'est pas constante : elle varie selon le temps (heure, saison, année) et selon le lieu (latitude, altitude, environnement local).

Ces variations résultent de l'action combinée de *facteurs astronomiques**, *atmosphériques**, *géographiques** et environnementaux, dont certains sont purement subis, tandis que d'autres peuvent être partiellement compensés par le dimensionnement et la conception des installations photovoltaïques.

On notera dans la suite G^{**} l'*irradiance solaire** (en W/m^2) et H^{**} l'*irradiation** (en Wh/m^2 ou kWh/m^2) intégrée sur une période donnée (heure, jour, année).

L'objectif de l'ingénieur photovoltaïque est de comprendre comment chaque groupe de facteurs modifie G^{**} et H^{**} , afin d'identifier les marges de manœuvre disponibles pour l'optimisation des systèmes [1], [3]^{[3]*}, [4]^{[4]*}.

2.1. Facteurs astronomiques

Les *facteurs astronomiques** sont liés à la mécanique céleste du système *Terre–Soleil**. Ils déterminent le flux énergétique « disponible » au sommet de l'atmosphère et la distribution angulaire du rayonnement [1]^{[1]*}, [2]^{[2]*}, [4]^{[4]*}.

a) Distance Terre–Soleil

La Terre décrit une orbite elliptique, ce qui fait varier légèrement sa distance au Soleil au cours de l'année, entre le périhélie (environ 147 millions de kilomètres, en janvier) et l'aphélie (environ 152 millions de kilomètres, en juillet).

Cette variation entraîne une modulation de l'irradiance extraterrestre de l'ordre de 3 à 7 % entre les extrêmes. Cette variation est systématiquement prise en compte dans les modèles de rayonnement (par exemple via la correction de la *constante solaire**).

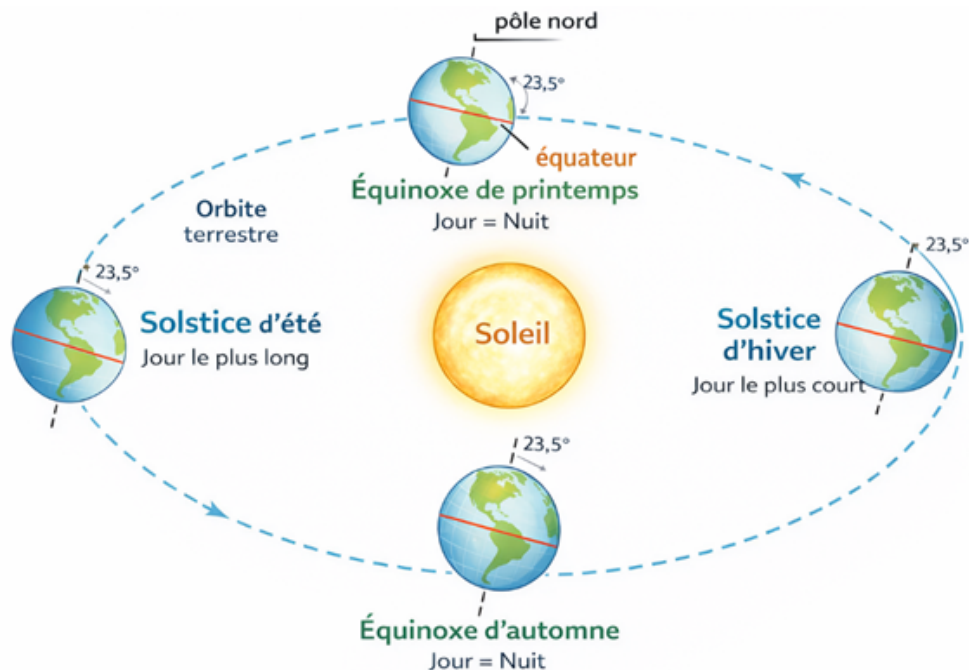


Fig 2 : Configuration saisonnière de la Terre autour du Soleil

b) Déclinaison solaire

La *déclinaison solaire** δ * varie entre $-23,5^\circ$ et $+23,5^\circ$ au cours de l'année, en raison de l'inclinaison de l'axe terrestre sur le plan de l'écliptique.

Cette variation conditionne le trajet apparent du Soleil dans le ciel, la hauteur solaire maximale à midi et la durée du jour, et conduit à des différences saisonnières pouvant atteindre $\pm 50\%$ sur l'*irradiation** journalière entre été et hiver à latitudes moyennes.

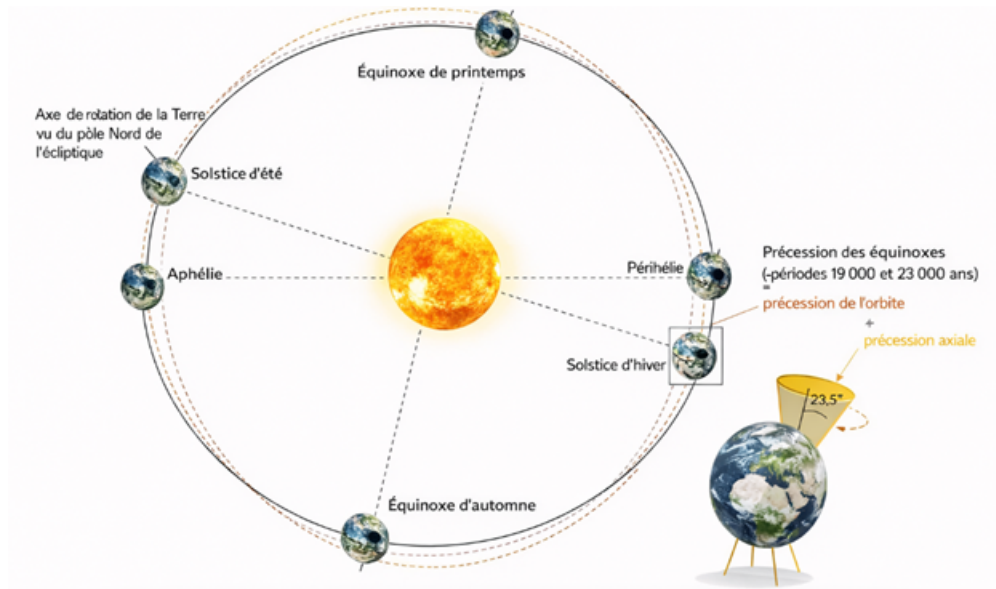


Fig 3 : Mouvement orbital de la Terre et phénomènes saisonniers (solstices, équinoxes et précession)

c) Angle zénithal et angle d'incidence

L'*angle zénithal** θ_z * (ou, de manière équivalente, l'angle d'incidence des rayons sur un plan donné) joue un rôle central. Il est directement lié à la *masse d'air** (Air Mass, AM) qui quantifie l'épaisseur d'atmosphère traversée. Pour un Soleil au zénith, $AM = 1$; pour un *angle zénithal** de 60° , $AM \approx 2$. Plus cet angle est faible (Soleil haut dans le ciel), plus le chemin optique dans l'atmosphère est court et plus l'irradiance directe est élevée.

À l'inverse, lorsque le Soleil est bas sur l'horizon (hiver, matin, soir), la colonne d'air traversée est plus longue, ce qui peut réduire l'irradiance directe de 50 % ou davantage par rapport à une situation de Soleil proche du zénith.

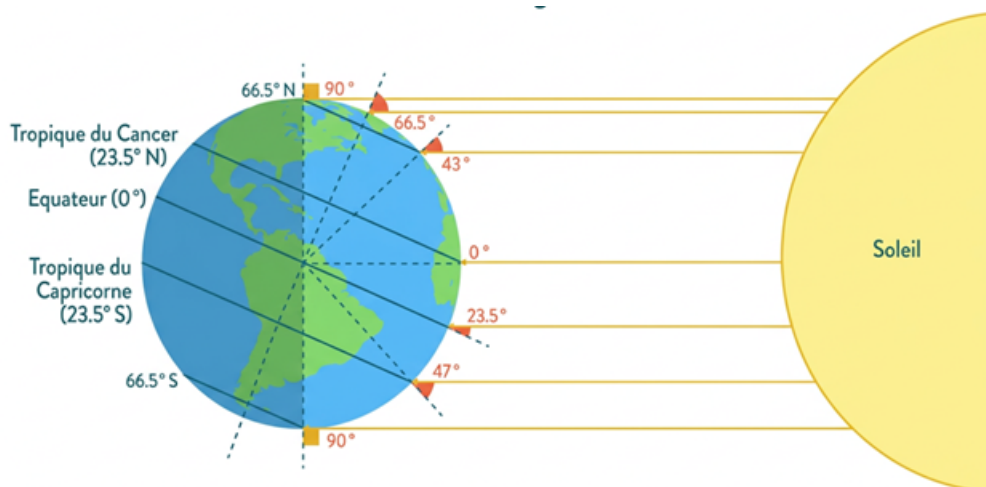


Fig 4 : Portion des ondes solaires atteignant la Terre en fonction de la latitude.

2.2. Facteurs atmosphériques

Les *facteurs atmosphériques** contrôlent la part du rayonnement extraterrestre qui est effectivement transmise jusqu'au sol, via des processus d'absorption, de diffusion et de réflexion [1]^{[1]*}, [2]^{[2]*}, [5]^{[5]*}, [6]^{[6]*}.

a) Transparence de l'atmosphère

La présence de nuages, d'aérosols, de poussières, de vapeur d'eau et de polluants peut absorber ou diffuser une fraction très importante du rayonnement incident.

Dans les cas extrêmes, jusqu'à 70 % du flux peut être perdu, alors qu'un ciel clair permet, autour de midi solaire, d'atteindre typiquement des valeurs proches de 1000 W/m² au niveau du sol.

La *masse d'air** intervient aussi ici : les conditions standards de mesure des modules photovoltaïques sont définies pour $AM^* = 1,5$ (ciel clair, hauteur solaire de 41,8°).

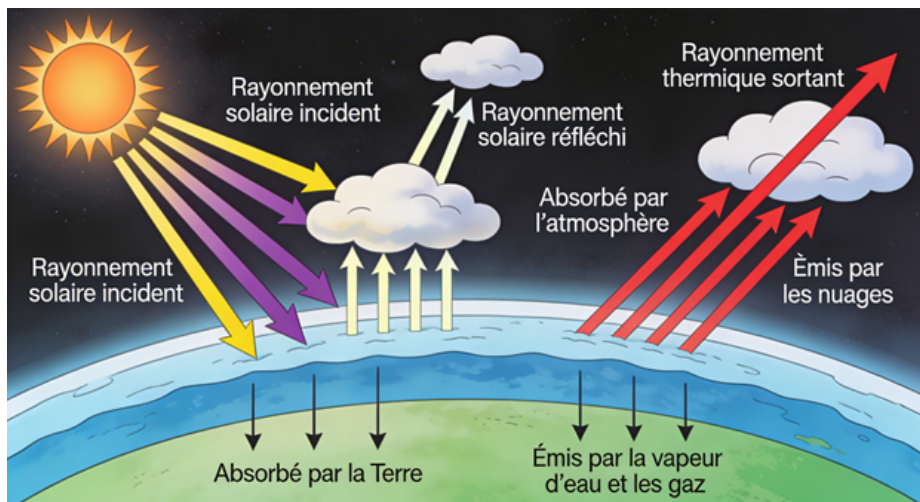


Fig 5 : Bilan radiatif de la Terre et de l'atmosphère

b) Durée d'ensoleillement

La *durée quotidienne d'ensoleillement** dépend essentiellement de la *déclinaison solaire** et de la latitude du site.

En été, elle peut atteindre environ 16 heures à des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, ce qui augmente l'*irradiation** journalière reçue de 30 à 50 % par rapport aux jours d'hiver les plus courts.

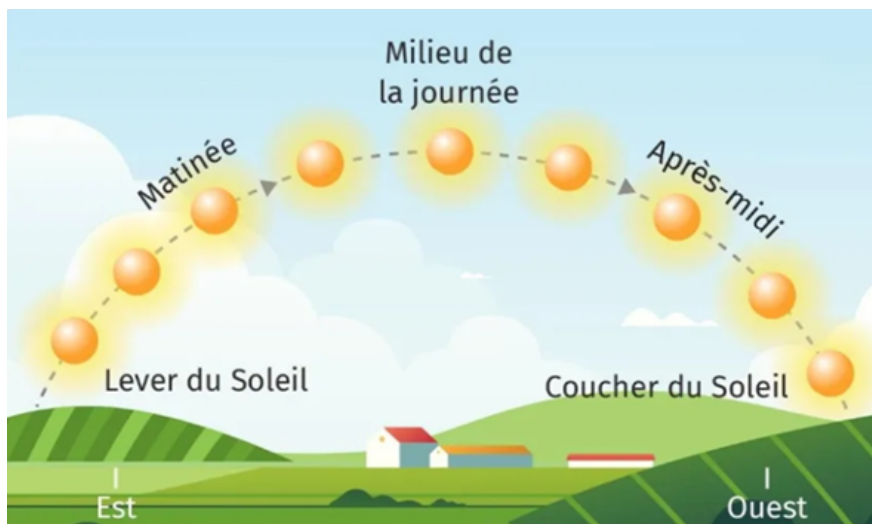


Fig 6 : Trajectoire apparente du Soleil au cours de la journée

c) Albédo de la surface terrestre

L'*albédo** est le taux de réflexion du rayonnement par la surface : il varie d'environ 5 % pour les océans jusqu'à 80–95 % pour la neige fraîche.

Ce rayonnement réfléchi contribue à la composante diffuse, particulièrement importante pour les *modules bifaciaux**. Pour ces derniers, l'*albédo** effectif dépend aussi de la hauteur des modules, de leur inclinaison et du caractère directionnel de la réflexion. Il peut être estimé par des bases de données (p. ex. *MODIS**) ou des mesures in situ.

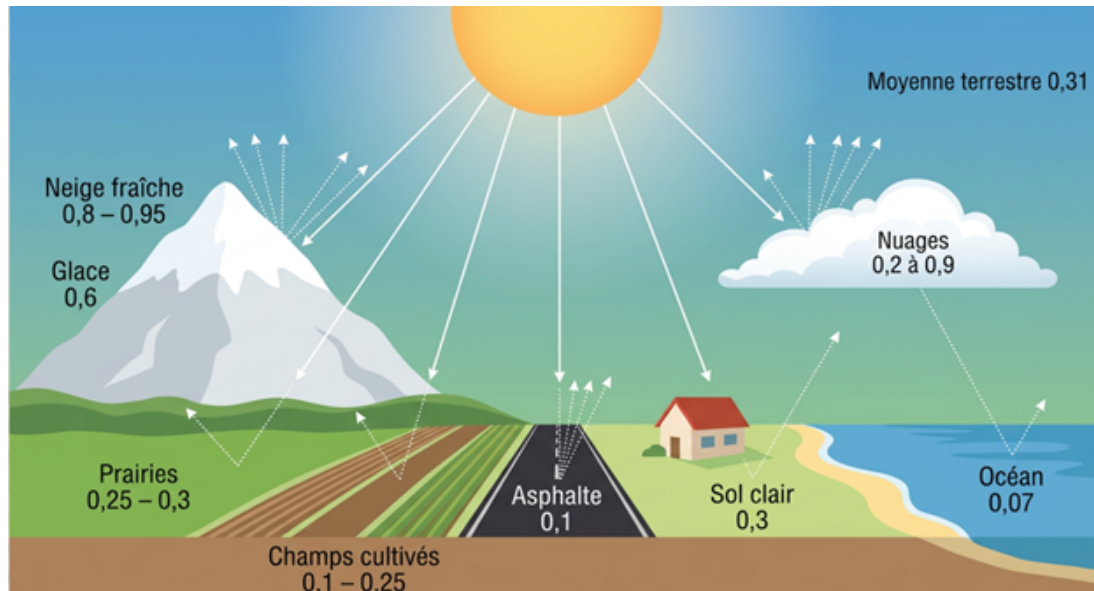


Fig 7 : Albédo des différentes surfaces terrestres et moyenne globale

2.3. Facteurs géographiques et topographiques

Les *facteurs géographiques* *définissent le « *potentiel solaire** » intrinsèque d'un site, tandis que la topographie locale modifie la manière dont le rayonnement interagit avec la surface [1]^[7]*, [3]^[3]*, [7]^[7]*.

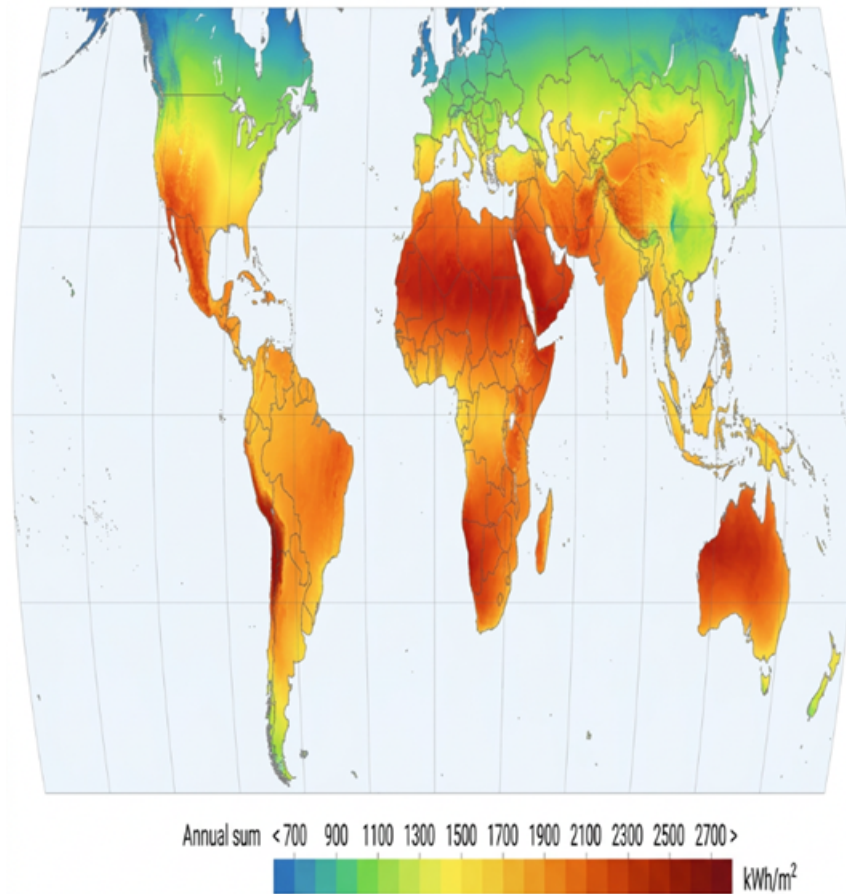


Fig 8 : Carte mondiale de l'irradiation solaire globale annuelle (GHI)

a) Latitude

L'*irradiation solaire** annuelle est maximale près de l'équateur, avec des valeurs typiques de l'ordre de 4 à 5 kWh/m²/jour, et diminue progressivement vers les pôles.

Aux hautes latitudes, la combinaison de jours courts en hiver et de hauteurs solaires faibles peut réduire l'*irradiation** annuelle de près de 90 % par rapport à celle de l'équateur.

b) Altitude

Avec l'altitude, l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires diminue, ce qui se traduit par une augmentation de l'irradiance directe.

On observe couramment un gain d'environ 10 % par 1000 mètres d'altitude, ce qui rend les sites en montagne particulièrement favorables à certaines applications photovoltaïques.

c) Pente et orientation du terrain

L'orientation d'un versant par rapport au Soleil modifie fortement le rayonnement reçu.

Dans l'hémisphère Nord, les versants orientés vers le sud peuvent recevoir 20 à 30 % de rayonnement supplémentaire par rapport aux versants orientés au nord, ce qui explique l'intérêt de privilégier les pentes sud pour l'implantation de générateurs solaires.

d) Nature du sol et couverture végétale

Les surfaces sombres et végétalisées, comme les forêts denses, présentent un *albédo** faible et absorbent une grande partie du rayonnement, réduisant le flux réfléchi disponible pour les modules.

À l'inverse, les sols clairs (sables, surfaces rocheuses claires, neige) offrent un *albédo** plus élevé (30–40 % ou plus), particulièrement intéressant pour les installations *bifaciales** qui valorisent cette réflexion supplémentaire.

2.4. Facteurs environnementaux secondaires

*Facteurs environnementaux secondaires** : Les facteurs dits « secondaires » peuvent, en pratique, avoir un impact notable sur la performance des systèmes photovoltaïques, surtout en climat désertique ou urbain.[3,7,8]^{[3]*}

a) Poussière et pollution

Dans les régions désertiques ou fortement polluées, la présence de poussière en suspension et de particules fines dans l'air réduit l'irradiance reçue par diffusion et absorption.

En complément, le dépôt progressif de poussière sur la surface des modules peut diminuer l'énergie produite de 10 à 45 %, ce qui impose des stratégies de nettoyage adaptées. Une approche courante consiste à suivre la dégradation du courant de court-circuit et à déclencher un lavage lorsque la perte dépasse un seuil (par exemple 5–10 %).

b) Humidité et vent

La vapeur d'eau atmosphérique absorbe préférentiellement dans l'infrarouge. Cette absorption affecte peu l'irradiance utile aux modules silicium (qui captent mal l'infrarouge lointain), mais peut avoir un effet indirect en modifiant l'encrassement ou en favorisant la corrosion.

Le vent joue un rôle ambivalent : il peut contribuer à dépolluer les surfaces et à limiter la surchauffe des modules, mais il peut aussi transporter davantage de particules et accélérer l'encrassement dans certaines configurations.

Pour quantifier l'impact combiné de ces paramètres sur le rayonnement global, direct et diffus reçu par un plan horizontal ou incliné, on recourt à des modèles de ciel clair et de ciel réel :

- **Modèles de ciel clair*** (Bird, REST2) : estiment l'irradiance en l'absence de nuages.
- **Modèles de ciel réel*** (Perez, Skartveit & Olseth) : transforment les valeurs de ciel clair en conditions réelles à l'aide d'indices de clarté ou de données de nébulosité.

2.5. Tableau de synthèse des facteurs

Le tableau suivant récapitule les principaux facteurs de variabilité du *rayonnement solaire**, leur ordre de grandeur et les leviers d'action possibles.[9]^[9]*

Catégorie	Facteur	Effet sur l'irradiation	Amplitude typique	Échelle de temps	Principales actions possibles
Astronomiques	Distance Terre-Soleil	Modulation $\pm 3-7\%$ entre périhélie et aphélie	$\approx 6,7\%$	Annuelle	Aucun contrôle, à intégrer dans les modèles
	Déclinaison solaire	Variation saisonnière pouvant atteindre $\pm 50\%$ (été/hiver)	$\pm 23,5^\circ$	Annuelle	Inclinaison saisonnière ou suiveurs solaires
	Angle zénithal	Irradiance divisée par ≈ 2 entre été et hiver	$0-80^\circ$	Quotidienne	Orientation et suivi solaire optimisés
Atmosphériques	Transparence atmosphérique	Pertes pouvant aller jusqu'à 70% (nuages, poussières)	Très variable	Quotidienne	Choix du site, suivi météo, nettoyage régulier
	Durée d'ensoleillement	Gain de $30-50\%$ en été sur l'irradiation journalière	$\approx 8-16$ h	Annuelle	Orientation optimale, gestion de la demande
	Albédo terrestre	Contribution diffuse supplémentaire de $+5$ à 40%	$5-95\%$	Saisonnière	Utilisation de modules bifaciaux, choix du sol
Géographiques	Latitude	Diminution pouvant atteindre 90% vers les pôles	$0-60^\circ$ (ou plus)	Permanente	Sélection de sites à bon potentiel solaire
	Altitude	Gain d'environ $+10\%$ par 1000 m	$+1000$ m	Permanente	Valorisation des sites élevés
	Orientation du terrain	Gain de $20-30\%$ pour versant sud (HN)	Variable	Permanente	implantation sur versants sud/privilégiés
Environnementaux	Poussière/Pollution	Pertes de l'ordre de $10-45\%$	Variable	Quotidienne	Nettoyage, revêtements anti-salissures
	Humidité/Vent	Impact de quelques pourcents sur l'irradiance IR	Variable	Quotidienne	Conception aérée, surveillance des conditions

2.6. Stratégie pratique d'optimisation (cas de Sétif)

En contexte algérien, et plus spécifiquement pour un site comme Sétif, où l'**irradiation* globale annuelle** est élevée mais où la poussière et la sécheresse constituent des contraintes majeures, certains leviers apparaissent prioritaires [1]^[1]*, [7]^[7]*, [8]^[8]*, [10]^[10]*.

Votre synthèse peut se résumer ainsi :

Facteur prioritaire	Action immédiate recommandée	Gain attendu
Poussière	Nettoyage régulier des modules ($\approx$ tous les 15 jours)	$\approx +30\%$ d'énergie produite
Inclinaison	Inclinaison fixe optimisée autour de $33-36^\circ$	$\approx +25\%$
Orientation	Orientation plein sud (azimut $\approx 0^\circ$ par rapport au sud géographique)	$\approx +15\%$
Albédo (bifaciaux)	Utilisation de modules bifaciaux sur sol sableux ou réfléchissant	$\approx +20\%$

Ces ordres de grandeur fournissent une base claire pour relier la théorie du *rayonnement solaire** à des décisions concrètes de conception et d'exploitation des systèmes photovoltaïques dans la région de Sétif et, plus largement, dans les climats semi-arides et désertiques.

Glossaire

Adéquation spectrale

correspondance entre le spectre solaire incident et la sensibilité spectrale du matériau photovoltaïque (silicium cristallin ici).¹

Albédo

taux de réflexion du rayonnement par une surface, typiquement 5% pour océans, jusqu'à 80–95% pour la neige fraîche.

Angle zénithal θ_z

angle entre la direction du Soleil et la verticale locale, lié directement à la masse d'air.

Constante solaire

flux moyen d'énergie solaire au sommet de l'atmosphère, $\approx 1366 \text{ W/m}^2$.

Déclinaison solaire δ

angle entre le plan de l'équateur et la direction du Soleil, variant entre $-23,5^\circ$ et $+23,5^\circ$.

Distance Terre–Soleil (périhélie/aphélie)

variation saisonnière de la distance Terre–Soleil modifiant l'irradiance extraterrestre de 3 à 7%.

Durée d'ensoleillement

temps journalier durant lequel le Soleil est au-dessus de l'horizon.

Facteurs astronomiques

facteurs liés à la mécanique Terre–Soleil (distance, déclinaison, angle zénithal) qui déterminent le flux disponible au sommet de l'atmosphère.

Facteurs atmosphériques

phénomènes d'absorption, diffusion, réflexion dans l'atmosphère qui modulent le rayonnement reçu au sol.

Facteurs environnementaux secondaires

poussière, pollution, humidité, vent, influençant surtout l'encrassement et la température des modules.

Facteurs géographiques et topographiques

latitude, altitude, pente et orientation du terrain qui conditionnent l'irradiation reçue.

Irradiance solaire G

puissance radiative reçue par unité de surface (W/m^2).

Irradiation globale annuelle (GHI)

irradiation solaire globale sur un plan horizontal intégrée sur l'année.

Irradiation H

énergie radiative reçue par unité de surface sur une période donnée (Wh/m^2 ou kWh/m^2).

Masse d'air (Air Mass, AM)

épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement, $AM = 1$ au zénith, $AM \approx 2$ pour $\theta_z = 60^\circ$.

Modèles de ciel clair (Bird, REST2)

modèles estimant l'irradiance en absence de nuages.

Modèles de ciel réel (Perez, Skartveit & Olseth)

modèles transformant les valeurs de ciel clair en conditions réelles à partir d'indices de clarté ou de nébulosité.

Modules bifaciaux

modules photovoltaïques capables de capter le rayonnement sur leurs deux faces, valorisant fortement le rayonnement réfléchi (albédo).

Potentiel solaire d'un site

quantité d'irradiation annuelle liée principalement à la latitude, l'altitude et la topographie locale.

Rayonnement solaire

ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil, couvrant UV, visible et infrarouge.

Abréviations

MODIS : (base de données satellitaire) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, utilisée ici comme base de données d'albédo

¹. <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/attachments/149186876/c90dc6f4-0f47-4800-aafe-d3fef4913349/CHAPTER-I.docx>

Références

- [1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind Power Systems*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [10] E. Lorenzo (ed.), *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. Sevilla, Spain: Progensa, 1994.
- [2] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. New York, NY, USA: Academic Press, 1983.
- [3] A. Luque and S. Hegedus, Eds., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2011.
- [4] D. Y. Goswami, F. Kreith, and J. F. Kreider, *Principles of Solar Engineering*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2015.
- [5] T. Markvart and L. Castañer, Eds., *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Oxford, U.K.: Academic Press, 2012.
- [6] T. Markvart and L. Castañer (eds.), *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, 2nd ed. Oxford, UK: Academic Press, 2012.
- [7] E. Lorenzo, Ed., *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. Sevilla, Spain: Progensa, 1994.²
- [8] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed. Oxford, UK: Academic Press, 2014.
- [9] R. E. Bird and C. Riordan, "Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes," *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 25, no. 1, pp. 87–97, 1986.

² <http://www.eolss.net/sample-chapters/c08/e6-106-01-00.pdf>

Nomenclature

angle zénithal (angle entre la direction du Soleil et la verticale locale)

θ_z

.

angle zénithal (angle entre la direction du Soleil et la verticale locale)

.

degré

déclinaison solaire

δ

.

déclinaison solaire

.

degré

irradiance solaire

G

.

irradiance solaire

.

watt par mètre carré (W/m^2)

irradiation solaire

H

.

irradiation solaire

.

wattheure par mètre carré (Wh/m^2) ou kilowattheure par mètre carré (kWh/m^2)

énergie reçue sur une période donnée

masse d'air

AM

.

masse d'air

.

sans dimension

épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement (rapport de chemin optique à celui du zénith)

