

III.1. CALCUL DE LA POSITION DU SOLEIL :

III.1.1. Introduction :

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

III.1.2. Paramètres de position :

➤ **L'équateur** est une ligne fictive de séparation entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud, définie par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles.

➤ **Le méridien** est le plan du lieu passant par l'axe des pôles.

➤ **La latitude ϕ** donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur à 90° N (ou S) aux pôles. Elle représente aussi la distance angulaire du site du soleil (S) par rapport au plan de l'équateur. Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud.

➤ **La longitude** : C'est l'angle formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180° (vers l'ouest) et $+180^\circ$ (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle-même (360°), chaque heure représente 15° d'écarte de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes. [9]

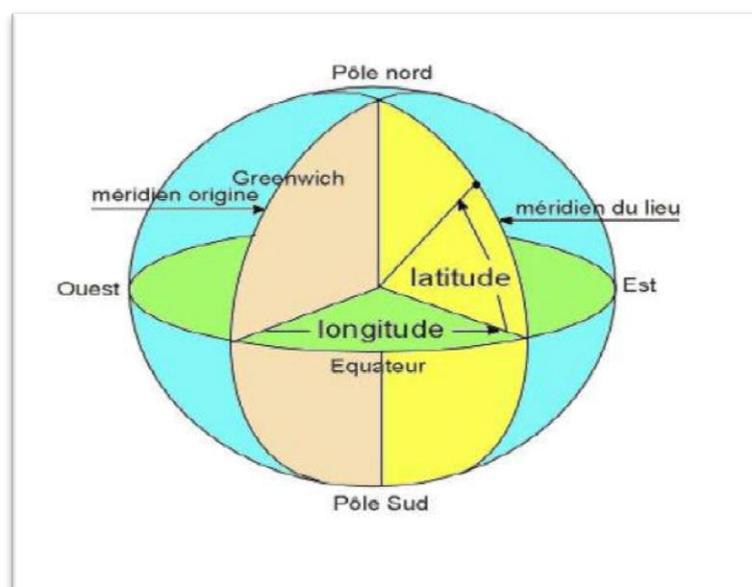


Figure III.1: coordonnées des Paramètres de position

Lieu	Latitude	Longitude L
Tiaret	35°22'	1°19'
Alger	36°45'	3°02'
Adrar	27°52'	-0°17'
Ouargla	31°56'	5°19'
Tlemcen	34°52'	-1°18'
Argentine	27°40'	-8°08'

Tableau III.1 : coordonnées terrestres (latitude et longitude) des quelques Villes d'Algérie.

➤ **Mouvement de la terre :**

La trajectoire décrite par la terre autour du soleil est elliptique. Le mouvement de la terre sur sa trajectoire est uniforme, la terre se déplace à vitesse constante (une vitesse moyenne de 29.8 km/s soit 107280 km/h). Avec une durée du parcours est d'une année, le déplacement de la terre sur sa trajectoire circulaire est donc d'environ 1° par jour (360° / 365 jours).

Le plan qui contient la trajectoire de la terre autour du soleil fait un angle de 23°27' avec le plan de l'équateur, on l'appelle l'écliptique. C'est dans ce plan qu'un objet placé entre le soleil et la terre peut produire des éclipses.

Lors de son déplacement, l'axe des pôles de la terre reste parallèle à lui-même, le mouvement annuel de la terre autour du soleil s'apparente ainsi à un mouvement géométrique de translation s'effectue sur une trajectoire circulaire. [25]

Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices (voire figure III.2).

L'équinoxe d'automne intervient vers le 22 septembre.

L'équinoxe de printemps vers le 22 mars, dans l'hémisphère Nord.

Dans l'hémisphère Nord, le **solstice d'été** (vers le 21 juin) est la période au cours de laquelle la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître (maximum 16 h 8mn).

Le solstice d'hiver (vers le 21 décembre) est la période au cours de laquelle cette durée cesse de décroître (minimum 8h 12mn). Les saisons sont inversées dans l'hémisphère Sud. [9]

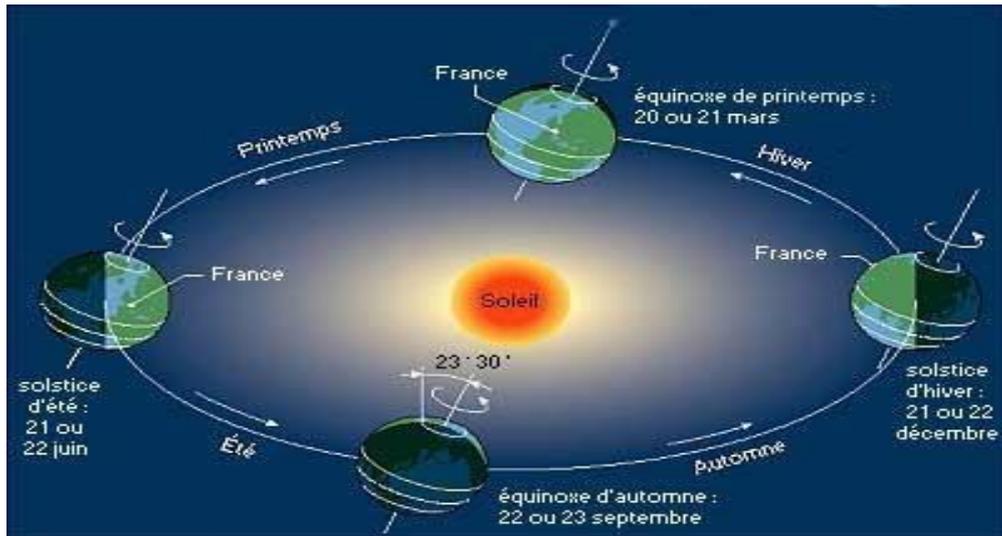


Figure III.2: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

➤ **Déclinaison δ :**

La déclinaison solaire est l'angle formé par la droite reliant la terre au soleil et le plan équatorial (positif vers le nord). La déclinaison est égale à zéro aux équinoxes et varie de $+23^{\circ}26'$ (22 juin) à $-23^{\circ}26'$ (22 décembre).

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (\text{III.1})$$

avec : n, nombre de jour.

➤ **L'azimut solaire a :**

C'est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation.

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'**azimut géographique**, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.[9]

L'azimut est représentée par la formule suivant :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{III.2})$$

➤ **L'hauteur solaire h :**

C'est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation.

La hauteur du soleil est bien représentée par une formule suivante:

$$\sin (h) = \cos (\varphi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\varphi) \times \sin (\delta) \quad .(III.3)$$

Avec :

h : la hauteur du soleil

δ : La déclinaison

ω : L'angle horaire

φ : Latitude d'un

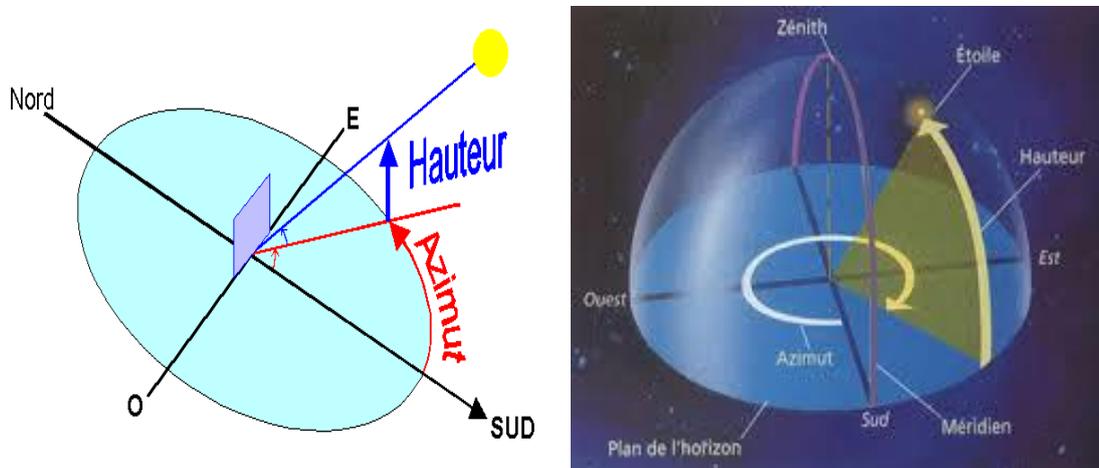


Figure III.3 : l'azimut et la hauteur solaire

➤ **Le Zénith :**

C'est le point le plus élevé de l'hémisphère céleste, se trouvant directement à la verticale de l'observateur.

III.1.3.Paramètres de temps :

➤ **Angle horaire:**

L'angle horaire du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360° La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure, Alors définit par la relation suivant : [8]

$$\omega = 15.(TSV - 12) \quad (III.4)$$

Avec : ω : L'angle horaire en [degré].

➤ **Temps solaire moyen :**

Il est appelé parfois le temps local (TSM).

$$TSV - ET = TSM \tag{III.5}$$

ET, l'équation du temps, qui corrige le TSV par rapport au TSM.

$$ET = [-0,0002 + 0,4197 \cos \beta - 7,3509 \sin \beta - 3,2265 \cos^2 \beta - 9,3912 \sin^2 \beta - 0,0903 \cos^3 \beta - 0,3361 \sin^3 \beta] \tag{III.6}$$

Avec : $\beta = \frac{360 n}{365}$ [degré] (III.7)

➤ **Temps solaire vrai (T.S.V) : [25]**

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω .

Il est donné sous la forme suivante ; ω en degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

➤ **Le temps universel (TU) :**

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine).

$$TU = TSM + L/15 \tag{III.8}$$

Ou L: est la longitude

L >0, pour les villes situées à l'Est de Greenwich

L <0, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

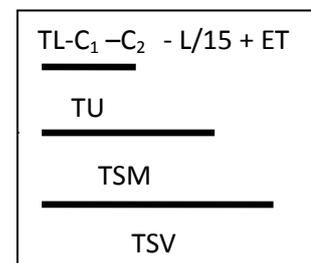


Tableau II.2 : Détermination du temps légal TL à partir du temps TSV

➤ **Le temps légal (TL) :**

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + C1 + C2 \tag{III.9}$$

Cas particuliers : [21]

Les quantités relatives au lever et au coucher du soleil ($h=0$) sont marquées de l'indice inférieur "0" et celles relatives au midi solaire (12h TSV, $a = \omega = 0$) de l'indice "m" .

On a donc :

- hauteur à midi solaire : $h_m = \sin^{-1}[\cos(\delta - \varphi)]$ (III.10)

- angle horaire au coucher : $\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta))$ (III.11)

- azimut au coucher : $a_0 = \cos^{-1}(-\sin(\delta) / \cos(\varphi))$ (III.12)

- durée du jour (en h) : $ddj = 2 \omega_0 / 15$ (III.13)

Remarques : si $\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta) \geq 1$, le soleil ne se couche pas ($\omega_0 = \alpha_0 = 180^\circ$).

si $\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta) \leq -1$, le soleil ne se lève pas ($\omega_0 = \alpha_0 = 0^\circ$).

III.2. Eclairement solaire :

L'éclairement correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairement dû aux rayons solaires directs et celui dû au rayonnement solaire diffusé par le ciel ou réfléchi par une surface (le sol, un mur...) Cet éclairement dépend bien sûr de l'orientation de la surface par rapport au soleil. Les grandeurs seront calculées en W/m^2 et seront notées avec un astérisque ^{***}

III.2.1. Eclairement direct $S^*(i, \gamma)$:

Considérons un capteur élémentaire incliné d'un angle i par rapport à l'horizontale et orienté d'un angle γ par rapport au Sud. L'éclairement direct S^* est la composante normale au capteur, de l'éclairement solaire I^* .

On peut écrire :

$$S^* = I^* \vec{k} \cdot \vec{n} \quad (\text{III.14})$$

Avec : \vec{n} représente le vecteur unitaire normal à la surface élémentaire :

$$\vec{n} (\sin \gamma \cdot \sin i, \cos \gamma \cdot \sin i, \cos i) .$$

et \vec{k} le vecteur unitaire donnant la direction du soleil :

$$\vec{k} (\cos h \cdot \sin a, \cos h \cdot \cos a, \sin h) .$$

d'où il vient :

$$S^*(i, \gamma) = I^* [\sin i \cdot \cos h \cdot \cos(a - \gamma) + \cos i \cdot \sin h] \quad (\text{III.15})$$

On peut remarquer que la surface n'est ensoleillée que si l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\vec{k} \cdot \vec{n} > 0, \text{ d'où } S^* > 0 .$$

Quand la lumière est rasante on a :

$$\vec{k} \cdot \vec{n} = 0 \text{ et } S^* = 0 .$$

Deux cas particuliers importants sont à considérer :

- Le capteur est horizontal ($i=0$). En indiquant par la lettre h la grandeur correspondante, on obtient :

$$S_h^* = I^* \sin h. \tag{III.16}$$

- Le capteur est vertical ($i=90^\circ$) orienté au sud ($\gamma = 0^\circ$). En indiquant par la lettre v la grandeur correspondante, on obtient :

$$S_v^* = I^* \cos h \cdot \cos a \tag{III.17}$$

avec : $-90^\circ < a < 90^\circ$.

III.2.2. Eclairement diffus $D^*(i)$:

Dans ce paragraphe on suppose que le rayonnement diffus provenant du ciel ou bien du sol est isotrope. De plus on considère que le sol est horizontal.

Lorsque le capteur est horizontal ($i=0^\circ$) il reçoit le rayonnement diffusé par le ciel soit D_h^* .

S'il est incliné d'un angle i , il "voit" moins de ciel mais par contre reçoit du sol une fraction de la quantité $a^* \cdot G_h^*$ où a^* est l'albédo du sol pour le rayonnement solaire.

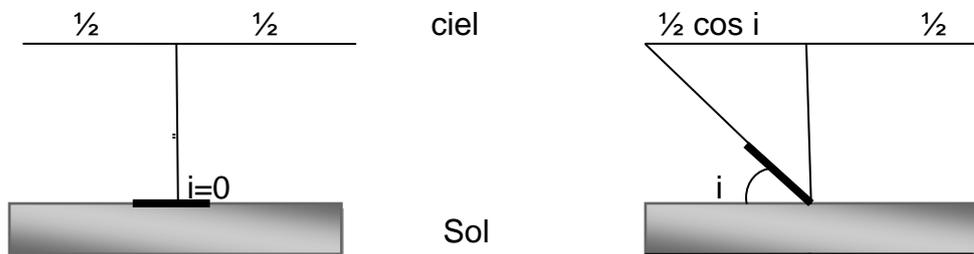


figure III.4 : Effet de l'inclinaison sur la réception du rayonnement diffus.

La figure ci-dessus montre que la fraction de D_h^* reçue par le capteur en provenance du ciel s'écrit :

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos i = \frac{1}{2}(1 + \cos i). \tag{III.18}$$

Quant à la fraction de $(a^* \cdot G_h^*)$ en provenance du sol, elle s'écrit :

$$1 - \frac{1}{2}(1 + \cos i) = \frac{1}{2}(1 - \cos i) \tag{III.19}$$

Finalement on obtient :

$$D^*(i) = \left(\frac{1 + \cos i}{2}\right) D_h^* + \left(\frac{1 - \cos i}{2}\right) a^* \cdot G_h^* \tag{III.20}$$

III.2.3. Eclairement globale $G^*(i, \gamma)$:

C'est la somme des éclairements direct et diffus :

$$G^* = S^* + D^* \quad (\text{III.21})$$

On en tire : $D_h^* = G_h^* - I^* \sin h \quad (\text{III.22})$

III.3. Rapports d'éclairement :

Les mesures expérimentales de l'éclairement solaire sont le plus souvent, comme on le verra par la suite, obtenues pour des surfaces horizontales. Pour connaître, à partir de ces mesures, l'éclairement sur une surface d'orientation quelconque, on introduit une quantité caractéristique appelée rapport d'éclairement. En fait, compte tenu de ce que l'on vient de voir, on fait apparaître trois rapports d'éclairement en fonction du type d'éclairement étudié : direct, diffus ou global.

Dans le cas de l'éclairement direct, on pose : $R_S = \frac{S^*(i, \gamma)}{S_h^*} \quad (\text{III.23})$

De même on pose pour l'éclairement diffus : $R_D = \frac{D^*(i)}{D_h^*} \quad (\text{III.24})$

et pour l'éclairement globale : $R_G = \frac{G^*(i, \gamma)}{G_h^*} \quad (\text{III.25})$

Ces définitions amènent aux résultats suivants :

$$R_S = \frac{\sin i \cdot \cos(a-\gamma)}{\tan h} + \cos i \quad (\text{III.26})$$

$$R_D = \left(\frac{1+\cos i}{2} \right) + \left(\frac{1-\cos i}{2} \right) a^* \frac{G_h^*}{D_h^*} \quad (\text{III.27})$$

$$R_G = \left(R_S - \frac{1+\cos i}{2} \right) \frac{S_h^*}{G_h^*} + \frac{1+\cos i}{2} + \left(\frac{1-\cos i}{2} \right) a^* \quad (\text{III.28})$$

III.4. irradiation hors atmosphère :

En déterminant l'irradiation hors atmosphère, on élimine le problème climatologique qui tient compte du lieu d'étude, de la saison et de la nébulosité du ciel. De nombreuses mesures météorologiques ont permis d'établir des formules empiriques exprimant l'irradiation au sol à partir de l'irradiation hors atmosphère.

Considérons un plan horizontal, à la limite de l'atmosphère terrestre, situé à une latitude ϕ .

Notons C_h^* l'éclairement solaire correspondant. On a :

$$C_h^* = C^* \cdot \sin h \quad (\text{III.29})$$

ou C^* représente la constante solaire que l'on peut considérer constante compte tenu de sa faible variation au cours du temps. Notons C_h l'irradiation journalière. On a :

$$C_h = \int C_h^* dt = \int_{LS}^{CS} C^* \sin h dt \quad (\text{III.30})$$

Où LS et CS correspondent aux heures de lever et coucher du soleil.

$$LS = - \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad \text{et} \quad CS = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad [1]$$

En remplaçant $\sin h$ par son expression donnée au paragraphe 1, on a :

$$C_h = C^* \int_{LS}^{CS} (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi) dt. \quad (\text{III.31})$$

Pour une journée et un lieu donné, δ et φ sont fixés. D'outre par, 1 heure de temps correspond à une variation de 15° de l'angle horaire ω :

$$dt = \frac{12}{\pi} d\omega \quad (\text{III.32})$$

avec le temps t en heure et l'angle ω en radians. L'intégration donne alors :

$$C_h = \frac{24}{\pi} \frac{C^*}{1000} (\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \omega_0 + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_0). \quad (\text{III.33})$$

avec C_h en $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{J}$ et $C^* = 1353 \text{W/m}^2$.

Une autre expression peut être écrite en considérant la durée du jour en heures et ω_0 en radians :

$$ddj = \frac{24\omega_0}{\pi} \quad (\text{III.34})$$

Les fonctions circulaires étant calculées avec les angles en degrés, on obtient :

$$C_h = \frac{C^*}{1000} [\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot ddj + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \frac{24}{\pi} \cdot \sin(7,5 \cdot ddj)] \quad (\text{III.35})$$

III.4.1. Cas d'un ciel clair :

Dans le cas où aucun nuage ne vient perturber le rayonnement solaire, on peut calculer aisément l'irradiation journalière en intégrant l'éclairement reçu tout au long de la journée, c'est-à-dire sur la durée ddj . Les quantités relatives à un ciel clair seront indicées par "°".

L'irradiation globale par ciel, reçu par n plan horizontal, sera notée G_{oh} et calculée en écrivant :

$$G_{oh} = \int_{LS}^{CS} G_h^* dt \tag{III.36}$$

Ou LS représente l'heure de lever du soleil et CS son heur de coucher.

Dans le cas d'une surface quelconque, on aura :

$$G_o(i, \gamma) = \int_{LS}^{CS} G^*(i, \gamma) dt = \int_{LS}^{CS} R_G(i, \gamma) \cdot G_h^* dt \tag{III.37}$$

Il ne faut pas oublier que dans cette dernière relation, le calcul du rapport d'éclairement global R_G nécessite la connaissance du rapport d'éclairement direct R_S . Or celui-ci peut devenir négatif selon l'heure considérée et l'orientation du capteur. Dans ce cas, R_S est pris égal à zéro, sinon cela reviendrait, dans le bilan, à retrancher de l'énergie non reçue par le capteur.

Si on connaît l'éclairement global à midi solaire sur un plan horizontal G_{hm}^* , on peut approcher la valeur de l'irradiation par ciel clair G_{oh} en considérant que l'évolution de l'éclairement G_h^* est sinusoïdale sur la durée du jour ddj :

$$G_h^* = G_{hm}^* \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{ddj}\right) \tag{III.38}$$

Avec le temps en heures. On a donc :

$$G_{oh} = \int_0^{ddj} G_{hm}^* \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{ddj}\right) dt \tag{III.39}$$

Et après intégration :

$$G_{oh} = \frac{2}{\pi} ddj \cdot G_{hm}^* \tag{III.40}$$

Le tableau ci-dessous donne pour un ciel claire, c'est-à-dire sans nuage, les éclairements solaires I^* et G_h^* en France. Les conditions de trouble correspondent à la teneur de l'atmosphère en poussières et autres polluants. [21]

Conditions de trouble	I^* [W/m ²]	G_h^* [W/m ²]
Ciel très pur	$1210 \exp\left[-\frac{1}{6 \sin(h+1)}\right]$	$1130 (\sin h)^{1,15}$
Ciel moyennement troublé	$1230 \exp\left[-\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)}\right]$	$1080 (\sin h)^{1,22}$
Ciel trouble	$1260 \exp\left[-\frac{1}{2,3 \sin(h+3)}\right]$	$995 (\sin h)^{1,25}$

Tableau II.4 : Expressions empiriques des éclairements solaires I^* et G_h^* en France pour trois conditions de trouble.

III.4.2.Cas d'un ciel variable :

Seul un grand nombre de mesures locales peuvent permettre de prédire, avec une bonne approximation, l'énergie solaire qui pourra être récupérée en un lieu donné. La durée d'ensoleillement, appelée "*durée d'insolation*" ddi , est un premier paramètre.

On la caractérise par le facteur d'éclairement σ . Celui-ci est égal au rapport de la durée d'insolation sur la durée du jour. On a donc par définition :

$$\sigma = \frac{ddi}{ddj} .$$

$$\text{Avec : } ddi = \frac{2}{15} \text{ arc cos}[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (\text{III.41})$$

Mais l'énergie solaire reçue par une surface n'est pas seulement fonction de la durée d'insolation ; en effet il faut tenir compte de l'heure d'éclairement ; une heure d'ensoleillement à midi sera plus intéressante sur le plan énergétique que la même durée à 9 heures du matin. On introduit alors un nouveau facteur appelé "*facteur d'irradiation e*", correspondant au rapport de l'énergie réellement reçue sur l'énergie qu'aurait reçue le capteur par ciel clair. On écrit finalement :

$$G(i, \gamma) = e \cdot G_o(i, \gamma) \quad (\text{III.42})$$

Une autre approche consiste à utiliser une formule empirique de la forme :

$$G_h = C_h (a_1 + a_2 \cdot \sigma) \quad (\text{III.43})$$

Dans la quelle C_h est l'irradiation de la surface horizontale placée à la limite de l'atmosphère, σ le facteur d'éclairement et a_1 et a_2 deux coefficients dépendants de la climatologie locale.

Pour déterminer l'irradiation sur un plan incliné d'orientation (i, γ) , pour une journée donnée, on utilise une loi empirique qui indique que le rapport des irradiances d'un plan incliné et d'un plan horizontal mesuré hors atmosphère est égal au rapport des mêmes quantités mesurées au niveau du sol : **[21]**

$$\frac{C(i, \gamma)}{C_h} = \frac{G(i, \gamma)}{G_h} \quad (\text{III.44})$$

Ce qui donne :

$$G_{(i, \gamma)} = C_{(i, \gamma)} (a_1 + a_2 \cdot \sigma) \quad (\text{III.45})$$

$$\text{Où} \quad C(i, \gamma) = \int_{ddj} C^*(i, \gamma) dt = \int_{ddj} R_s C_h^* dt = \int_{ddj} R_s C^* \sin h dt \quad (\text{III.46})$$

Avec :

$C^*(i, \gamma)$: Éclairement solaire hors atmosphère d'une surface d'orientation (i, γ)

R_s : Rapport d'éclairement

C_h^* : Éclairement solaire hors atmosphère d'un plan horizontal.

C^* : Constante solaire (1,353 kW/m²).

III.5. Rendement d'un capteur plan :

III.5.1. Bilan énergétique :

Soit \dot{Q}^* l'énergie solaire absorbée par un capteur. Une partie de celle-ci est emmagasinée dans le fluide caloporteur ; c'est l'énergie utile \dot{Q}_u . Cette énergie peut être directement utilisée (chauffage par air chaud par exemple) ou bien transférée à un stockage (ballon d'eau chaude par exemple).

Un capteur solaire est sujet à des pertes thermiques. Une partie de l'énergie absorbée est transférée vers l'environnement sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées \dot{Q}_a .

Enfin si on s'intéresse à une période de mise en température du système (au démarrage par exemple) il faudra tenir compte de l'énergie absorbée par le capteur nécessaire à cette montée en température. Cette énergie, notée \dot{Q}_t , dépend de l'inertie thermique de l'installation. On a donc :

$$\dot{Q}^* = \dot{Q}_u + \dot{Q}_a + \dot{Q}_t \quad (\text{III.47})$$

En notant G^* la puissance solaire globale reçue par le capteur, le rendement moyen de celui-ci sur une période Δt s'écrit :

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^{\Delta t} \dot{Q}_u dt}{\int_0^{\Delta t} G^* dt} \quad (\text{III.48})$$

III.5.2. Influence de la température de l'absorbeur :

Pour étudier l'influence de la température de l'absorbeur, notée T_p considérons un capteur plan à eau possédant une vitre. L'absorbeur est constitué d'une plaque plane sous laquelle sont soudés des tubes à section circulaire.

Les paramètres sont les suivantes :

- Orientation du capteur : inclinaison i , azimut a .
- Dimensions : longueur L , largeur I , distance plaque-vitre b , épaisseur de l'isolant e_i .
Les hypothèses sont les suivantes :
- Le régime est supposé permanent.
- La vitre et la surface absorbante sont supposées isothermes.
- On néglige tous les effets de bords, c'est-à-dire que l'on suppose un capteur infini, les grandeurs étant déterminées par m^2 de surface absorbante.
- Le ciel rayonne à la température T_∞ donnée par la formule empirique suivante :

$$T_\infty = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (\text{III.49})$$

Où T_∞ et T_a sont exprimées en degrés kelvin.

En première approximation on peut écrire l'expression de la puissance solaire absorbée par le capteur :

$$\dot{Q}^* = G^* \cdot \tau_c^* \cdot \alpha_p^* \quad (\text{III.50})$$

Où τ_c^* est le coefficient de transmission solaire de la couverture transparent, calculé pour l'angle d'incidence du rayonnement direct et α_p^* le coefficient d'absorption solaire de la plaque constituant la surface absorbante. Celle-ci est à la température supposée uniforme T_p . C'est la température de l'absorbeur, encore appelée température de fonctionnement.

Notons que pour un calcul plus précis il faudrait tenir compte du fait que τ_c^* est différent selon que l'on s'intéresse au flux solaire direct S^* ou bien le flux solaire diffus D^* .

Avec le premier il faut tenir compte de l'angle d'incidence tandis qu'avec le second, par définition, il n'y a pas de direction privilégiée. Dans la suite nous négligerons l'énergie solaire absorbée par la vitre. En rigueur elle n'est pas nulle puisque l'on peut écrire :

$$\rho_c^* + \tau_c^* + \alpha_c^* = 1 \quad (\text{III.51})$$

Qui signifie que tout rayonnement tombant sur la vitre est soit réfléchi (ρ_c^*), soit absorbé (α_c^*), soit transmis (τ_c^*). Mais pour le rayonnement solaire de courte longueur d'onde, la fraction α_c^* est très faible et peut être négligée en première approximation.

Le flux thermique \dot{Q}_a perdu avec l'environnement peut être déterminé par une analogie électrique comme indiqué à la **figure III.5** :

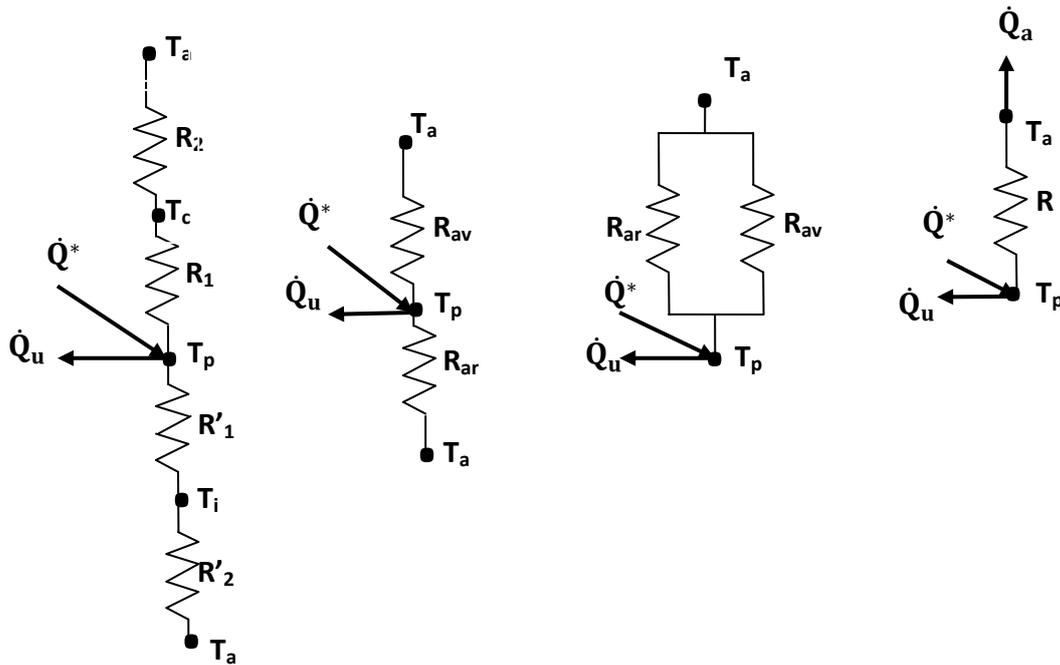


Figure III.5 : Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique perdu avec l'environnement à la température T_a

Soit R_1 la résistance thermique existant entre la surface absorbante à T_p et la vitre à T_c .

La résistance thermique est l'inverse de la conductance thermique.

Dans notre cas, cette dernière est la somme de deux termes : une conductance due à la convection naturelle qui règne dans l'air confiné entre la surface absorbante et la vitre et une autre due au phénomène d'échange radiatif intervenant entre ces deux surfaces à températures différentes.

Soit h_{c1} et h_{r1} les coefficients d'échange thermique relatifs respectivement à la convection et au rayonnement. On a :

$$R_1 = \frac{1}{h_{c1} + h_{r1}} \tag{III.52}$$

Soit R_2 la résistance thermique entre la vitre et l'extérieur à T_a . De la même façon que pour R_1 , on a affaire à des échanges thermiques par convection et rayonnement. On notera h_{c2} et h_{r2} les coefficients d'échange correspondants. Et par suite :

$$R_2 = \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}} \tag{III.53}$$

R_1 et R_2 étant en série, la résistance thermique vers l'avant du capteur R_{av} s'écrit :

$$R_{av} = R_1 + R_2. \tag{III.54}$$

Soit R'_1 la résistance thermique créée par l'isolant. On a affaire à de la conduction pure.

Le coefficient d'échange par conduction thermique dans le cas du mur semi-infini² s'écrit dans notre cas :

$$R'_1 = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (\text{III.55})$$

Où λ_i représente la conductivité thermique de l'isolant.

Soit R'_2 la résistance thermique entre la face externe de l'isolant et l'air ambiant.

En général cette résistance peut être négligée, la température de surface de l'isolant étant le plus souvent très proche de celle de l'air ambiant à T_a .

De même que pour l'avant, on définit une résistance thermique arrière R_{ar} qui s'écrit :

$$R_{ar} = R'_1 + R'_2. \quad (\text{III.55})$$

La similitude électrique permet d'écrire :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R'_1 + R'_2} \quad (\text{III.56})$$

et en utilisant les conductances thermiques :

$$K = K_{av} + K_{ar} \quad (\text{III.57})$$

Avec :

$$K_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (\text{III.58})$$

et

$$K_{ar} = \frac{1}{R'_1 + R'_2} \approx \frac{1}{R'_1} \quad (\text{puisque } R'_2 \approx 0). \quad (\text{III.59})$$

Le schéma de droite de la **figure III.5** montre que le flux thermique échangé avec l'environnement à T_a s'écrit :

$$\dot{Q}_a = K (T_p - T_a). \quad (\text{III.60})$$

On déduit le **rendement instantané** η , égal au rapport de l'énergie utile \dot{Q}_u sur l'éclairement solaire G^* reçue par le capteur :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G^*} = \frac{\dot{Q}^* - \dot{Q}_a}{G^*} = (\tau_c^* \cdot \alpha_p^*) - \frac{\dot{Q}_a}{G^*} \quad (\text{III.61})$$

On appelle rendement optique du capteur, que l'on note ν^* , le produit du coefficient de transmission solaire τ_c^* de la vitre par le coefficient d'absorption solaire α_p^* de la surface absorbante.

Finalement le rendement instantané en régime permanent du capteur plan s'écrit : **[21]**

$$\eta = \nu^* - K \frac{T_p - T_a}{G^*}. \quad (\text{III.62})$$

Si on considère que le rendement optique ν^* du capteur est constant ainsi que la conductance globale K , on obtient la droite de rendement représentée à **la figure III.5**.

III.6. Analyse des données : en 15 Avril

Données	Symboles	Valeurs
Nombre des jours	N	105
Temps solaire vrais	TSV[h]	10
Latitude	φ [°]	45°
L'angle d'inclinaison	i [°]	0° à 90°
Température ambiante	T_a [°C]	12
Température d'absorbeur	T_p [°C]	50
L'albédo	a^*	0.4
Vitesse du vent	w [m/s]	5
Coefficient d'émission infrarouge de l'absorbeur	ε_p	0.9
Coefficient d'émission infrarouge de la vitre	ε_p	0.8
Rendement optique	ν^*	0.7
Epaisseur d'isolant	e_i [mm]	40
Conductivité thermique	λ_i [W/m.k]	0.040
Distance absorbeur-vitre	b [mm]	20

Tableau III.4 : les données d'un capteur plan à air au mois d'avril.

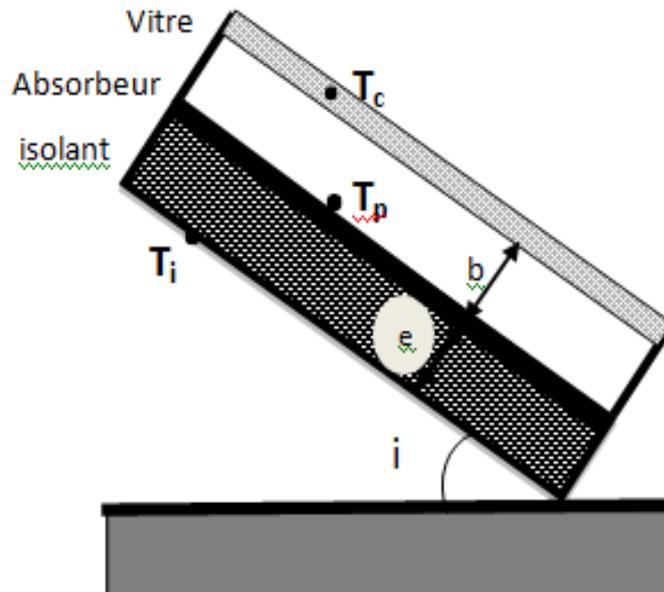
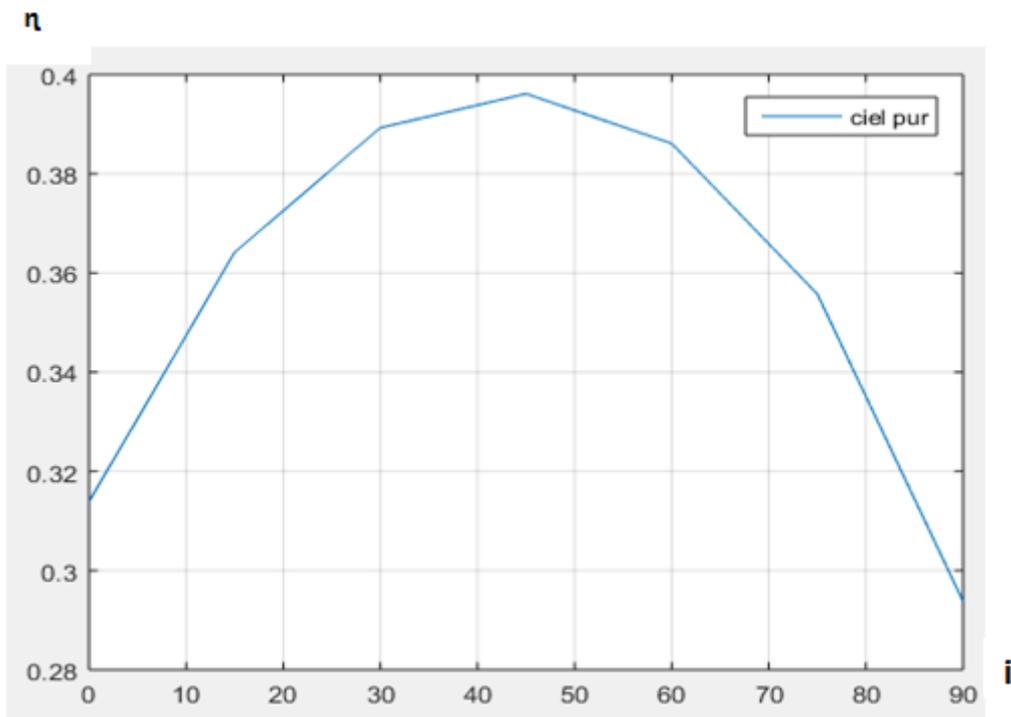
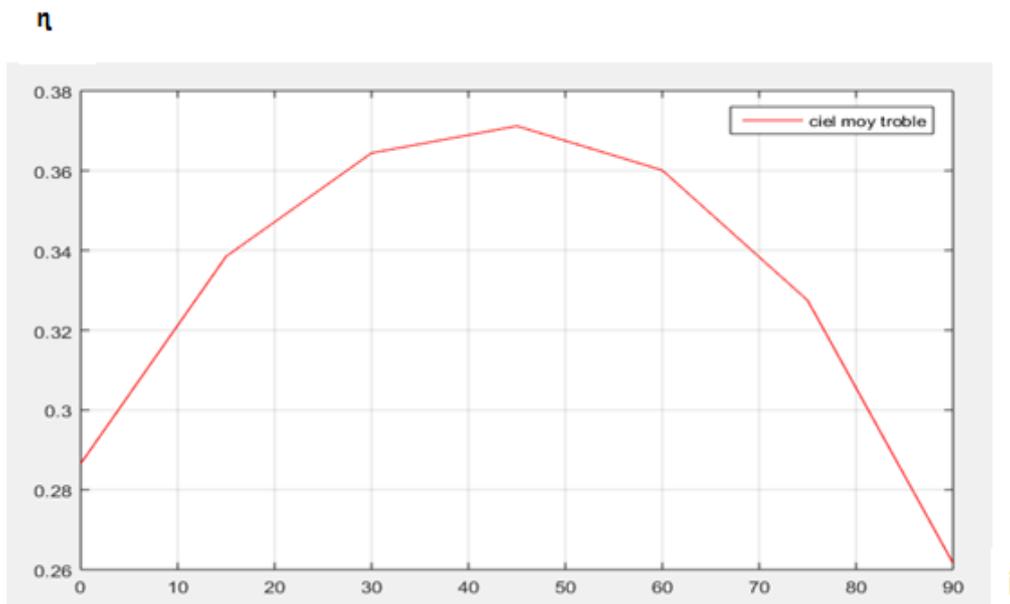


Figure III.6 : capteur plan à air

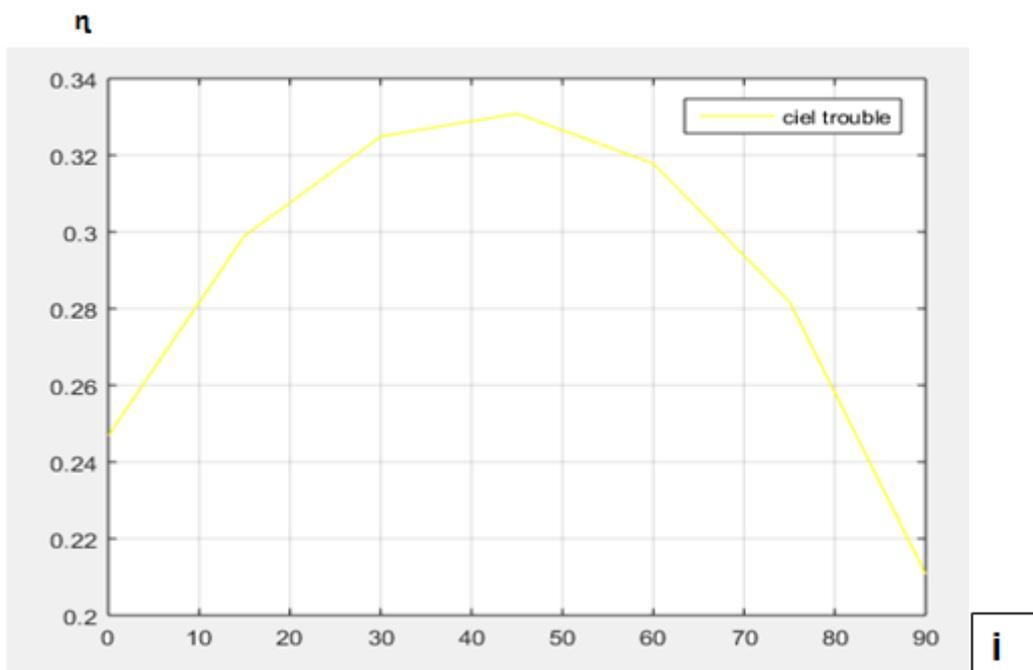
Les courbes ci-dessous clarifient la variation du rendement instantané du capteur à air en fonction de l'angle d'inclinaison pour les trois états de ciel : pur, moyennement troublé et trouble ; nous avons remarqués la meilleure valeur du rendement à 45°.



Graphe III.1 : courbe du rendement pour un état de ciel pur le 15 avril

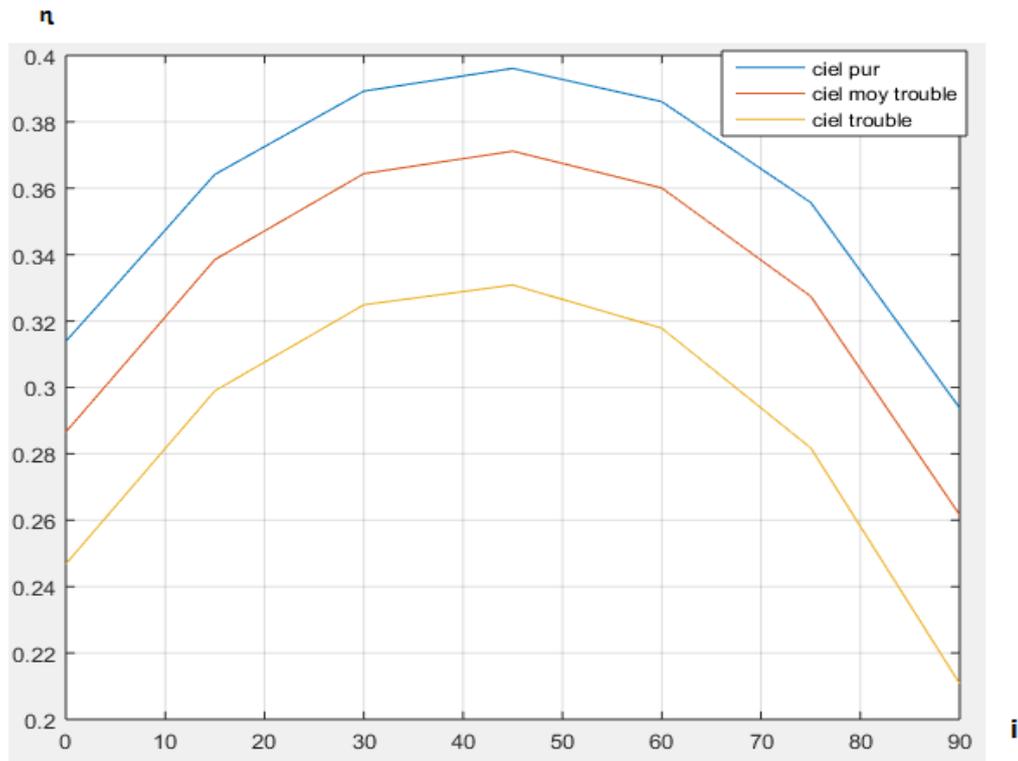


Graphe III.2 : courbe du rendement pour un état de ciel moyennement troublé le 15 avril



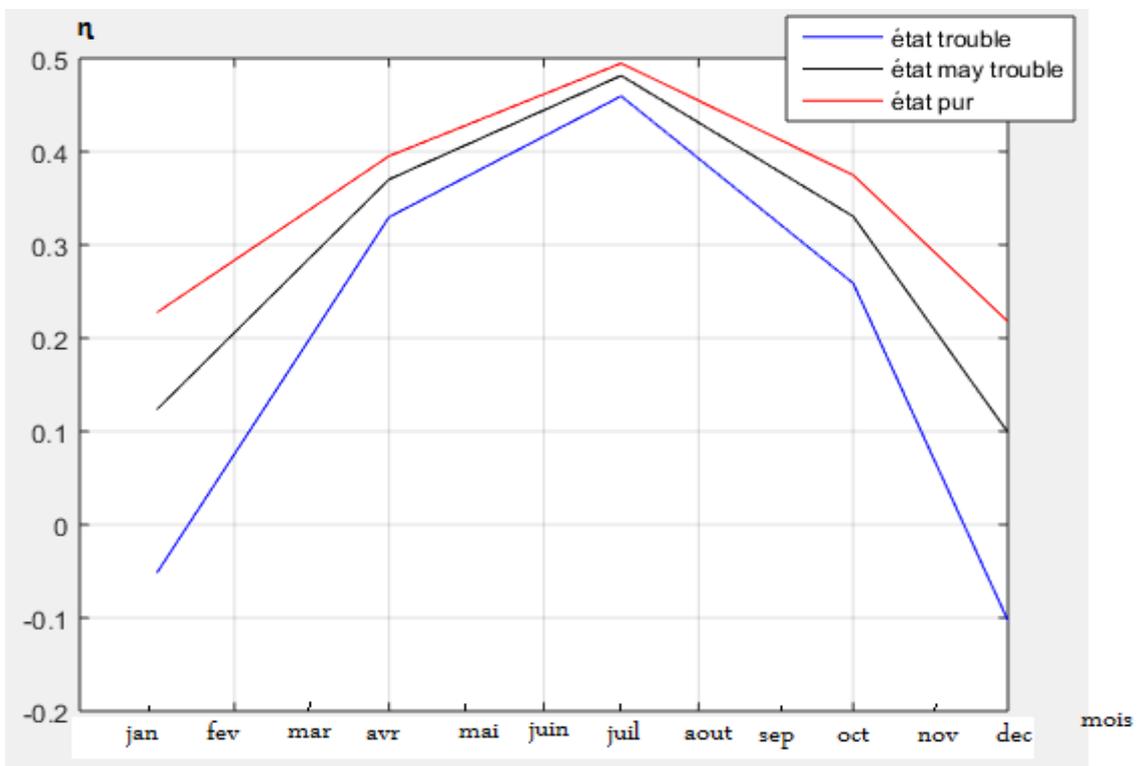
Graphe III.3 : courbe du rendement pour un état de ciel trouble le 15 avril.

Les courbes ci-dessous pour comparer le rendement dans les trois états de ciel au mois d'avril.



Graph III.4 : courbes du rendement pour les différents états en 15 avril

Les courbes ci-dessous pour comparer le rendement en différents mois, à $i=45^\circ$



Graph III.5 : courbes du rendement des trois états pour les différents mois