

## Étude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaires

Fatiha Yettou<sup>1\*</sup>, Amor Gama<sup>1</sup>, Ali Malek<sup>2</sup>, Boubekour Azoui<sup>3</sup> et Chérif Larbès<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 'URAER'  
B.P. 88, Z.I. Garaa Taam, Ghardaïa, Algérie

<sup>2</sup> Division Energie Solaire Photovoltaïque,  
Centre de Développement des Energies Renouvelables,  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

<sup>3</sup> Laboratoire de Recherche LEB, Département d'Electrotechnique,  
Université Hadj Lakhdar, Batna, Algérie

<sup>4</sup> Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique,  
Avenue Hassen Badi, El Harrach, Alger, Algérie

(reçu le 10 Décembre 2010 – accepté le 27 Mars 2011)

**Résumé** - *L'objectif du présent travail consiste en l'élaboration d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire destiné aux systèmes thermiques à concentration en Algérie. Le logiciel réalisé 'CESAL2011' permet une visualisation de l'énergie solaire numériquement et graphiquement pour les différents cas de poursuite appliqués à ces systèmes. Pour une meilleure exploitation du logiciel, nous avons réalisé une interface graphique avec le langage de programmation Delphi, les calculs ont été effectués à l'aide du modèle de 'Capderou'. Une comparaison entre des valeurs de l'éclairement solaire mesurées et des valeurs calculées sur le site de Ghardaïa a été effectuée afin de valider le logiciel. Les résultats obtenus des tests et de la validation ont révélé que l'utilisation du modèle de 'Capderou', pour les systèmes à concentration, s'avère acceptable en adoptant quelques modifications. Le logiciel réalisé est un outil d'aide satisfaisant permettant le choix du meilleur type de poursuite solaire.*

**Abstract** - *The present work attempts to develop a computational code to estimate solar irradiance for the concentrating solar power systems in Algeria. The software realized 'CESAL2011' allows a numerical and graphical visualization of the solar irradiation for the different kinds of the solar tracking systems. For the best exploitation of the software we have realized a graphical interface using Delphi programming language, the calculus are based on 'Capderou' model's. We have proposed to make comparison between measured values and estimated values of irradiance in Ghardaïa site in order to validate the software. The results of the tests and validation show that; for concentrator solar systems, the 'Capderou' model's seems better with adopting some modifications. The software realized is an interesting tool allows the choice of the best sun tracking.*

**Mots clés:** Logiciel de calcul – Eclairement solaire – Perrin de Brichambaut – Capderou – Systèmes solaires à concentration.

### 1. INTRODUCTION

La lutte contre le changement climatique a récemment relancé les efforts de recherche pour produire de l'électricité ou d'autres vecteurs énergétiques en minimisant

---

\* Yettou.t@gmail.com

les émissions de carbone, ceci par le recours aux énergies renouvelables en général et aux technologies solaires à concentration en particulier.

Ces technologies permettent de transformer l'éclaircissement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70 % [1].

L'Algérie est l'un des pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel solaire énorme. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les meilleurs pays ensoleillés dans le monde [2]. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures sur les Hauts Plateaux et au Sahara.

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au Sud du pays. Le potentiel en ressource solaire de l'Algérie est donc optimal pour l'exécution des projets solaires [3].

La ressource est l'éclaircissement solaire direct, qui représente un taux compris entre 50% et 90% de la totalité de l'éclaircissement solaire. La partie diffuse n'est en effet pas collectée par les dispositifs à concentration [4]. Pour obtenir un rendement optimum, les systèmes à concentration doivent être régulièrement réorientés en fonction du soleil. Les dispositifs de poursuite solaire automatique s'avèrent plus pratiques, et on trouve des configurations à un seul axe et à deux axes [5].

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique qui nécessitent la connaissance des paramètres météorologiques et radiométriques, tels que la température ambiante, l'humidité, l'éclaircissement solaire, etc....

Sur le réseau national de mesures météorologiques qui se caractérise par un faible nombre en stations radiométriques, ainsi la collecte des différentes données météorologiques et radiométriques est rare [6]. A cet effet, l'utilisation de modèles de simulation reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier à ce problème de données radiométriques.

Le présent travail consiste à l'utilisation du modèle 'Capderou' pour la réalisation d'un outil informatique (logiciel), destiné aux systèmes solaires à concentration, permettant le calcul de l'éclaircissement solaire par ciel clair, sur n'importe quel site de l'Algérie et pour différents types de système de poursuite solaire.

## **2. MODELISATION DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE PAR CIEL CLAIR**

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'A.S.A' [7], Capderou donna un modèle mathématique pour le calcul de l'éclaircissement direct et de l'éclaircissement diffus incident sur un plan horizontal. Selon ce modèle, l'éclaircissement global est la somme de l'éclaircissement direct et l'éclaircissement diffus.

Nous considérons, dans cette étude, de présenter uniquement les équations majeures qui génèrent l'éclaircissement direct, car la ressource principale des systèmes à concentration est l'éclaircissement solaire direct, représentant la quasi totalité de l'éclaircissement solaire, l'éclaircissement diffus n'est en effet pas collecté par ces dispositifs [4].

## 2.1 Modélisation de l'éclairement solaire incident sur un concentrateur horizontal

### 2.1.1 Eclairement direct horizontal

Pour calculer l'éclairement direct horizontal  $IB^h$ , Capderou donna l'équation générale (1) en fonction de la masse d'air  $m_A$ , de l'épaisseur de l'atmosphère  $\delta_R$ , de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  et du facteur de trouble de Linke  $T_L$  :

$$IB^h = G_0 \times \sin(\gamma_s) \times \exp(-T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (1)$$

où  $G_0$  est l'éclairement solaire extraterrestre. Il est donné en fonction de la constante solaire  $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$  et de la correction de distance entre la terre et le soleil  $\varepsilon$  représenté par l'expression suivante:

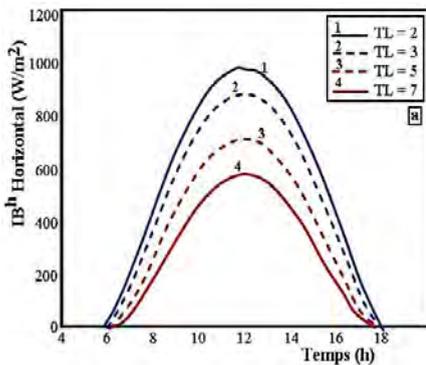
$$G_0 = I_0 \times \varepsilon \quad (2)$$

La correction de la distance terre-soleil  $\varepsilon$  est donnée par l'équation (3), où  $N$  est le nombre de jour:

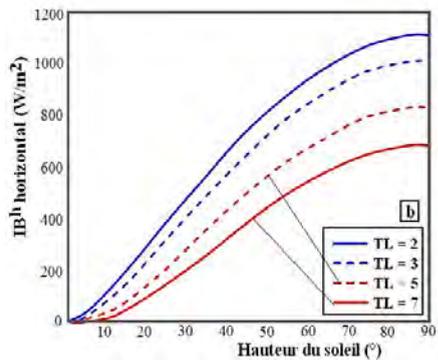
$$\varepsilon = 1 + 0.034 \times \cos \left[ \frac{360}{365} \times (N - 2) \right] \quad (3)$$

Les variations au niveau de la mer de l'éclairement direct horizontal incident sur la surface d'ouverture d'un concentrateur solaire en fonction du temps (a) et de la hauteur du soleil (b), pour un lieu situé à la latitude  $30^\circ$  et pour différentes valeurs du facteur de trouble sont représentées sur la figure 1.

On peut constater que l'éclairement direct horizontal  $IB^h$  atteint son intensité maximale, au milieu de la journée et aux mois d'été (Juin, Juillet, Août) où le soleil peut atteindre des hauteurs élevées. L'éclairement est également inversement proportionnel au facteur de Linke.



a-  $IB^h = f(\text{temps})$



b-  $IB^h = f(\text{hauteur du soleil})$

Fig. 1: Variations de l'éclairement direct horizontal en fonction du facteur de trouble de Linke

### 2.1.2 Hauteur du soleil

Pour le calcul de hauteur du soleil  $\gamma_s$ , Capderou donna la relation suivante {éq. (4)}, en fonction de la déclinaison solaire  $\delta$ , de l'angle horaire  $\omega$  et de la latitude du lieu  $\varphi$  [7]:

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (4)$$

L'angle horaire se calcule comme suit:

$$\omega = 15 \times (\text{TSV} - 12) \quad (5)$$

La déclinaison solaire est donnée par l'expression suivante {éq. (6)} [7]:

$$\sin(\delta) = 0.398 \times \sin \left\{ \frac{360}{365} \times (N - 82) + 2 \times \sin \left[ \frac{360}{365} \times (N - 2) \right] \right\} \quad (6)$$

A cet effet, la figure 2-a représente les variations de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  à midi sur le site de Ghardaïa pendant toute une année. Tandis que les variations de la déclinaison en fonction du jour sont reportées sur la figure 2-b.

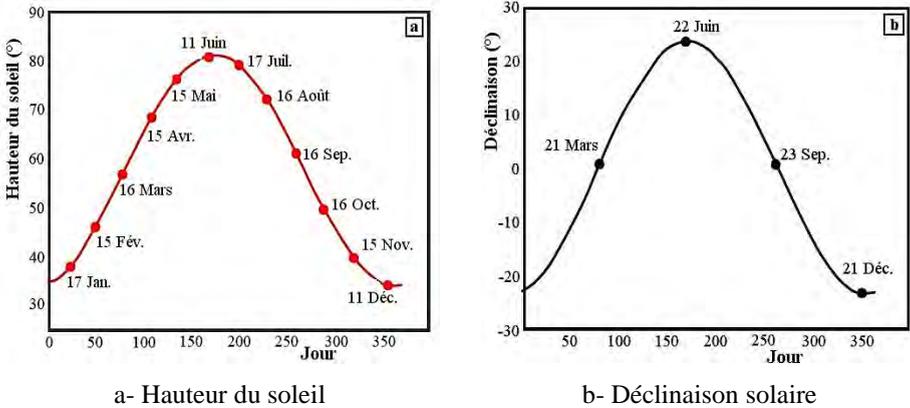


Fig. 2: Variation des paramètres horaires et de positions en fonction du jour

### 2.1.3 Facteur de trouble atmosphérique

En 1987, Capderou a proposé un modèle pour le calcul du facteur de trouble en Algérie par ciel clair, appelé 'Facteur de Linke', [7]. Le coefficient de trouble atmosphérique total a été décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaires: le trouble dû à l'absorption par la vapeur d'eau  $T_0$ , le trouble dû à la diffusion moléculaire de Rayleigh  $T_1$  et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols  $T_2$  avec:

$$T_0 = (2.4 - 0.9 \times \sin \varphi) + 0.1 \times (2 + \sin \varphi) - (0.2 \times z) - (1.22 + 0.14 \times A_{he}) \times (1 - \sin \gamma_s) \quad (7)$$

$$T_1 = (0.89)^z \quad (8)$$

$$T_2 = [0.9 + (0.4 \times A_{he})] \times (0.63)^z \quad (9)$$

z est l'altitude et  $A_{he}$  l'alternance hiver-été donnée par l'expression suivante:

$$A_{he} = \sin \left[ \frac{360}{365} \times (N - 121) \right] \quad (10)$$

### 2.1.4 Masse atmosphérique et épaisseur de Rayleigh

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'A.S.A' [7], Capderou a utilisé la relation (11) pour le calcul de la masse atmosphérique (masse d'air optique) en fonction de la hauteur du soleil  $\gamma_s$ :

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + 9.40 \times 10^{-4} \times [\sin(\gamma_s) + 0.0678]^{-1.253}} \approx \frac{(0.89)^z}{\sin(\gamma_s)} \quad (11)$$

La figure 3 représente donc la variation de la masse d'air atmosphérique en fonction de la hauteur du soleil. Une simple comparaison des formules les plus connues (formule simple, formule de Capderou, formule de Kasten et Young) indique que ces courbes ne diffèrent que pour les petites valeurs de la hauteur du soleil ( $\gamma_s < 10^\circ$ ).

Egalement, Capderou utilisa la formule pyréliométrique de Kasten [8] pour calculer l'épaisseur optique de l'atmosphère (épaisseur de Rayleigh) en fonction de la masse d'air  $m_A$ :

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (12)$$

La figure 4 représente la variation de l'épaisseur optique de Rayleigh en fonction de la masse d'air, donnée par la formule de Capderou et la formule ajustée de Kasten. On peut noter que ces courbes, très voisines entre elles, diffèrent également pour les valeurs de  $m_A$  faibles ( $m_A < 3$ ).

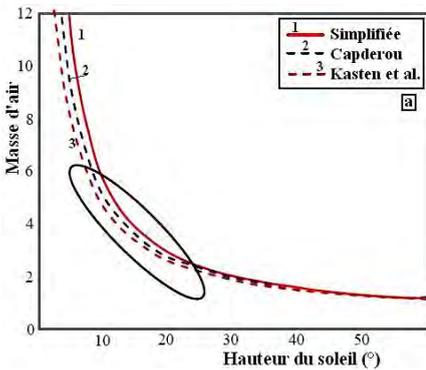


Fig. 3: Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil

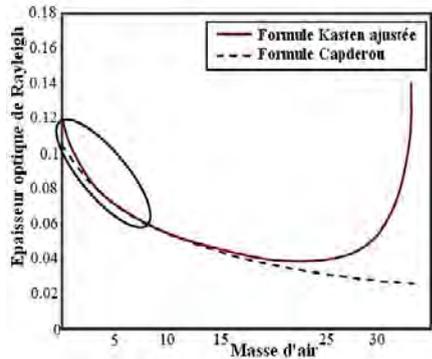


Fig. 4: Variation de l'épaisseur optique en fonction de la masse d'air

## 2.2 Modélisation de l'éclairement incident sur un concentrateur avec poursuite solaire

### 2.2.1 Azimut solaire

L'azimut du soleil  $\chi$  est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut du soleil  $\chi$  est représenté en fonction de la latitude du lieu  $\varphi$ , de la déclinaison solaire  $\delta$ , de l'angle horaire  $\omega$  et de la hauteur du soleil  $\gamma_s$  de la manière suivante:

$$\cos(\chi) = \frac{\cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (13)$$

On représentera sur la figure 5, les variations de l'azimut solaire en fonction du temps pour les mois d'Avril, de Juillet et de Décembre sur le site de Ghardaïa.

### 2.2.2 Angle d'incidence

L'angle d'incidence  $\delta_i$  est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré. Il est défini par l'inclinaison du plan  $\beta$  et l'azimut de la normale du plan  $\alpha$  (orientation du plan).

Capderou utilise la hauteur de la normale au plan  $\gamma$  pour calculer le cosinus de l'angle d'incidence  $\cos(\delta_i)$ , et ce sont les angles  $\alpha$  et  $\gamma$  qui déterminent la position du plan, avec  $\gamma = 90 - \beta$ . L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donnée par Capderou; en fonction de l'angle horaire  $\omega$ , par l'expression suivante:

$$\cos(\delta_i) = a' \times \sin(\omega) + b' \times \cos(\omega) + c' \quad (14)$$

Avec

$$a' = \cos(\delta) \times [\sin(\alpha) \times \cos(\gamma)] \quad (15)$$

$$b' = \cos(\delta) \times [\cos(\alpha) \times \cos(\gamma) \times \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \times \cos(\varphi)] \quad (16)$$

$$c' = \sin(\delta) \times [-\cos(\alpha) \times \cos(\gamma) \times \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \times \sin(\varphi)] \quad (17)$$

Sur la figure 6, on trace  $\cos(\delta_i)$  en fonction de l'angle horaire pour divers plans orientés Sud, d'inclinaison  $\beta$  variable, et pour une déclinaison de  $20^\circ$  à Ghardaïa.

### 2.2.3 Suivi continu du soleil

Il existe des systèmes qui permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée, afin de minimiser l'angle d'incidence. Il s'agit de l'angle d'incidence des rayons du soleil sur un plan lié au système, ce plan étant le récepteur lui-même ou le support du récepteur (systèmes à concentration). Ces systèmes sont classés selon le nombre d'axes (un ou deux) et le mode de suivi (continu ou quotidien) [7].

Le principe du suivi par mouvement autour d'un axe, est d'orienter à chaque instant le plan récepteur par rotation autour de l'axe de telle sorte que la normale du plan soit constamment dans le plan formé par l'axe et la direction du soleil.

Avec un système à deux degrés de liberté, on peut suivre la direction du soleil pour obtenir une incidence constamment normale.

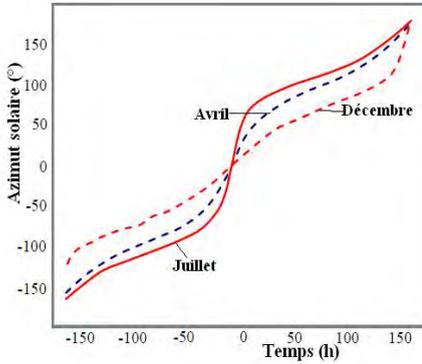


Fig. 5: Variation de l'azimut solaire en fonction du temps

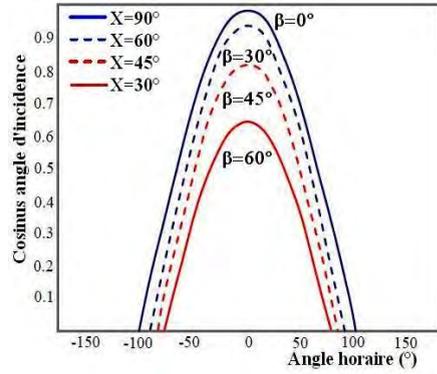


Fig. 6: Variation de l'angle d'incidence en fonction de l'angle horaire

Dans les applications utilisant des systèmes à concentration qu'ils soient de type parabolique ou cylindro-parabolique, on s'intéresse généralement à un suivi du soleil, continu à un seul ou deux axes, en considérant les cas particuliers suivants:

*Suivi continu à axe horizontal, orienté Est-Ouest (poursuite N-S)*

$$\cos(\delta_i) = \left[ 1 - \{ \cos(\delta) \times \sin(\omega) \}^2 \right]^{0.5} \quad (18)$$

*Suivi continu à axe horizontal, orienté Nord-Sud (poursuite E-O)*

$$\cos(\delta_i) = \left[ 1 - \{ \cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\omega) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi) \}^2 \right]^{0.5} \quad (19)$$

*Suivi continu à deux axes (poursuite intégrale)*

$$\cos(\delta_i) = 1 \quad (20)$$

Les variations de l'éclairement direct incident sur la surface d'ouverture d'un concentrateur solaire avec poursuite à deux axes, sont représentées sur la figure 7, en fonction du temps pour le site de Ghardaïa. On peut remarquer que l'énergie solaire collectée par un système à concentration augmente avec la durée du jour et elle est inversement proportionnelle au facteur de trouble.

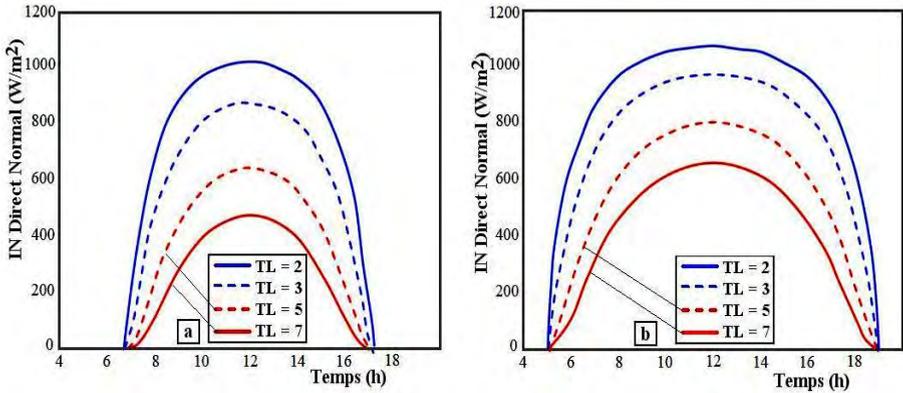
### 2.3 Modélisation de l'énergie solaire reçue

Par intégration numérique des puissances, entre le lever et le coucher effectif du soleil, on peut calculer pour un plan quelconque, les valeurs des énergies reçues:

$$EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss}) = \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} IB^h \times d\omega \quad (21)$$

La figure 8.a représente l'énergie directe journalière reçue par la surface d'ouverture horizontale d'un concentrateur solaire  $EB^h(\omega_{sr}, \omega_{ss})$  installée à Ghardaïa. Tandis que

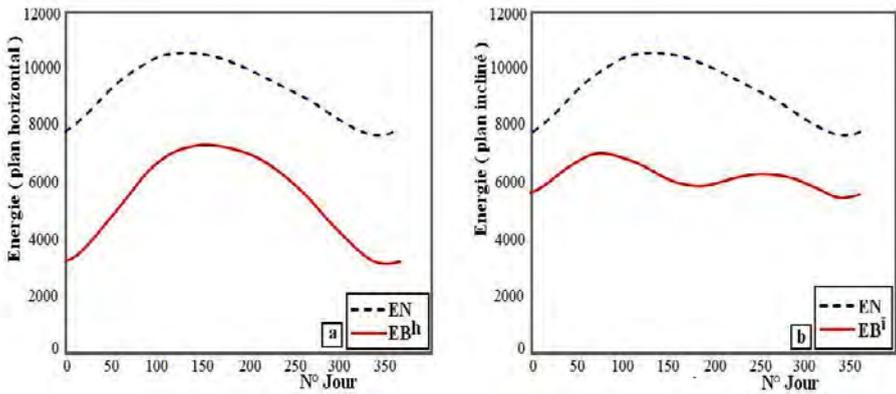
la figure 8.b, elle représente l'énergie directe journalière reçue par le concentrateur solaire incliné à la latitude  $EB^i(\omega_{sr}, \omega_{ss})$  en fonction du jour.



a- Jour le plus court (22 Décembre)

b- Jour le plus long (21 Juin)

Fig. 7: Variations de l'éclairement direct normal en fonction du facteur de trouble de Linke et du temps, pour le jour le plus court et le plus long de l'année



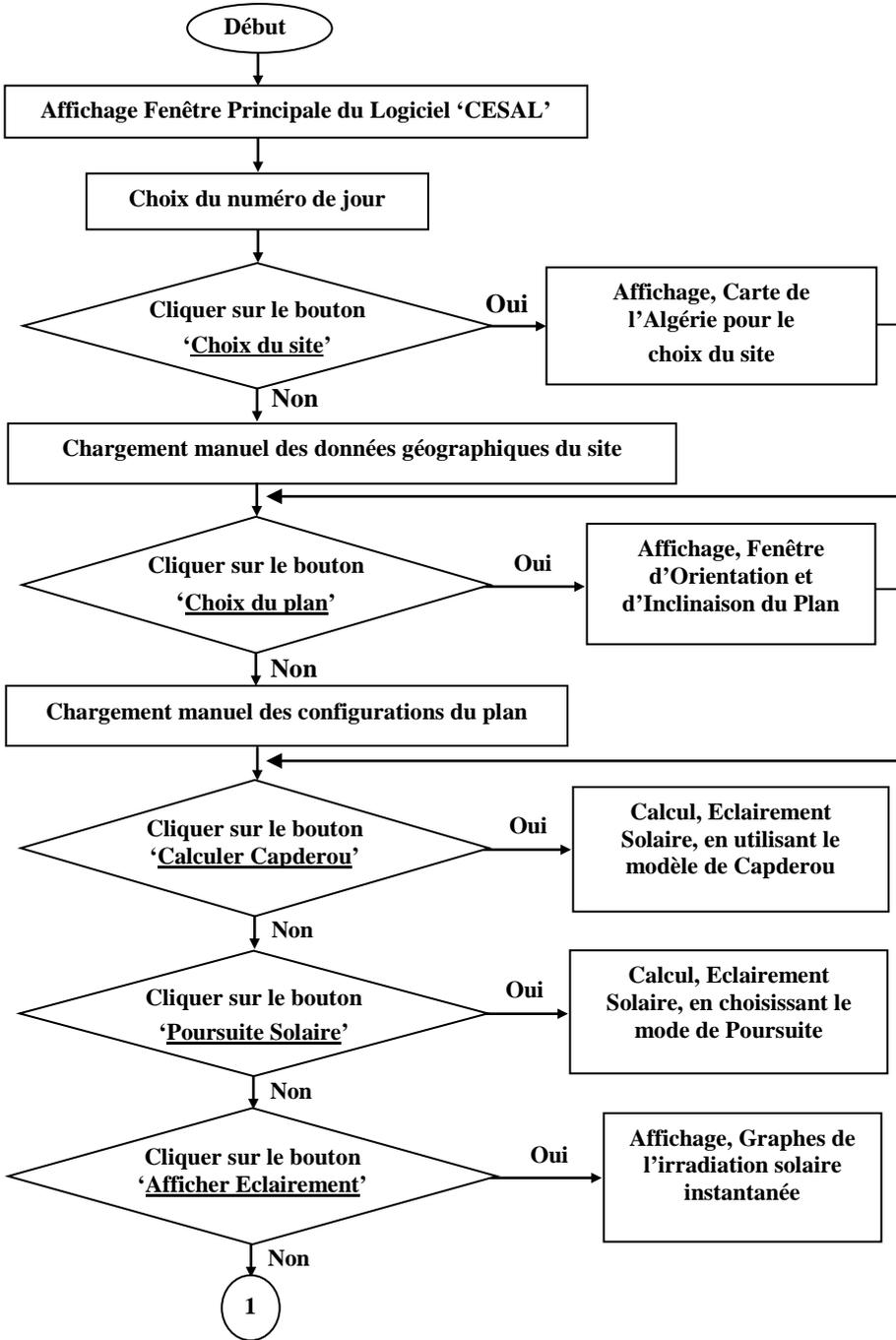
a- Concentrateur solaire horizontal

b- Concentration incliné à la latitude

Fig. 8: Variation de l'énergie reçue par un concentrateur solaire en fonction du jour

### 3. ORGANIGRAMME DU LOGICIEL CONÇU

Sur la figure 9, est représenté l'organigramme général de l'outil d'aide élaboré et utilisé comme logiciel de calcul de l'éclairement solaire, intitulé 'Calcul de l'Éclairement Solaire en Algérie', 'CESAL-2011', avec l'ensemble des fonctions.



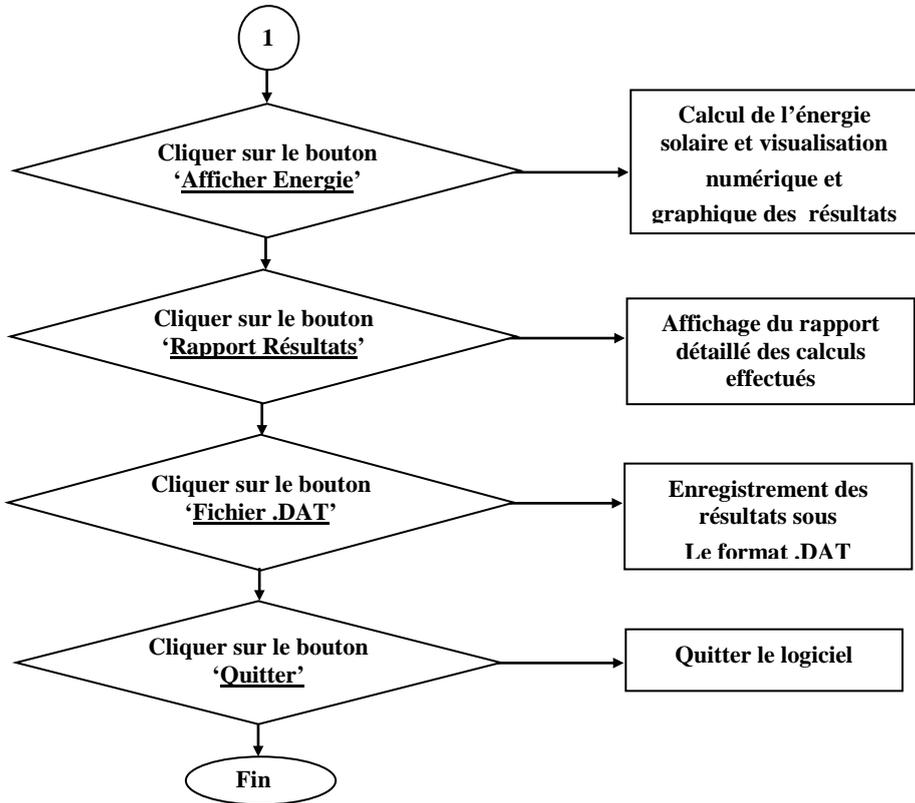


Fig. 9: Organigramme général du logiciel 'CESAL2011'

#### 4. PRESENTATION DE L'INTERFACE GRAPHIQUE DU LOGICIEL

Cette partie a pour but la présentation du logiciel dénommé CESAL2011 (Calcul de l'Éclairement Solaire en ALgérie), programmé en Borland Delphi 5 [9]3. Le logiciel élaboré permet le calcul de l'éclairement solaire en Algérie par le modèle de Capderou, et il est principalement destiné aux systèmes à concentration. Ce logiciel calcule l'éclairement solaire résultant des différents modes de poursuites solaires appliquées à ces systèmes. Une visualisation numérique et graphique des résultats obtenus est assurée et un rapport détaillé est établi par le logiciel.

##### 4.1 Fenêtre de calcul de l'éclairement solaire

Après l'exécution du logiciel 'CESAL2011', la fenêtre de présentation est affichée en premier lieu, par la suite la fenêtre de la figure 10 sera affichée. Depuis cette fenêtre, on peut calculer l'éclairement incident et l'énergie solaire reçue par le modèle Capderou en choisissant le type de poursuite solaire désirée et ceci pour n'importe quelle orientation et inclinaison du concentrateur solaire, et en intégrant les données relatives au site (latitude, longitude, altitude et albédo).

Une visualisation numérique et graphique des résultats est accessible, *en cliquant sur le bouton* **Afficher Rayonnement** *et* **Afficher Energie**, *et en permutant entre les différents onglets de la fenêtre. Un rapport détaillé des données et des résultats est réalisé, pour l'afficher cliquez sur le bouton* **Rapport Résultats**.

A la fin de chaque exécution un fichier .DAT contenant les résultats obtenus est créé, ce dernier est un fichier de base pouvant être utilisé par d'autres logiciels pour des applications solaires.

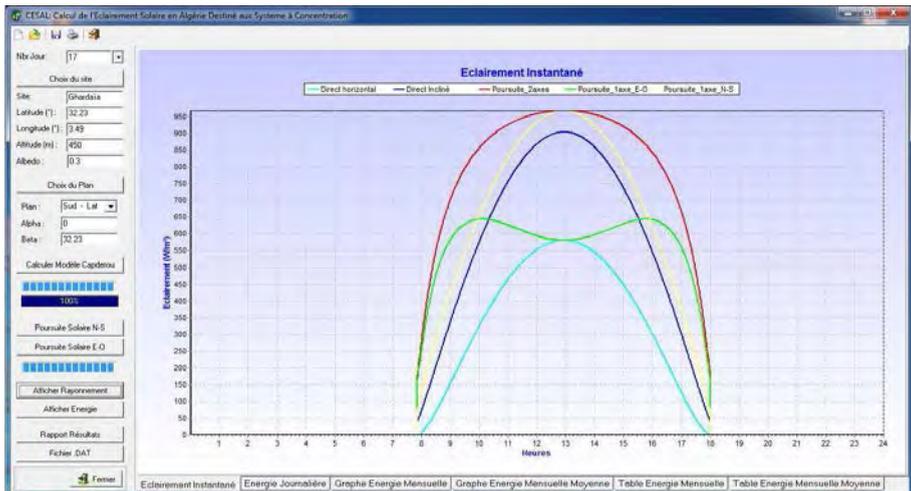


Fig. 10: Fenêtre de calcul de l'éclairement solaire, (Logiciel 'CESAL2011')

#### 4.2 Fenêtre de choix du site

Si un lieu est défini et ses coordonnées ne sont pas connues. Dans ce cas, il faut se servir du bouton **Choix du site** qui affichera la fenêtre de la figure 11. Cette fenêtre permet la sélection de n'importe quel site sur la carte de l'Algérie.

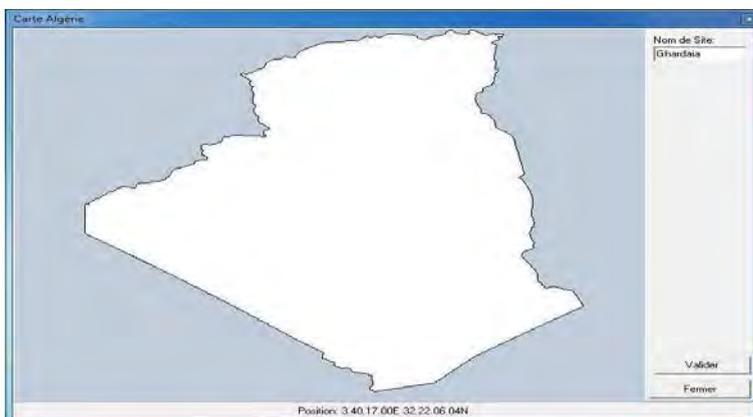
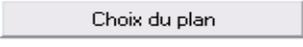


Fig. 11: Fenêtre de choix du site, (Logiciel 'CESAL2011')

### 4.3 Fenêtre de choix de la surface d'ouverture

Pour choisir une inclinaison et une orientation bien définie du concentrateur, il suffit de cliquer sur le bouton , qui affichera la fenêtre de la figure 12.

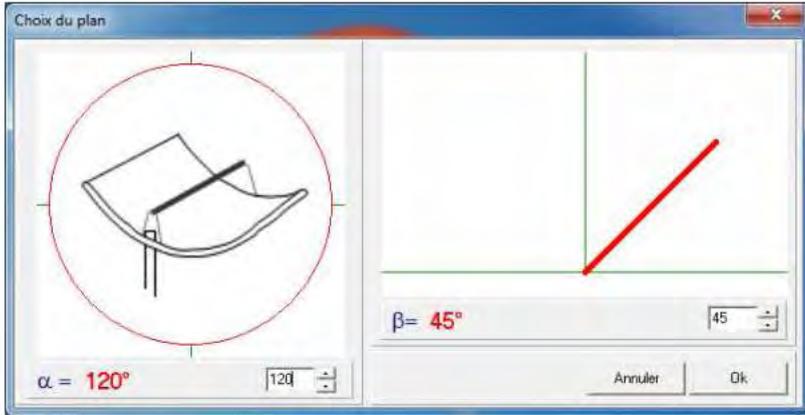


Fig. 12: Fenêtre de choix de l'inclinaison et l'orientation du concentrateur

## 5. TESTS ET RESULTATS

### 5.1 Données expérimentales

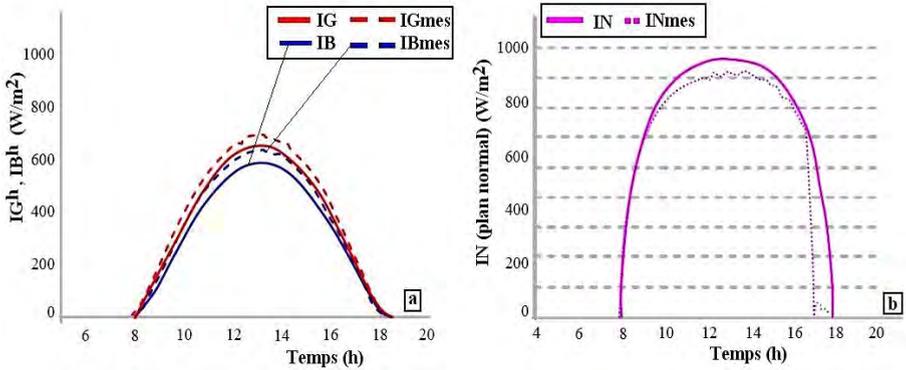
Actuellement, la mesure des données de l'éclairement solaire est effectuée d'une manière instantanée et sur certains sites de l'Algérie. Nous avons choisi le site de Ghardaïa (Lat: 32.23°N, Lon: 3.49°E et Alt: 450m) pour la validation de notre logiciel. Les données de l'éclairement solaire (global, diffus et direct normal) utilisées, après sélection des jours clairs, proviennent de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, 'URAER'.

### 5.2 Validation des résultats obtenus

Pour obtenir une validation de l'éclairement incident et de l'énergie solaire reçue, nous avons comparé quelques valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa, par ciel clair, de l'éclairement et de l'énergie solaire avec des valeurs calculées délivrées par le logiciel réalisé.

Par manque de données mesurées relatives aux deux cas de poursuite Nord-Sud et Est-Ouest, ainsi qu'à l'éclairement direct incident sur plan incliné  $IB^i$ , nous nous contenterons, de valider uniquement les données calculées de l'éclairement direct  $IB^h$ , de l'éclairement global horizontal  $IG^h$  et celui du direct normal IN (poursuite intégrale) dont les données mesurées sont disponibles.

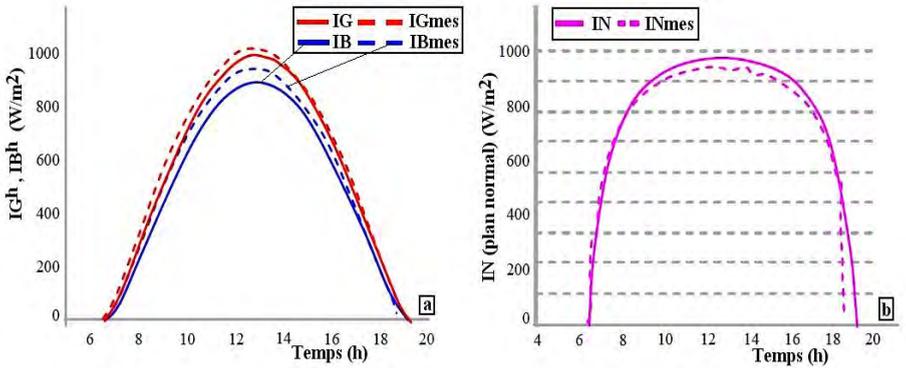
Nous donnerons, également certains résultats des autres cas de poursuite sous forme de graphes à partir du logiciel réalisé. Les graphes correspondants à certains jours clairs en hiver, en été, en automne et en printemps sont représentés, en fonction du temps, sur les figures 13-16.



a- Eclairage solaire horizontal

b- Poursuite solaire intégrale

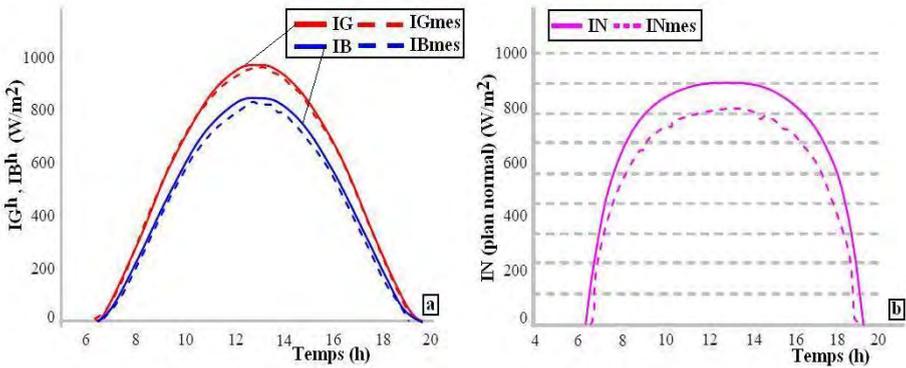
Fig. 13: Comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel avec les données expérimentales de l'éclairage solaire, Ghardaïa, jour clair en hiver



a- Eclairage solaire horizontal

b- Poursuite solaire intégrale

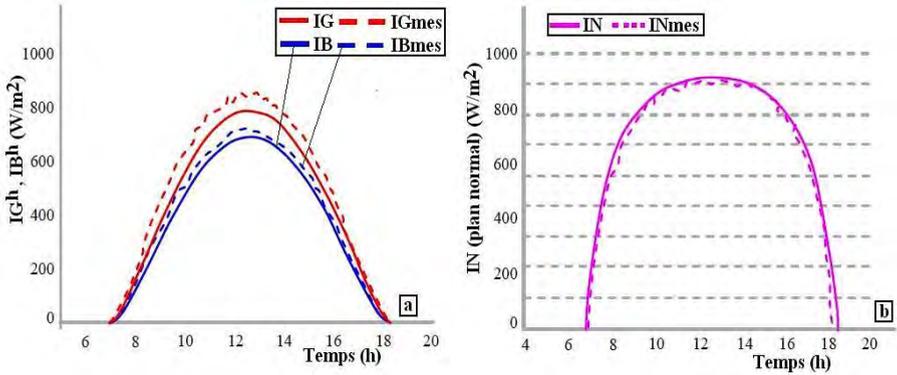
Fig. 14: Comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel avec les données expérimentales de l'éclairage solaire, Ghardaïa, jour clair au printemps



a- Eclairage solaire horizontal

b- Poursuite solaire intégrale

Fig. 15: Comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel avec les données expérimentales de l'éclairage solaire, Ghardaïa, jour clair en été



a- Eclairage solaire horizontal

b- Poursuite solaire intégrale

Fig. 16: Comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel avec les données expérimentales de l'éclairage solaire, Ghardaïa, jour clair en automne

Les figures 17 et 18 ci-après, représentent une comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel réalisé avec les données expérimentales relatives aux énergies directe  $EB^h$ , globale horizontale  $EG^h$  et incidente sur une surface d'ouverture normale  $EN$  (avec poursuite à deux axes), pour l'année 2009 à Ghardaïa.

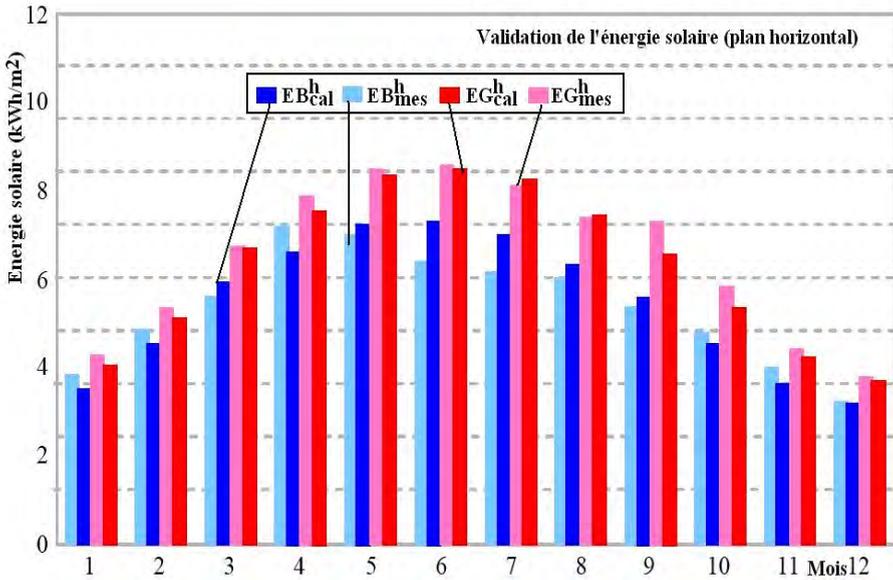


Fig. 17: Comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel avec les données expérimentales de l'énergie solaire directe et globale mensuelle moyenne reçue sur une surface d'ouverture horizontale d'un concentrateur solaire installé à Ghardaïa

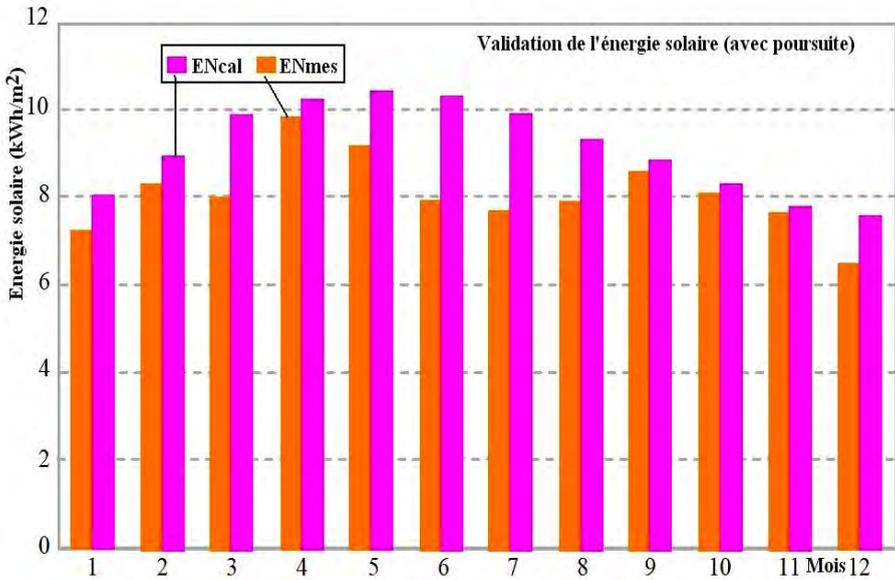


Fig. 18: Comparaison des résultats obtenus à partir du logiciel avec les données expérimentales de l'énergie solaire mensuelle moyenne reçue sur un concentrateur installée à Ghardaïa, avec poursuite solaire intégrale

### 5.3 Interprétation des résultats obtenus

Afin de pouvoir interpréter les résultats obtenus à partir du logiciel établi et après validation, de l'éclairage et de l'énergie solaire, il a été calculé l'erreur relative moyenne de l'énergie directe  $EB^h$ , globale horizontale  $EG^h$  et incidente sur une surface d'ouverture normale EN (avec poursuite intégrale), sur le site de Ghardaïa, pour l'année 2009. Les résultats obtenus sont regroupés dans le **Tableau 1** ci-après.

L'expression de l'erreur relative moyenne en (%) est donnée par la relation suivante:

$$Err_{moy} = \frac{|\Delta G|}{G_{mesurée}} = \frac{|G_{mesurée} - G_{calculée}|}{G_{mesurée}} \quad (22)$$

**Tableau 1:** Résultats de calcul des erreurs relatives des énergies mensuelles moyennes reçues sur un concentrateur installé à Ghardaïa, à incidence normale et horizontale, pour certains jours clairs

Err <sub>moy</sub>	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin
EG <sup>h</sup>	5.56	4.33	1.04	4.74	1.42	0.82
EB <sup>h</sup>	8.4	7.04	5.73	7.44	3.44	14.15
EN	12.57	8.78	24.84	4.67	14.38	30.82
EB_mod	19.95	22.77	0	18.54	4.87	0.79

EN_mod	6.21	15.04	13.42	12.91	0.22	7.17
Err <sub>moy</sub>	<b>Juil.</b>	<b>Août</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Déc.</b>
EG <sup>h</sup>	1.48	0.81	9.92	8.48	4.09	2.65
EB <sup>h</sup>	13.52	5.35	3.92	5.25	8.84	1.25
EN	29.78	18.41	3.96	2.84	2.35	
EB_mod	5.05	13.21	14.39	19.75	22.74	18.12
EN_mod	1.82	8.45	19.56	17.51	17.49	7.42

Sur les résultats du **Tableau 1**, on peut dire; d'une manière générale, que l'erreur relative moyenne des données traitées, jour par jour, des énergies directe, globale et incidente sur une surface d'ouverture normale obtenus à partir du logiciel établi est acceptable, acceptée pour les mois d'été où cette erreur peut atteindre les 30 %.

Ce cas de figure a pour cause le modèle utilisé, où nous avons déjà constaté que l'utilisation du modèle Capderou donne une estimation assez bonne de l'éclairement solaire pour les mois d'hiver par rapport aux mois d'été et ceci est dû à l'utilisation des formules empiriques pour le calcul du facteur de Linke (formules 7 à 10 précédentes), ce facteur se trouve donc modifié considérablement ces dernières années, principalement à cause des changements climatiques [10].

Nous avons donc l'idée de recalculer l'éclairement solaire avec l'expression (1) en changeant le facteur  $T_L$  et en le remplaçant -par exemple- par les valeurs du projet Soda [11], qui représentent des données satellitaires associées à des données de mesures au sol.

Nous donnons également les résultats obtenus à partir du logiciel élaboré, concernant l'énergie directe EB<sup>h</sup> et l'énergie directe incidente sur une surface d'ouverture normale EN, après modification du facteur de Linke, sur les lignes 4 et 5 du **Tableau 1**.

Nous constatons que nous avons passé d'une erreur relative moyenne de 30 % à 7 % pour le mois de juin -par exemple- ce qui est très intéressant. Même remarque pour tous les mois d'été à Ghardaïa (Mai, Juin, Juillet et Août) où l'erreur est minimisée d'une manière considérable et nous concluons que, pour les systèmes à concentration utilisant l'énergie incidente normale et directe.

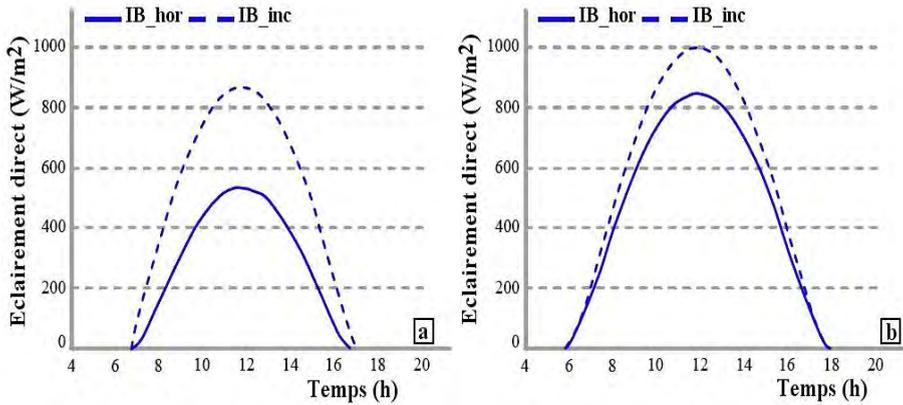
Il serait intéressant d'utiliser le modèle Capderou adapté pour l'Algérie pour le calcul de ces énergies et d'adopter la modification des valeurs du facteur de trouble de Linke.

#### 5.4 Quelques résultats du logiciel CESAL2011 pour les différents cas de poursuite

Les figures 19 et 20 ci-après, donnent un aperçu des résultats obtenus à partir du logiciel 'CESAL2011' correspondant à l'éclairement solaire direct incident sur la surface d'ouverture horizontale d'un système à concentration horizontale IB<sup>h</sup> et inclinée à la latitude IB<sup>i</sup>; sur le site de Ghardaïa, pour des jours typiques de l'année.

D'après ces résultats, on peut constater que pour un système à concentration poursuivant le soleil en continu, il serait intéressant d'incliner les capteurs et de les

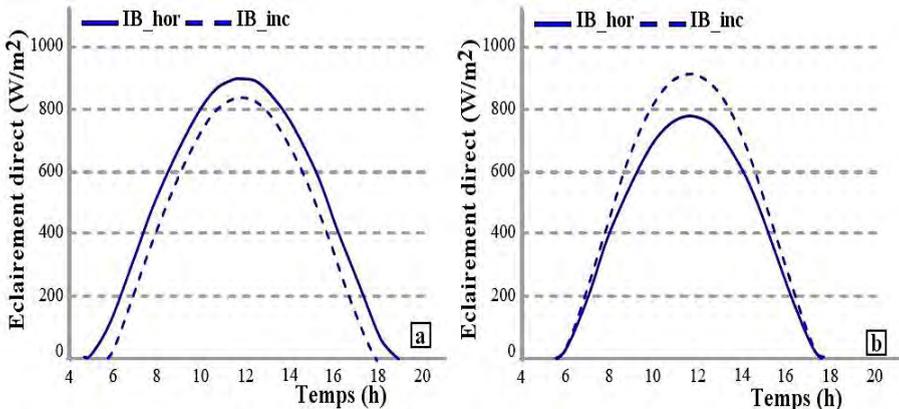
orienter plein Sud, cela permet de récupérer un supplément d'énergie par rapport à une surface d'ouverture horizontale, notamment en période hivernale là où la hauteur du soleil est faible.



a- Journée claire hivernale

b- Journée claire printanière

Fig. 19: Résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011', de l'éclairage solaire direct horizontal et incliné à la latitude de Ghardaïa pour un système à concentration



a- Journée claire estivale

b- Journée claire automnale

Fig. 20: Résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011', de l'éclairage solaire direct horizontal et incliné à la latitude de Ghardaïa pour un système à concentration

Les figures 21-24, représentent les résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011' pour les différents cas de poursuite étudiés précédemment (Intégrale, Nord-Sud, Est-Ouest) sur le site de Ghardaïa, pour quelques jours typiques de l'année, avec l'angle d'incidence des rayons du soleil correspondant à chaque cas.

Sur ces graphes, on peut remarquer facilement, que la poursuite Est-Ouest avec un concentrateur solaire incliné à la latitude du lieu et un axe de rotation horizontal donne un meilleur rendement pour toutes les saisons de l'année, après la poursuite à deux axes évidemment [  $\cos(\delta_i) = 1$  ], donc elle est plus intéressante du point de vue efficacité par rapport à la poursuite Nord-Sud.

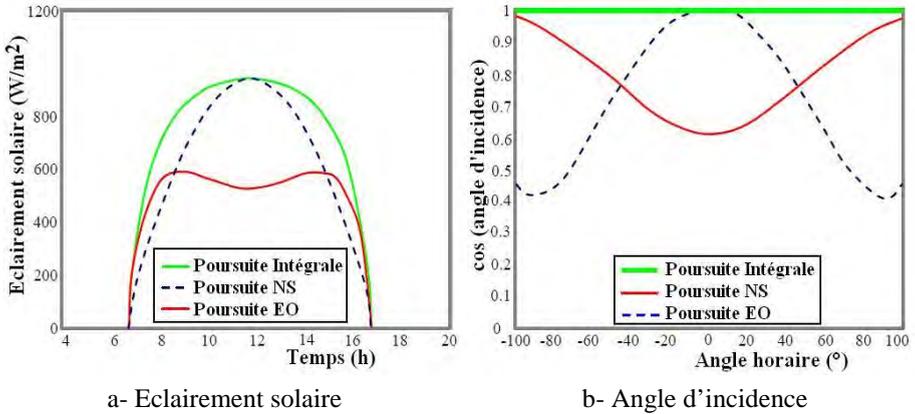


Fig. 21: Résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011', avec les autres cas de poursuite pour un système à concentration solaire, site de Ghardaïa et journée claire hivernale

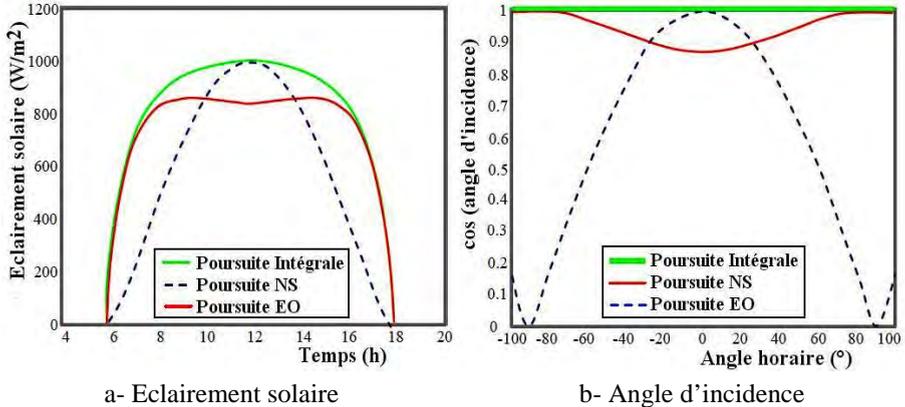


Fig. 22: Résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011', avec les autres cas de poursuite pour un système à concentration solaire, site de Ghardaïa et journée claire printanière

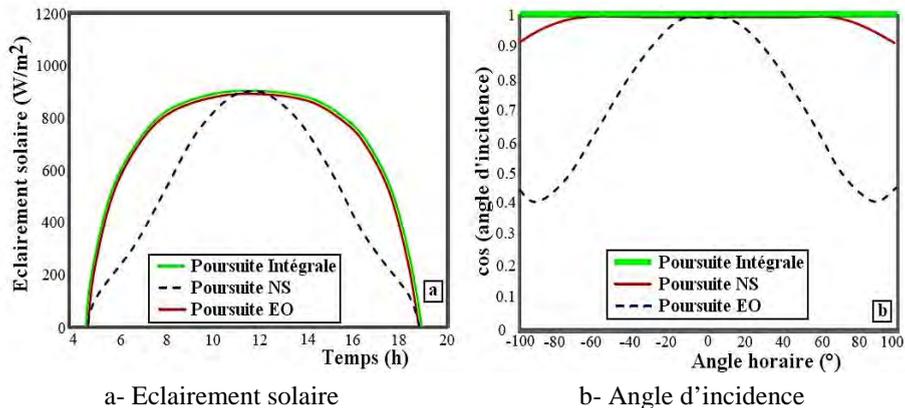


Fig. 23: Résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011', avec les autres cas de poursuite pour un système à concentration solaire, site de Ghardaïa et journée claire estivale

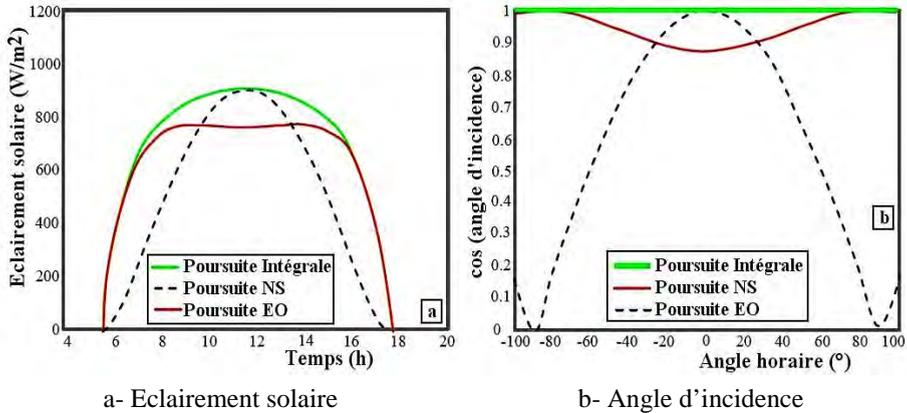


Fig. 24: Résultats obtenus du logiciel 'CESAL2011', avec les autres cas de poursuite pour un système à concentration solaire, site de Ghardaïa et journée claire automnale

## 6. CONCLUSION

Dans cet article, il a été développé et présenté un outil de calcul de l'éclairement solaire destiné aux systèmes à concentration, et ceci pour n'importe quel site de l'Algérie et pour n'importe quelle orientation et inclinaison du concentrateur. Le logiciel réalisé 'CESAL2011' est d'une utilisation simple. Il permet une visualisation numérique et graphique des résultats obtenus de l'éclairement et de l'énergie solaire des différents cas de poursuites appliquées aux systèmes à concentration (poursuite intégrale, poursuite Est-Ouest et poursuite Nord-Sud).

Pour la validation de notre logiciel, nous avons comparé des valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa; par ciel clair, de l'éclairement et de l'énergie solaire avec des valeurs calculées et effectuées par le logiciel élaboré. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et nous pouvons dire que le logiciel réalisé est un outil intéressant et indispensable destinée aux systèmes à concentration solaire.

## NOMENCLATURE

T <sub>SV</sub>	Temps solaire vrai	N	Numéro du jour
$\varphi$	Latitude du lieu	z	Altitude du lieu
$\omega$	Angle horaire	$\delta$	Déclinaison solaire
$\omega_{sr}$	Angle horaire du lever du soleil	$\omega_{ss}$	Angle horaire du coucher du soleil
$\gamma_s$	Hauteur du soleil	$\delta_i$	Angle d'incidence
$\chi$	Azimut du soleil	$\alpha$	Orientation du plan
$\beta$	Inclinaison du plan	$\gamma$	Hauteur, normale du plan
T <sub>0</sub>	Trouble dû à l'absorption par la vapeur d'eau	$\delta_R$	Epaisseur optique de Rayleigh
T <sub>1</sub>	Trouble relatif à la diffusion moléculaire	T <sub>2</sub>	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols

$m_A$	Masse d'air optique	$T_L$	Facteur de trouble de Linkle
$A_{he}$	Alternance hiver - été	$I_0$	Constante solaire, W/m <sup>2</sup>
$\varepsilon$	Facteur d'excentricité	$G_0$	Eclairement extraterrestre
$IB_h$	Puissance de l'éclairement direct horizontal	$IN$	Puissance de l'éclairement normal
$EB_h$	Energie directe reçue sur une surface d'ouverture horizontale	$EN$	Energie directe normale reçue sur une surface d'ouverture avec poursuite
$EB_h$	Erreur relative moyenne	$G$	Valeur d'une grandeur considérée

## REFERENCES

- [1] A. Ferrière, 'Les Centrales Solaires Thermodynamiques: l'Etat de l'Art et les Perspectives Mondiales', Colloque de l'Institut ENSAM de Corse, Bastia, 2005.
- [2] M. Geyer, 'Report on the SolarPACES, Start Mission to Algeria', IEA SolarPACES, USA, 34 p., 2003.
- [3] Document, 'Bilan Energétique National de l'Année 2005', Ministère de l'Energie et des Mines, Direction des Energies Nouvelles et Renouvelables, 2006.
- [4] A. Ferrière et G. Flamant, 'Captation, Transformation et Conversion de l'Energie Solaire par Les Technologies à Concentration', IMP-CNRS, Centre du Four Solaire, France, 2004.
- [5] A. Boudghene Stambouli, 'Algerian Renewable Energy Assessment: The Challenge of Sustainability'. Energy Policy, 2010. doi:10.1016/j.enpol.2010.10.005.
- [6] A. Mefi, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf. 'Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 2, N°2, pp. 69 - 85, 1999.
- [7] M. Capderou, 'Atlas Solaire de l'Algérie. Modèles Théoriques et Expérimentaux', Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [8] F. Kasten, 'A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for Determining the Linke Turbidity Factor', Meteorologische Rundschau, Vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [9] S. Teixeira and X. Pacheco, 'Borland Delphi 6 Developer's Guide', Indiana, USA, 1200 p., 2002.
- [10] F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, 'Etude Comparative de Deux Modèles de Calcul du Rayonnement Solaire par Ciel Clair en Algérie', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 12, N°2, pp. 331 - 346, 2009.
- [11] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuissou and L. Wald, 'Converting a Successful Research Project into a Sustainable Service: The Case of the SoDa Web Service', Environmental Modelling and Software, Vol. 21, N°11, pp. 1555 - 1561, 2006.