

# Estimation du potentiel solaire d'Ambositra

P. B. Randriamanampisoa<sup>1</sup>, D. Razafindrazanokolona<sup>2</sup>, B. Rahelirilalao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doctorant, École Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université d'Antananarivo

Correspondant : [leibenildex@gmail.com](mailto:leibenildex@gmail.com)

<sup>2</sup> Maître de conférences, laboratoire de chimie appliquée, université de Fianarantsoa

<sup>3</sup> Professeur Titulaire, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo

## Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables comme sources d'énergie permet de réduire la demande énergétique en matière d'hydrocarbures et la diminution des gaz à effet de serre. L'énergie fournie par le soleil est plus de 11 000 fois supérieure à la demande énergétique mondiale actuelle. De par sa situation géographique, Madagascar dispose d'un potentiel solaire énorme. Dans ce travail, nous nous intéressons au gisement solaire de divers sites, présentant de climats différents, par la réalisation d'un outil de simulation du rayonnement solaire global. Les estimations ont été effectuées à l'aide du modèle de « Perrin de Brichambaut ». Nous avons conçu une interface graphique avec le langage de programmation Python. Le logiciel « Solar\_rad » permet une visualisation de l'énergie solaire numériquement et graphiquement. Nous pouvons l'utiliser pour un temps donné et il permettra à tout utilisateur d'avoir des informations préalables avant d'entamer un projet solaire. Nous avons enregistré pour le cas d'Ambositra avec une valeur moyenne journalière de 5.54 kWh/m<sup>2</sup>/j. Il prend sa valeur optimale en mois de novembre environ 6.89 kWh/ m<sup>2</sup> /j tandis que le mois de juin est le plus faible environ 3.87 kWh/m<sup>2</sup>/j. Une comparaison entre des valeurs de l'éclairement solaire dans le logiciel de gestion d'énergie « RETScreen » et des valeurs calculées a été effectuée afin de valider l'outil.

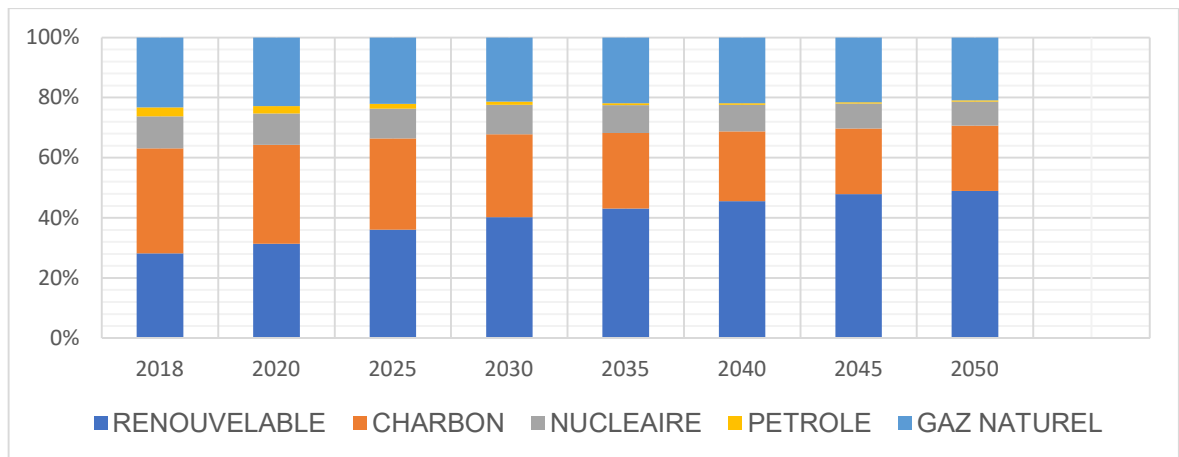
**Mots clés :** Rayonnement solaire, Perrin de Brichambaut, Simulation, Solar\_rad, RETScreen.

## Abstract

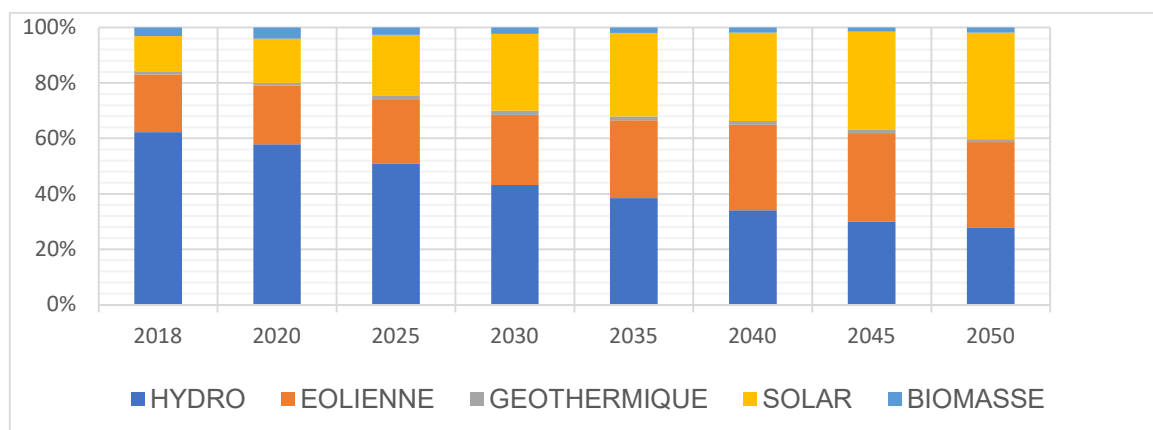
The use of renewable energies as an energy source reduces the energy demand for hydrocarbons and the reduction of greenhouse gases. The energy from the sun is more than 11,000 times greater than the current global energy demand. Thank to its geographic position, Madagascar has an enormous solar potential. In this work, we are interested in the valuation of the solar deposit in various sites, in different climates, by the realization of a radiation simulation tool. We created a graphical interface with Python programming language and the calculations were carried out using the "Perrin de Brichambaut" model. The realized software "Solar\_rad" allows visualization of solar energy numerically and graphically. We can use it for any time and it will allow any users to have prior information before starting a solar project. We registered for the case of Ambositra with an average daily value of 5.54 kWh/m<sup>2</sup>/d. It takes its optimal value in the month of November around 6.89 kWh/m<sup>2</sup> /d while the month of June is the lowest around 3.87 kWh/m<sup>2</sup>/d. A comparison between values of solar irradiance in software RETScreen and calculated values was performed in order to validate this tool.

## 1. Introduction

Les efforts de recherche pour produire de l'électricité en minimisant les émissions de carbone comme l'utilisation des énergies renouvelables nous aident à réduire le changement climatique. Selon l'EIA (EIA, 2018), l'énergie renouvelable occupe le 29% de l'énergie utilisée dans le monde et prévue d'attendre le 49% en 2050 (**figure 1**). Samuel (Samuel, 2013) a affirmé que l'énergie fournie par le soleil est plus de 11 000 fois supérieure à la demande énergétique mondiale actuelle. Cette énergie peut être exploitée de diverses façons, les plus connues étant le solaire thermique (chauffe-eau, chauffage solaire, centrales solaires thermodynamiques) et la conversion photovoltaïque. La demande énergétique mondiale en énergie renouvelable est représentée par la **figure 2**. Le photovoltaïque peut atteindre le 38% de demande énergétique mondiale en 2050. (EIA, 2018)



**Figure 1: Demande énergétique mondiale depuis 2018 (EIA, 2018)**

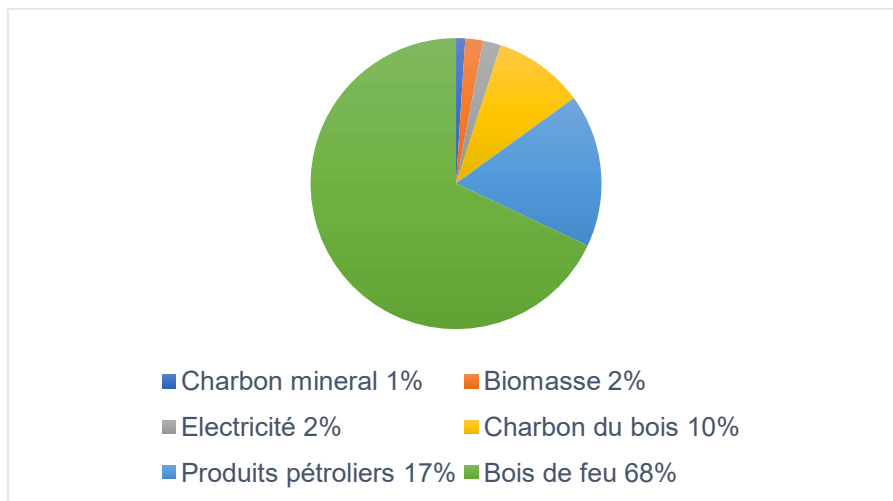


**Figure 2: Demande énergétique mondiale en énergie renouvelable depuis 2018 (EIA,2018)**

À Madagascar, différentes sources d'énergies sont utilisées pour satisfaire les besoins dans l'accomplissement de diverses activités. La **figure 3** représente la prédominance de l'utilisation du bois comme source d'énergie. Cependant, de par sa situation géographique, Madagascar dispose d'un potentiel solaire énorme presque toutes les régions du pays, plus de 2.800 heures d'ensoleillement annuel totalisant 2.000 kWh/ m<sup>2</sup> /an. Cette énergie est exploitée actuellement sous exploitée, notamment en matière de production d'électricité.

Le réseau national de mesures météorologiques se caractérise par un faible nombre en stations radiométriques, ainsi la collecte des différentes données météorologiques et radiométriques est rare. 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 la réalisation d'un outil informatique, permettant le calcul de l'éclairement solaire par n'importe quel type de ciel et sur n'importe quel site.



**Figure 3: Consommation en énergie à Madagascar**

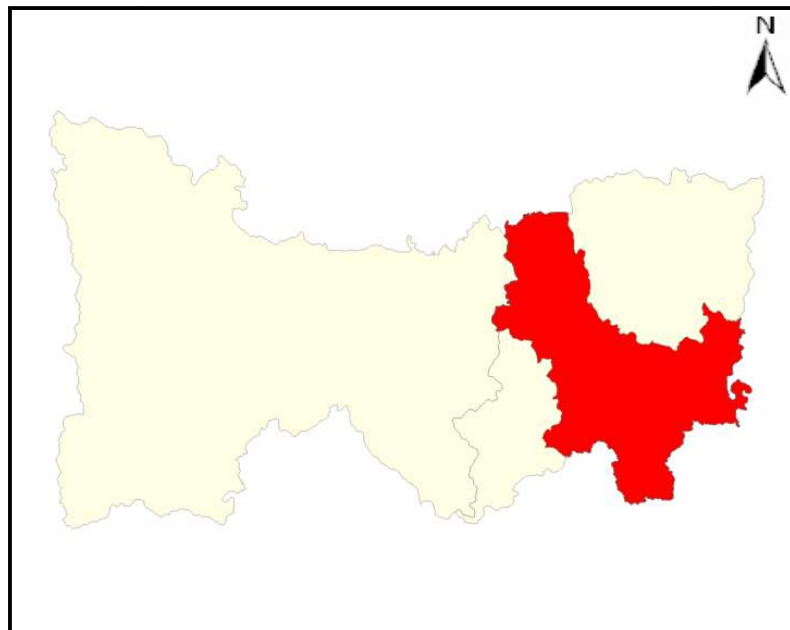
## 2. Méthode et Matériel

### 2.1. Sites d'étude

Le district d'Ambositra se trouve au centre de Madagascar situé dans la région d'Amoron'i Mania et dans la province de Fianarantsoa. Il se trouve entre 20°31'49" Sud de latitude ( $\Phi$ ) et 47°14'36" Est de longitude (L) avec une altitude de 1318m. Son climat de type tropical humide et d'altitude est caractérisé par la présence de deux saisons bien marquées :

- ❖ Saison chaude et pluvieuse qui s'étend du mois d'octobre au mois d'avril.
- ❖ Saison sèche et fraîche qui va du mois de mai au mois de septembre.

La **figure 4** présente la carte de localisation de district d'Ambositra.



**Figure 4: Carte de localisation d'Ambositra**

### 2.2. Modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT

Il existe plusieurs modèles pour estimer le rayonnement solaire reçu sur un plan incliné d'un angle «  $i$  » par rapport à l'horizontal et orientée vers une direction faisant un angle «  $Y$  ». C'est une méthode pour estimer l'ensoleillement journalier sur un plan horizontal ou incliné au temps donné d'un lieu. Il est fonction des paramètres météorologiques du lieu. Selon l'étude réalisée par Noureddine (Noureddine, 2012), les résultats expérimentaux comparés à ceux de la simulation montrent que l'utilisation des modèles de Perrin de BRICHAMBAUT s'avère fiable pour la détermination du rayonnement solaire global.

#### 2.2.1. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$$G^* = S^* + D^*$$

### 2.2.2. Rayonnement solaire direct sur un plan incliné

L'éclairement solaire reçu sur un plan incliné d'un angle « i » par rapport à l'horizontal est

$$S^* = I^* \times C_i$$

$C_i$  : coefficient d'incidence

$I^*$  : rayonnement solaire direct sur une surface horizontale

### 2.2.3. Rayonnement solaire direct sur une surface horizontale

Le rayonnement solaire direct est le rayonnement incident sur un plan donné provenant du soleil. Il parvient en ligne droite et par temps clair, sans subir aucune déviation. Il est donné par la formule suivante (Jannot, 2011) :

$$I^* = I_0 \times e^{-(m_{\text{air}} T_L \sigma_R)}$$

$I_0$  : éclairement solaire perpendiculaire à la surface

$M_{\text{air}}$  : masse atmosphérique

$T_L$  : facteur de trouble de Linke

$\sigma_R$  : épaisseur optique de Rayleigh

#### Valeur de $I_0$

$I_0$  désigne l'éclairement solaire reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite de l'atmosphère en fonction du jour de l'année. Il est exprimé par la relation suivante :

$$I_0 = C_{\text{sol}} \times \left(1 + 0.0334 \times \cos\left(\frac{360 \times (n - 2.7206)}{365.25}\right)\right)$$

$C_{\text{sol}}$  : constante solaire

$n$  : numéro du jour de l'année

#### Masse atmosphérique

C'est la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer. Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil à l'aide des points O, A et M. A une pression  $P$  et à une altitude  $z$ , elle est donnée par la formule suivante (Yettou, 2011) :

$$m_{\text{air}} = \frac{P_{\text{atm}}}{101325 \times \sin(h) + 15198.75 \times (3.885 + h)^{-1.253}}$$

$P_{\text{atm}}$  : pression atmosphérique du milieu

$h$  : hauteur du soleil

## Hauteur du soleil

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal du lieu. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante : (MERINO, 2013)

$$h = \text{Arcsin}[\sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\delta)\cos(\omega)]$$

$\phi$  : Latitude du lieu

$\delta$  : Déclinaison horaire

$\omega$  : Angle horaire du soleil

## Déclinaison solaire

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, on adopte la convention compter positivement les latitudes de l'hémisphère Nord qui compris entre 0° à l'équateur et +90° au pôle Nord, et négativement celle de l'hémisphère Sud qui compris entre 0° à l'équateur et -90° au pôle Sud, et variée tout au long de l'année entre deux valeurs extrêmes 23.45°.

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

$n$  : nombre du jour de l'année

## Angle horaire du soleil

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu et celui contenant la direction du pôle céleste et celle du soleil. L'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation :

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

## Temps Solaire Vrai

C'est le temps légal corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée donc à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil.

$$\text{TSV} = \text{TL} - \text{DH} + \frac{\text{L}}{15} + \frac{\text{ET}}{60}$$

TL : Temps légal

DH : Décalage Horaire

ET : Equation du Temps

## Temps Solaire Moyen

La rotation de la terre autour des pôles, introduit la notion de « Temps Solaire Moyen ». La journée solaire moyenne est le temps qui sépare, en moyenne, deux passages successifs du soleil au méridien d'un lieu. On définit le Temps Solaire Moyen par la différence entre le temps universel et la correction de longitude, il est donné par :

$$TSM = TU + \frac{L}{15}$$

TU : Temps Universel

L : Longitude du lieu

## Equation du Temps

Cet écart entre le Temps Solaire Moyen et le Temps Solaire Vrai est désigné sous le terme équation du temps. Elle s'exprime par la relation suivante, dans laquelle ET est donnée en minutes :

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.35 \cos(B) - 1.5 \sin(B)$$

Dans laquelle  $B = \frac{360}{365} \times (n - 81)$

n : Le nombre du jour de l'année

La durée d'ensoleillement se calcule par la relation suivante :

$$D_0 = \frac{2}{15} \text{Arcos}(-\tan(\phi) \tan(\delta))$$

## Temps solaire vrai lever et coucher du soleil

Le temps solaire vrai lever et coucher du soleil sont donnés par les formules suivantes :

$$TSV_{\text{lever}} = 12 - \frac{\arccos(\tan \phi \tan \delta)}{15}$$

$$TSV_{\text{coucher}} = 12 + \frac{\arccos(\tan \phi \tan \delta)}{15}$$

## Facteur de Trouble de Linke TL

Par définition, le facteur de Linke est le nombre d'atmosphères idéales superposées qui entraîne la même atténuation que l'atmosphère réelle. Il permet de calculer les composantes directes et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par ce facteur (Yaïche 2010).

$$T_L = 2.4 + 14.6 \beta + 0.4(1 + 2 \beta) \ln(Pv)$$

Avec  $\beta$  est le coefficient de trouble atmosphérique

**Tableau 1: Valeur du coefficient de trouble atmosphérique**

LIEU	Valeur de $\beta$
Montagne	0,02
Rural	0,05
Urbain	0,10
Industriel	0,20

Pression partielle de vapeur d'eau [mm Hg]

$$P_v = P_{sv} \times H_R$$

Avec  $H_R$  est l'humidité relative exprimée en %

Pression de vapeur saturante : [mm Hg]

$$P_{sv} = 2.165 \times \left(1.098 + \frac{T_{\text{air}}}{100}\right)^{8.02}$$

$T_{\text{air}}$  : Température de l'air en °C

### Epaisseur optique de Rayleigh

En 1922, Linke définit l'épaisseur optique de Rayleigh  $\delta_R$  comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols.

$$\sigma_R = \frac{1}{0.9m_{\text{air}} + 9.4}$$

### Coefficient d'incidence $C_I$

C'est l'angle formé par le rayonnement solaire avec le plan perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil et son azimut, d'autre part par l'orientation et l'inclinaison du plan récepteur.

$$C_I = \sin(i) \times \cos(h) \times \cos(\gamma - a) + \cos(i) \times \sin(h)$$

$i$  : angle d'inclinaison du capteur qui est l'angle entre la normale au plan et la verticale du lieu.

$\gamma$  : angle d'orientation de la surface qui est l'angle que fait la projection de la normale du plan incliné avec le méridien dans le plan horizontal. Il prend les valeurs suivantes :

- 0 pour une orientation vers le Sud
- 90 pour une orientation vers l'Est
- 180 pour une orientation vers le Nord
- -90 pour une orientation vers l'Ouest

$a$  : azimut du soleil

$h$  : hauteur du soleil



#### 2.2.4. Rayonnement solaire diffus horizontal

C'est le rayonnement solaire qui arrive sur le plan récepteur après avoir été diffusé par les nuages, les poussières, les aérosols et réfléchi par le sol. L'éclairement solaire diffus est obtenu par :

$$D^* = 125 \times \sin(h)^{0.4} \times \left(1 + \frac{\cos(i)}{2}\right) + 211.86 \times \sin(h)^{1.22} \times \left(1 - \frac{\cos(i)}{2}\right)$$

#### 2.2.5. Facteur d'atténuation des couches nuageuses

Ce facteur met en évidence l'action des couches nuageuses sur l'irradiation reçu au sol. Il est donné par la relation :

$$K_C = 1 - 0.75 \left(\frac{N}{8}\right)^{3.4}$$

#### Degré de nébulosité N

Il désigne le rapport entre la surface de la voûte céleste couverte par des nuages, et la surface totale. Ses valeurs dépendent donc du taux de couverture du ciel. Il est exprimé par les prévisionnistes en octas huitième de ciel, une valeur de 8 indique que le ciel est complètement opaque et une valeur de 0 qu'il est complètement dégagé. Le **tableau 2** donne un aperçu des termes utilisés dans les prévisions météorologiques pour décrire le degré de nébulosité.

**Tableau 2: Degré de nébulosité**

Termes utilisés	Partie du ciel non visible du fait de la présence de nuages[octas]
Ciel serein	0
Légèrement nuageux	1 à 2
Partiellement nuageux	3 à 5
Très nuageux	6 à 7
Couvert	8

#### 2.2.6. Irradiation solaire journalière

L'irradiation solaire journalière est l'énergie reçue par un plan récepteur pendant une journée. Elle est donnée par la formule :

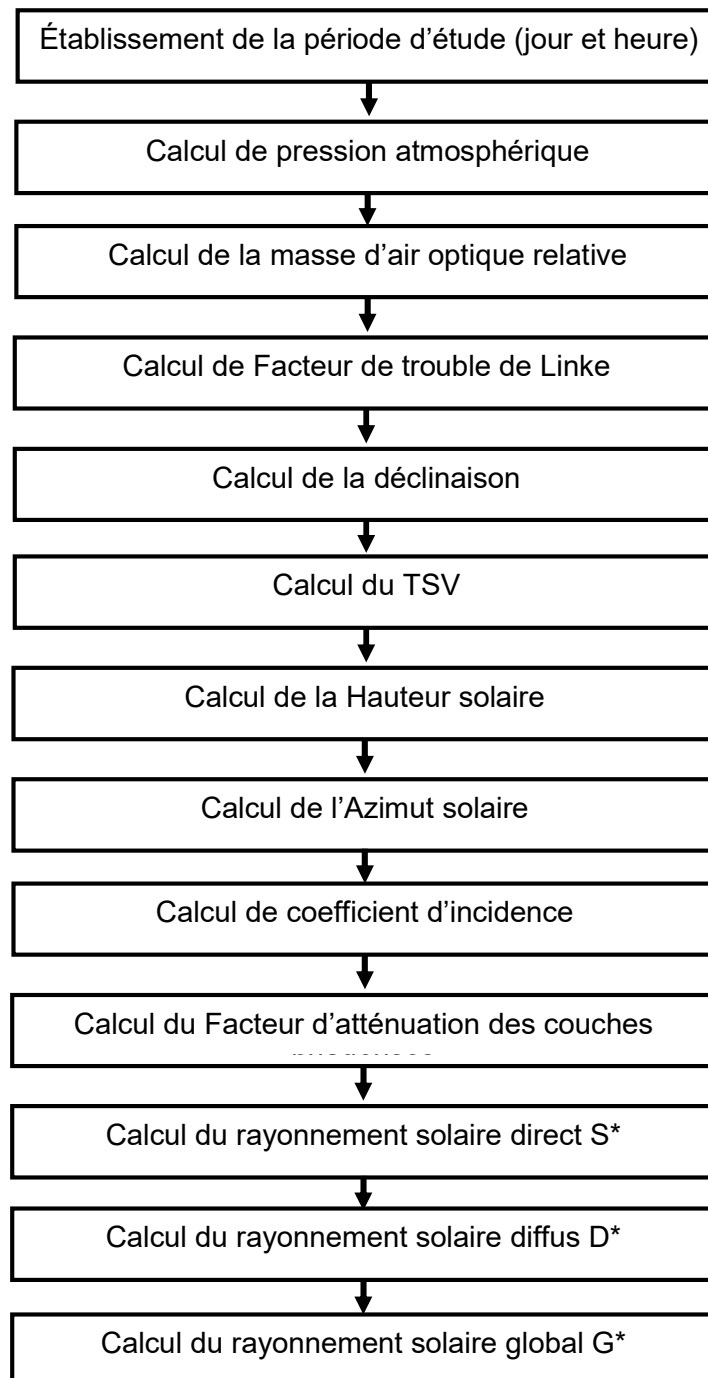
$$G = \int_{TSV_1}^{TSV_2} \dot{G} dt = \int_{TSV_1}^{TSV_2} \frac{K_c \times 2 \times G^*}{\Pi} dt$$

$K_c$  : facteur d'atténuation des couches nuageuses

$G^*$  : rayonnement solaire global en  $W/m^2$

$t$  : temps

La **figure 5** suivante représente l'organigramme pour l'estimation de rayonnement solaire.



**Figure 5: Schéma fonctionnel du modèle de Brichambaut**

### 3. Résultats

Après l'exécution du logiciel « Solar\_rad », la fenêtre de présentation est affichée en premier lieu, par la suite la fenêtre de la **figure 6** sera affichée. Depuis cette fenêtre, on peut calculer le rayonnement solaire par le modèle de BRICHAMBAUT en intégrant les données relatives au site (latitude, longitude, altitude) et en choisissant l'orientation et l'inclinaison de surface.

The screenshot shows the Solar\_rad software interface. On the left, there are input fields for various parameters: Temps Légal (with sub-fields for Heure and Minute), Date, Mois, Fuseau Horaire, Choix du site, Altitude, Latitude, Longitude, Etat du ciel, Humidité relative, Température de l'air, Inclinaison, and Orientation. On the right, there is a 'Résultats' section with a table showing numerical results for N° du jour, Déclinaison horaire, Angle horaire, Hauteur du soleil, Azimut, and Rayonnement. Below the table is an 'Effacer' button. Further down, there is a 'Graphique' section with a plot titled 'REPRESENTATION GRAPHIQUE DE RESULT' showing 'Température en °C' on the y-axis. Below the plot are buttons for 'Rayonnement global', 'Température de l'air', 'Humidité relative', and 'Hauteur du soleil'.

**Figure 6: Fenêtre de logiciel Solar\_rad**

On utilise la partie gauche pour l'insertion et la sélections des données (**Figure 7**) et la partie droite contient le tableau qui illustre les résultats numériques (**Figure 8**) et graphiques (**Figure 9**)

La **figure 10** montre l'interface pour l'insertion et la sélection des entrants. On clique sur le bouton **Calculer** pour exécuter le calcul et le bouton **Initialiser** pour effacer tous les entrants.

	Heure	Mo
Temps Légal	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Date	<input type="text"/>	
Mois	<input type="text"/>	▼
Fuseau Horaire	<input type="text"/>	▼
Choix du site	<input type="text"/>	▼
Altitude	<input type="text"/>	
Latitude	<input type="text"/>	
Longitude	<input type="text"/>	
Etat du ciel	<input type="text"/>	▼
Humidité relative	<input type="text"/>	
Température de l'air	<input type="text"/>	
Inclinaison	<input type="text"/>	
Orientation	<input type="text"/>	▼

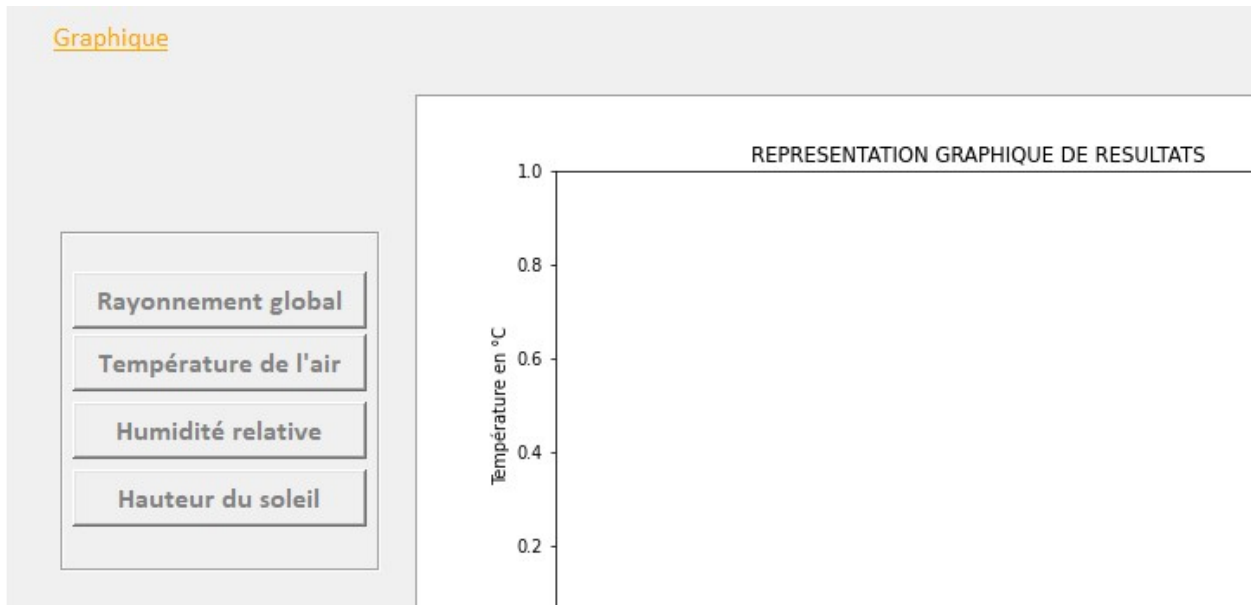
**Figure 7: Interface pour les entrants**

Après l'exécution de calcul, les résultats sont affichés dans le tableau qui est représenté par la **figure 8** suivante.

Résultats					
N° du jour	Déclinaison horaire	Angle horaire	Hauteur du soleil	Azimut	Rayonnement Gl
-	[Angle en°]	[Angle en°]	[Angle en°]	[Angle en°]	[W/m2]

**Figure 8: Tableau des résultats sous Solar\_rad**

La **figure 9** donne les résultats graphiques sur la variation du rayonnement solaire global, la température de l'air, l'humidité relative et la hauteur du soleil en cliquant sur chaque bouton.



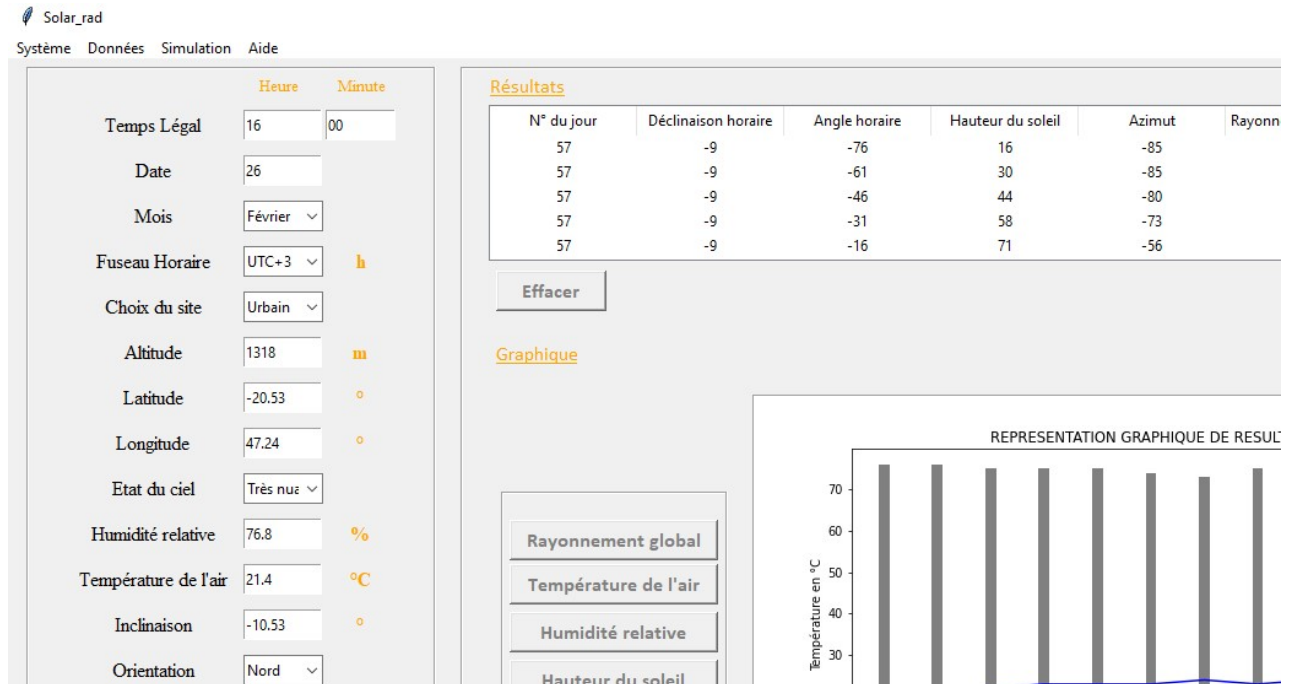
**Figure 9: Résultats graphiques sous Solar\_rad**

Les données obtenues sont enregistrées dans un fichier Excel en consultant le menu « données » « Système Données Simulation » et en cliquant sur le bouton « exporter » de la fenêtre historique. Le bouton « Effacer les données » permet de supprimer toutes les données enregistrées dans les bases de données. La **figure 10** montre la fenêtre de l'historique de données dans le logiciel.



**Figure 10: Fenêtre de l'historique sous Solar\_rad**

En suivant la procédure de l'utilisation de notre logiciel « solar\_rad » citée précédemment, on obtient les valeurs de la déclinaison horaire, l'angle horaire, hauteur de soleil, l'azimut, le rayonnement global ainsi qu'irradiation solaire journalière. Les résultats graphiques sont représentés par une courbe et un histogramme. La fenêtre de notre logiciel après l'exécution de calcul est illustrée par la **figure 11**.



**Figure 11: Fenêtre de Solar\_rad après le calcul**

Toutes les données climatiques insérer dans ce logiciel et les données de simulation sont enregistrées dans un fichier Excel.

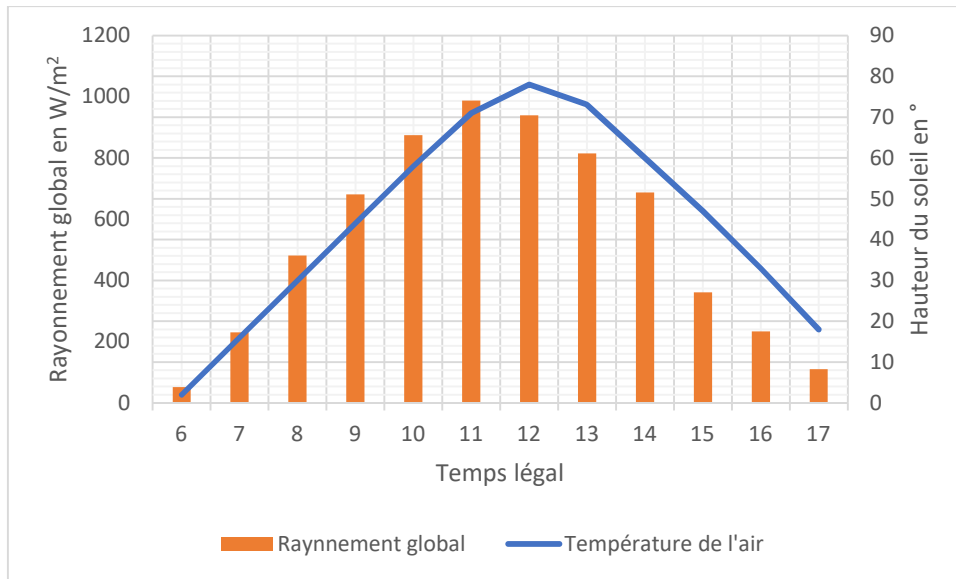
La **figure 12** représente la feuille Excel après l'exécution de notre fichier.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1				TL	Latitude	Longitude	Tempétur	Humidité relative	Déclinaisc	Angle hor	Hauteur d	Azimut	
2		22:30:22	13-06-202	6	-20	47	21	76	-9	-91	2	-	
3		22:30:22	13-06-202	7	-20	47	21	76	-9	-76	16	-	
4		22:30:22	13-06-202	8	-20	47	22	75	-9	-61	30	-	
5		22:30:22	13-06-202	9	-20	47	23	75	-9	-46	44	-	
6		22:30:22	13-06-202	10	-20	47	23	75	-9	-31	58	-	
7		22:30:22	13-06-202	11	-20	47	23	74	-9	-16	71	-	
8		22:30:22	13-06-202	12	-20	47	24	73	-9	-1	78	-	
9		22:30:22	13-06-202	13	-20	47	23	75	-9	13	73	-	
10		22:30:22	13-06-202	14	-20	47	24	76	-9	28	60	-	

**Figure 12: Feuille Excel de la base des données**

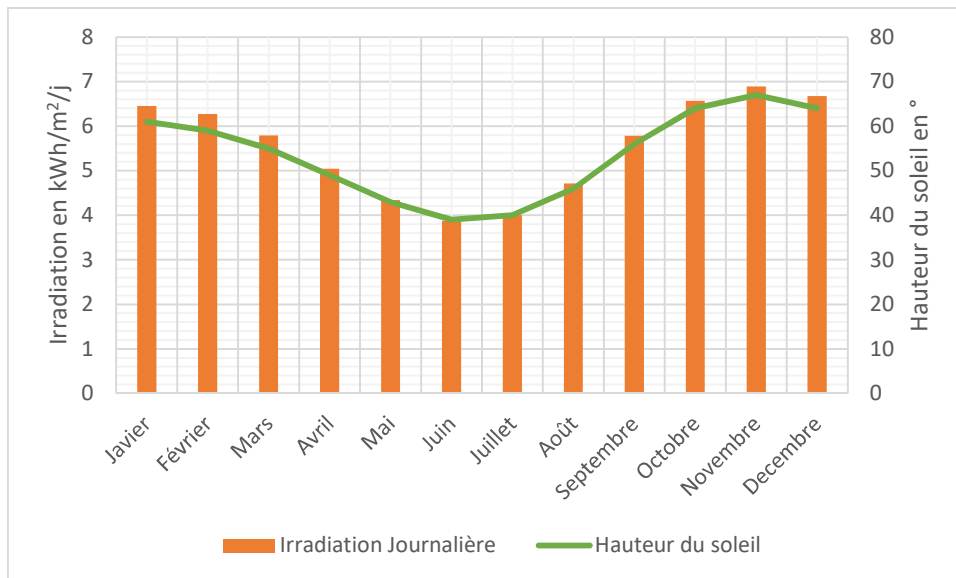
La variation de rayonnement global du 26 février 2021 à Ambositra est représenté par la **figure 13** suivante :



**Figure 13: Rayonnement global du 26 février 2021**

On constate que le rayonnement global varie en fonction de l'état du ciel. Il prend sa valeur maximale vers midi et il est proportionnel avec la hauteur du soleil durant toute la journée.

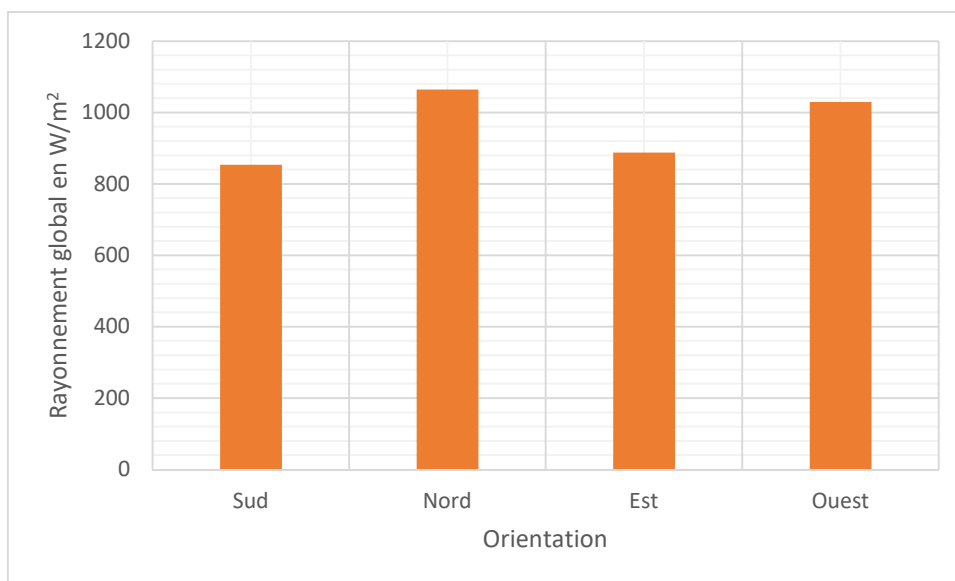
La **figure 14** suivante représente l'irradiation journalière pour l'année 2021 à Ambositra.



**Figure 14: Irradiation journalière pour l'année 2021.**

La valeur moyenne de l'irradiation journalière est environ  $5.54 kWh/m^2/j$ . Il prend sa valeur optimale en mois de novembre tandis qu'il est faible en mois de juin.

La **figure 15** représente la variation du rayonnement solaire en fonction de l'orientation de la surface le 26 février 2021 à 11 h 00.



**Figure 15: rayonnement solaire en fonction de l'orientation**

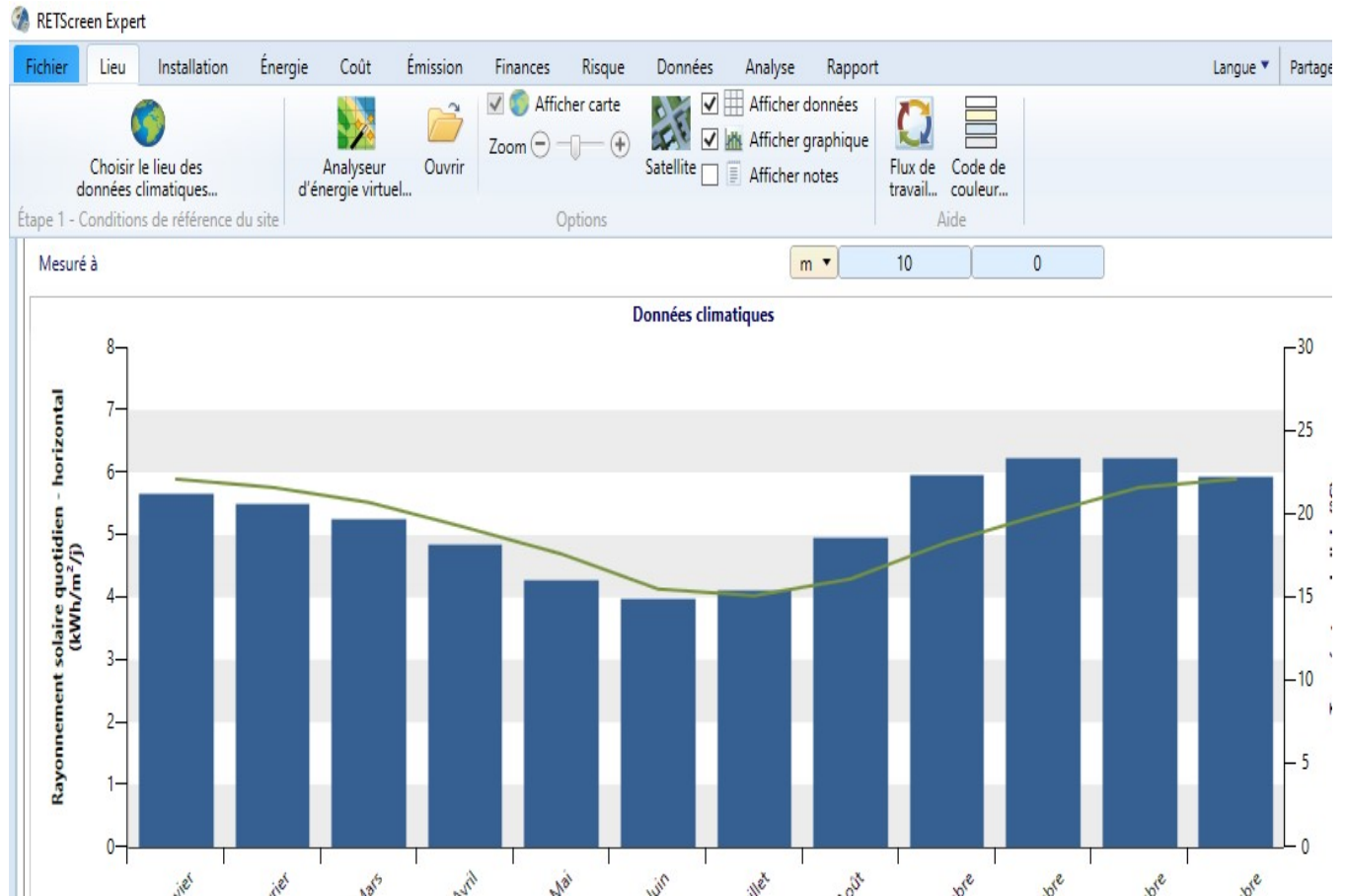
Le rayonnement global est maximum pour l'orientation Nord tandis qu'il est faible pour l'orientation sud.



#### 4. Discussion

Selon l'étude réalisée par Nouredine (Nouredine, 2012), les résultats expérimentaux comparés à ceux de la simulation montrent que l'utilisation des modèles de Perrin de BRICHAMBAUT s'avère fiable pour la détermination du rayonnement solaire global.

La **figure 16** représente la variation de l'irradiation solaire journalière dans RETScreen.



**Figure 16: Données de simulation sous RETScreen**

RETScreen est un logiciel de gestion d'énergie propres très utilisé à Canada. En comparant nos résultats (**figure 14**) avec celle de ce logiciel, nous pouvons dire que les valeurs sont presque identiques avec une différence l'ordre de 0.5 kWh/m<sup>2</sup>/j. Pour obtenir des données dans RETScreen, il suffit de choisir le site qui est déjà intégré dans ce logiciel. Il n'est qu'est 41 districts Malgache. Malgré, Ambositra n'est pas inclus et on utilise Fandriana comme référence de la Station.

## 5. Conclusion

Ce travail vise à concevoir une interface très simple à utiliser pour estimer le rayonnement solaire pour n'importe quel site et pour n'importe quelle orientation et inclinaison. Les coordonnées géographiques et les paramètres météorologiques sont les données utilisées pour le calcul. Nous devons insérer le temps légal et la date. Il suffit de choisir le mois et le type du ciel. Ce logiciel calcule les valeurs de la déclinaison horaire, l'angle horaire, la hauteur du soleil, l'azimut, le rayonnement global ainsi qu'irradiation solaire journalière. Les résultats numériques sont représentés graphiquement et les données obtenues sont enregistrées dans une base de données et nous pouvons l'ouvrir en feuille Excel pour faciliter l'analyse.

. Nous avons enregistré pour le cas d'Ambositra avec une valeur moyenne journalière de  $5.54 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ . Il prend sa valeur optimale en mois de novembre environ  $6.89 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  tandis que le mois de juin est le plus faible environ  $3.87 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$ .

Pour la validation de notre logiciel, nous avons comparé nos valeurs avec celle dans le logiciel RETScreen. Les résultats obtenus sont très satisfaisants et nous pouvons dire que le logiciel réalisé est un outil intéressant et indispensable.

### **Références bibliographiques**

- Alain Ricaud. Gisement solaire et transferts énergétiques, France. Pages 27, 2011.
- Energy Information Administration (EIA), 2018 <http://www.eia.gov>
- Fatiha Yettou. Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairage solaire en Algérie. Page 5, 2011.
- Luis MERINO. Modélisation du rayonnement solaire pour la simulation thermique en milieu urbain. Pages 12, 2013.
- M.R Yaïche. Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. Page 2, 2010.
- Moumami Noureddine. Réalisation d'une interface de simulation des performances des isolateurs plans. Page 39, 2012.
- Samuel DE SOUSA. Ingénierie, synthèse et étude de chromophores organiques et organométalliques pour cellules solaires à colorant. Université de Bordeaux ,2013.
- Yves Jannot,. Thermique solaire, Pages 16,17, 2011