

Estimation de l'Irradiation Solaire par la Logique Floue

M. Drif & M. Chikh

Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340 Alger, Algérie

Résumé - Dans le présent travail, nous présentons un algorithme pour l'estimation de l'irradiation solaire globale journalière en fonction de la durée d'ensoleillement, basé sur les concepts de la logique floue.

Plusieurs chercheurs notamment : Soler (1960), Gopinathan (1988), Ogelman et al. (1984) ont établi un modèle linéaire réunissant l'irradiation solaire globale journalière à la durée d'ensoleillement avec une erreur standard notable, alors que l'algorithme de la logique floue apporte une nette amélioration et une performance relative considérable.

Mots clés : Irradiation solaire - Durée d'ensoleillement - Logique floue.

1. INTRODUCTION

L'arrivée de radiation solaire à la surface de la terre est soumise à beaucoup d'effets non linéaires, complexes et partiellement incertains dans l'atmosphère. Après la pénétration de l'irradiation solaire dans la troposphère, plusieurs pertes apparaissent qui peuvent être dues à l'absorption, réflexion ou à des effets de filtrage. Ces phénomènes locaux se produisent à cause de l'existence de poussière, humidité, les nuages et l'épaisseur de ses couches, aérosols et le gradient de température dans l'atmosphère. De plus, les enregistrements de l'irradiation solaire incluent des incertitudes dues aux erreurs de la mesure. Depuis que l'irradiation solaire est corrélée avec la durée d'ensoleillement, beaucoup de chercheurs ont commencé avec Angström (1924) qui a essayé de standardiser l'irradiation solaire avec l'irradiation globale sous ciel clair et la durée d'ensoleillement avec une longueur du jour astronomique. Il a suggéré une relation linéaire pour estimer l'irradiation solaire globale, H, en fonction de la durée d'ensoleillement, S :

$$\frac{H}{H_0} = a + b \frac{S}{S_0} \quad (1)$$

où H_0 est l'irradiation globale sous ciel clair reçue sur une surface horizontale au niveau du sol et S_0 la durée de l'ensoleillement mesurée, a et b sont des paramètres du modèle. Les proportions sur les deux côtés de l'équation varient entre zéro et un. Ce cas de relation linéaire a été fréquemment utilisé dans le monde entier pour estimer l'irradiation globale dans des sites où les données mesurées de la durée d'ensoleillement sont disponibles. Les paramètres a et b ont été estimés dans la littérature par les techniques de régression. Beaucoup de chercheurs [1] (Soler, 1960; Gopinathan, 1988; Rietveld, 1978; Sabbagh et al., 1977; Swartman et Ogunlade, 1967; Dogniaux et Lemonie, 1983) ont considéré d'autres facteurs météorologiques supplémentaires à l'équation (1) pour le but d'augmenter la précision dans l'estimation des coefficients. Bien que chacun de ces chercheurs a essayé d'estimer ces coefficients par la méthode des moindres carrés. Dans quelques études, le calcul de l'erreur standard sur la durée d'ensoleillement était recommandée pour une meilleure estimation des paramètres du modèle a et b (Ogelman et al., 1984).

La plupart des modèles décrits dans la littérature relie l'irradiation globale à la durée d'ensoleillement tout en ignorant quelques facteurs météorologiques tel que l'humidité

relative, température maximale, latitude, etc. En fait, chacun de ces facteurs contribue d'une manière notable dans l'estimation de l'irradiation globale et leur négligence introduit des erreurs dans les prédictions. Par exemple, le modèle dans l'équation (1) assume que si tous ces autres facteurs météorologiques sont constants alors l'irradiation horizontale globale est proportionnelle à la durée d'ensoleillement uniquement.

Les effets de ces autres variables météorologiques apparaissent dans l'augmentation de l'écart entre le modèle et les données réelles mesurées. Dans l'approche floue, il n'y a aucun paramètre de modélisation, mais toutes les incertitudes et complications du modèle sont incluses dans la procédure de description de la déduction floue sous la forme de déclarations **IF - THEN** comme sera expliqué dans ce papier plus tard.

2. CONCEPT DE LA LOGIQUE FLOUE

Les bases de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi A. Zadeh [2]. A cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. Dès 1974, on trouve les premières applications industrielles, notamment dans le domaine de la robotique. Dans la logique classique ou booléenne, tout élément d'un ensemble n'admet qu'une seule valeur 1 ou 0, or dans la logique floue, un ensemble A de l'univers de discours $U=\{x\}$ est défini comme une distribution par laquelle chaque valeur de x est assignée un nombre quelconque dans l'intervalle $[0, 1]$, indiquant le degré d'appartenance de x à l'ensemble A , c'est-à-dire :

$$A = \{x \in U / \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (2)$$

Ainsi, un concept flou n'a de sens qu'à la condition que l'on puisse préciser:

- l'univers U de discours des éléments x , considérés,
- les fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ des éléments $x \in U$, à l'ensemble flou A .

Afin de mettre en évidence le principe de la logique floue, on présente un exemple simple, celui de la classification des personnes en trois ensembles « jeune », « entre deux âges » et « âgé ». Une telle classification peut être décrite en utilisant la fonction d'appartenance illustrée dans la figure ci-après (figure 1).

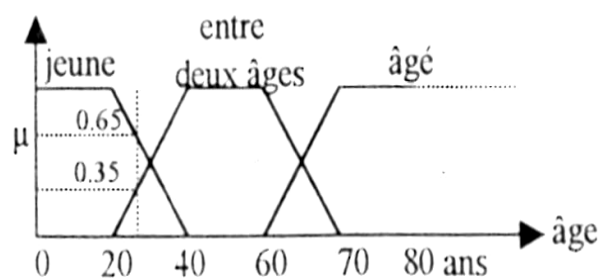


Fig. 1: Fonction d'appartenance

A titre d'exemple, une personne de 25 ans appartient à l'ensemble « jeune » avec $\mu=0.75$ de la fonction d'appartenance et l'ensemble « entre deux âges » avec $\mu=0.25$. Evidemment la forme de la fonction d'appartenance n'est pas rigide et peut dépendre du contexte envisagé, à savoir professionnel, sportif ou autre.

2.1 Le modèle flou

En général, tout système physique modélisable (linéaire ou non linéaire) peut se décomposer en trois éléments inter-liés

- **INPUT** (variable d'entrée),
- **MODELE** (formulation mathématique),
- **OUTPUT** (variable de sortie).

En cas d'une non linéarité ou en l'absence d'un modèle mathématique décrivant un système physique, la logique floue peut être une alternative d'un tel système, à la condition qu'on doit disposer des informations de base sur notre système (par exemple : données expérimentales). Le modèle flou peut être décrit par le schéma synoptique suivant (figure 2).

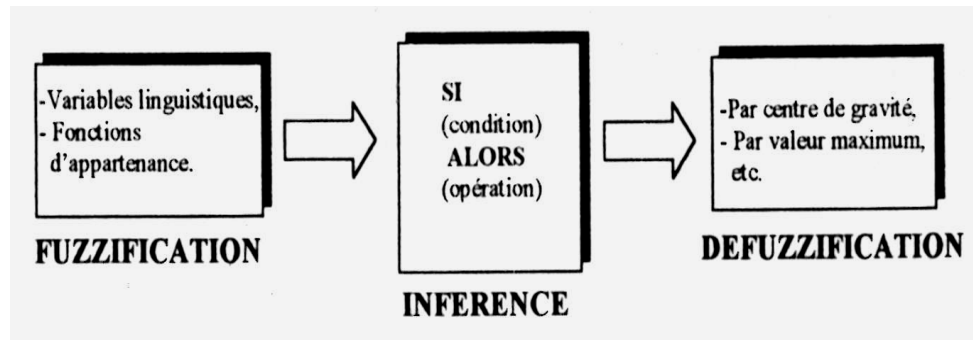


Fig. 2: Schéma synoptique du modèle flou

Fuzzification : c'est la définition des variables linguistiques et leurs fonctions d'appartenance

Inférences : c'est l'établissement des règles d'inférence sous la forme : **SI ... ALORS**

Déffuzzification : c'est la détermination de la variable de sortie par le calcul sur centre de gravité, ou par la valeur maximale ...etc.

2.2 Etude de cas

Pour élucider l'application de la logique floue, on se propose de reproduire la fonction non linéaire obtenue de l'expérience $Y=f(X)$. X et Y sont les deux variables linguistiques de la fonction $Y=f(X)$ donnée en figure 3.

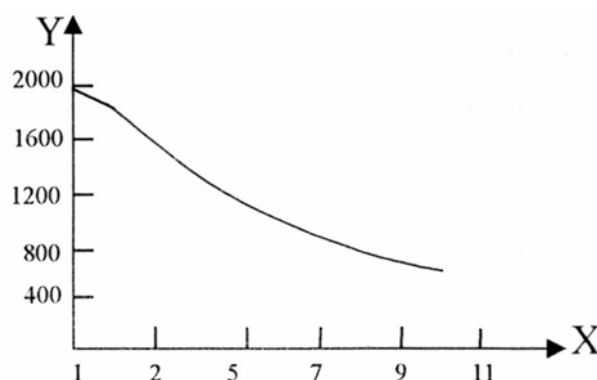


Fig. 3: Fonction $Y=f(X)$

On remarque que les gammes de variation des variables linguistiques X et Y sont 0-10 et 0-2000 respectivement.

La subdivision des deux variables en un nombre bien défini de sous-ensembles flous dépend essentiellement d'une étude d'expertise.

A titre d'exemple une telle fonction peut être subdivisée comme suit (figure 4) :

- **X** contient six sous-ensembles flous : **EZ** (égal zéro), **TP** (très petit), **P** (petit), **M** (moyen), **G** (grand), **TG** (très grand).
- **Y** contient cinq sous-ensembles flous : **EZ** (égal zéro), **P** (petit), **M** (moyen), **G** (grand), **TG** (très grand).

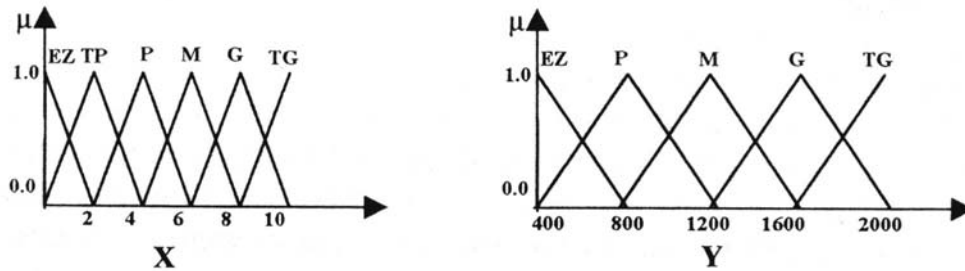


Fig. 4: Sous-ensembles flous des variables X et Y

Les règles d'inférence possibles sont : $5 \times 6 = 30$. Or six règles d'entre elles sont réalisables :

- R₁ : SI (X est EZ) ALORS (Y est TG)**
ET
- R₂ : SI (X est TP) ALORS (Y est G)**
ET
- R₃ : SI (X est P) ALORS (Y est M)**
ET
- R₄ : SI (X est M) ALORS (Y est P)**
ET
- R₅ : SI (X est G) ALORS (Y est EZ)**
ET
- R₆ : SI (X est TG) ALORS (Y est EZ)**

En appliquant ces règles d'inférence, on obtient la courbe estimative de la fonction $Y=f(X)$ (figure 5).

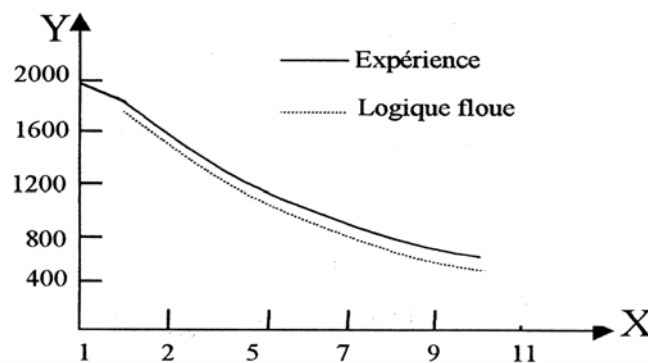


Fig. 5: Estimation de la fonction $Y=f(X)$

3. ALGORITHME FLOU POUR L'ESTIMATION DE L'IRRADIATION SOLAIRE

L'algorithme flou développé a été appliqué aux données expérimentales relatives au site de Bouzaréah (figure 6). Après avoir effectué un traitement et une étude statistique sur les données expérimentales (durée d'insolation et irradiation solaire globale horizontale) du site de Bouzaréah (Latitude = 36.41°), il ressort que la durée d'insolation moyenne maximale est de l'ordre de 12 heures et l'irradiation solaire peut atteindre une valeur moyenne de 9 kWh/m^2 .

Le modèle flou exprimant la relation entre les deux paramètres en question s et H se traduit par l'algorithme décrit ci-dessous.

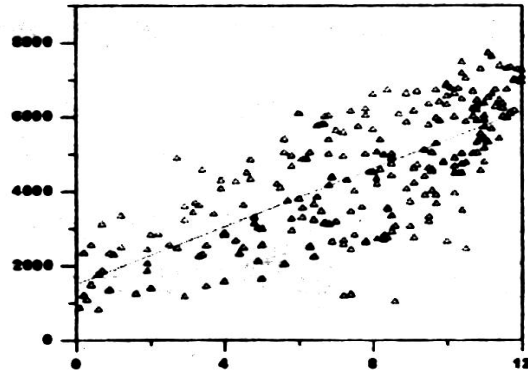


Fig. 6: L'irradiation solaire en fonction de la durée d'insolation (site de Bouzaréah)

Cet algorithme flou a été implémenté sous forme de schéma blocs en exploitant le Toolbox 'Fuzzy logic' du logiciel Matlab/Simulink version 5.2.

Etape 1 : (Fuzzification) : c'est la définition des fonctions d'appartenance des deux variables linguistiques s et H).

Dans notre cas, nous avons considéré pour les deux variables linguistiques, sept (07) sous ensembles flous de formes triangulaires $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$ et s_7 ; $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ et H_7 (figure 7).

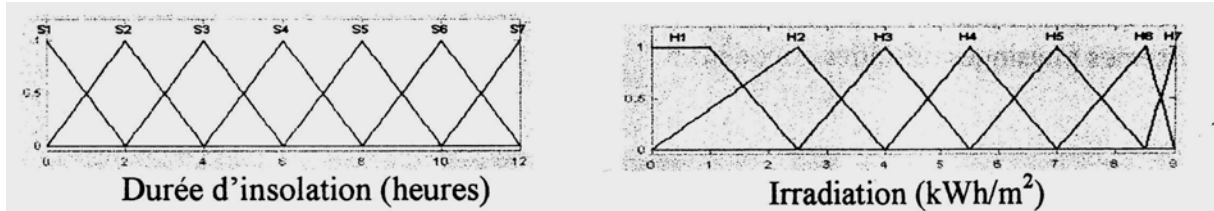


Fig. 7: Fonctions d'appartenance de s et H

Pour la durée d'insolation mesurée $s_m = 4.3$ heures, on obtient deux fonctions d'appartenance $\mu_{s3}=0.85$ et $\mu_{s4}=0.15$ notées α et β respectivement, sachant que α et $\beta = 1$.

Etape 2 : (Inférence)

La relation durée d'insolation/irradiation solaire s'exprime par les règles d'inférence suivantes:

$$R_i : \text{SI (s est } s_i \text{ et } s_{i+1}) \text{ ALORS (H est } H_i \text{ et } H_{i+1}) \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)$$

En utilisant l'équation (3), on obtient les deux sous ensembles flous H_3 et H_4 correspondant aux deux fonctions d'appartenance μ_{s3} et μ_{s4} précédemment déterminées.

L'intersection des deux valeurs $\alpha=0.85$ et $\beta=0.15$ avec H_3 et H_4 respectivement donnent les valeurs suivantes : $H_{\alpha 1}=3.775$ et $H_{\alpha 2}=4.225$ et $H_{\beta 1}=4.225$ et $H_{\beta 2}= 6.775 \text{ kWh/m}^2$.

Etape 3 : (Defuzzification) : c'est la détermination de la variable dépendante)

La defuzzification se fait par la méthode du centre de gravité, qui consiste à calculer la surface formée par les fonctions d'appartenance résultantes et l'axe des abscisses H_i .

La formule algébrique de calcul de l'irradiation solaire correspondant à la durée d'insolation s_m est :

$$H_{S_m} = \alpha [(H_{\alpha 1} + H_{\alpha 2}) / 2] + \beta [(H_{\beta 1} + H_{\beta 2}) / 2] \quad (4)$$

Pour $s_m=4.3$ heures, on obtient $H_{4.3}=4.225\text{kWh/m}^2$.

Pour mieux comprendre cet algorithme, les étapes pratiques de déroulement de celui-ci est illustré en figure 8.

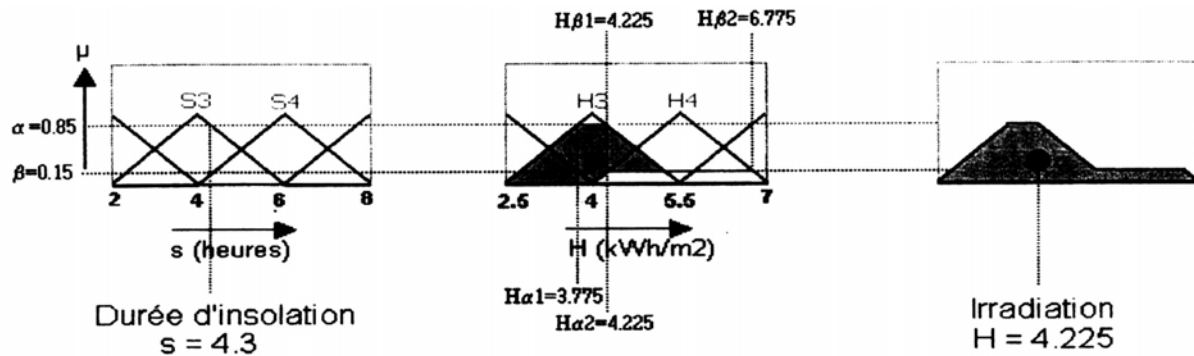


Fig. 8: Etapes d'estimation de l'irradiation solaire par la logique floue

4. CONCLUSION

La présente étude se veut une contribution à l'établissement d'une méthode d'estimation de l'irradiation solaire en fonction de la durée d'insolation mesurée en utilisant la logique floue. L'algorithme flou développé a été appliqué aux données expérimentales du couple durée d'insolation / irradiation relative au site de Bouzaréah.

Enfin, il est à noter que les particularités de cette méthode réside dans son application pour la description des fonctions non linéaires (cas de l'irradiation solaire) et plus particulièrement les systèmes physiques difficiles à modéliser.

REFERENCES

- [1] Z. Sen, 'Fuzzy Algorithm for Estimation of Solar Irradiation from Sunshine Duration', Solar Energy, Vol. 63, N°1, pp. 39-49, 1998.
- [2] L. Zadeh, 'The Fuzzy Systems Handbook : Guide to Building, Using and Maintaining Fuzzy Systems', 1994.
- [5] Mathworks Inc, 'Fuzzy Logic Toolbox, For Use with MATLAB', User Guide, Version 2, Jan. 1998.