

# Introduction générale

---

## 1. Contexte et objectifs

Les énergies renouvelables jouent un rôle crucial dans la société moderne. Les sources d'énergie tirent leur énergie des flux d'énergie existants, des processus naturels en développement, tels que le soleil, le vent, les eaux vives, les processus biologiques et les flux de chaleur géothermiques. Une définition commune des sources d'énergie renouvelables est que l'énergie renouvelable est capturée à partir d'une ressource énergétique qui est rapidement remplacée par un processus naturel tel que l'énergie générée par le vent ou le soleil [1]. À l'heure actuelle, les sources d'énergie les plus prometteuses sont l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie géothermique [2, 3]. Les autres sources renouvelables comprennent les énergies hydroélectriques et océaniques, ainsi que la biomasse et l'éthanol en tant que carburants renouvelables. Malgré la diversité des sources d'énergie, la façon dont nous utilisons l'énergie (le produit final) répond en général à l'un des trois besoins à savoir :

- Production d'électricité.
- Génération de chaleur.
- Énergie pour le transport.

Les gouvernements du monde entier se tournent de plus en plus vers les énergies renouvelables pour mettre fin à leur dépendance aux combustibles fossiles. Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des technologies énergétiques alternatives la plus prometteuse du futur. L'histoire de l'énergie photovoltaïque a commencé en 1839 lorsqu'Edmond Becquerel, un physicien français, observe la production d'électricité par certains matériaux lorsqu'ils sont soumis à la lumière du soleil. Einstein étudie plus tard ce phénomène et publie en 1905 un article au sujet de l'effet photo-électrique pour lequel il reçoit le prix Nobel en 1921[4].

Cependant, l'énergie solaire est jugée trop coûteuse malgré les travaux de Robert Millikan et sa "cellule solaire" (1916). Elle est mise de côté pendant presque 40 ans. En 1960, la course à l'espace fait ressurgir la technologie solaire sur le devant de la scène : il s'agit d'une solution particulièrement adaptée à l'alimentation des premiers satellites. La recherche dans le domaine de l'énergie photovoltaïque bénéficie alors de fonds de la course à l'espace,

ce qui l'amène à devenir en 1970, avec la crise énergétique, une solution alternative prometteuse.

Dans le contexte énergétique actuel, l'énergie photovoltaïque est une solution viable et promue par de nombreux pays en reconversion énergétique.

La production d'énergie électrique par un système photovoltaïque est dépendante de nombreux facteurs. L'inclinaison des panneaux, leur technologie et leur température influent sur la production mais le rayonnement solaire reçu reste le facteur principal de variation. Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de prédire la quantité du rayonnement solaire vu son importance dans beaucoup de problèmes liés à l'installation et l'utilisation de l'énergie solaire.

La prédiction du rayonnement solaire est un domaine de recherche très actif à l'heure actuelle. Nous distinguons quatre grandes familles de méthodes de prédiction selon les données utilisées et l'horizon de prédiction souhaité :

- *Méthodes statistiques* : elles s'appuient sur les séries temporelles d'un ou de plusieurs capteurs afin de construire des modèles statistiques de prévision. Ces méthodes supposent l'existence de séquences répétitives dans la série temporelle que l'on peut apprendre afin de les prévoir par la suite. On retrouve dans cette famille de nombreuses méthodes de régression (linéaires et non linéaires) existantes en traitement du signal (modèles analytiques, modèles autorégressifs, ...). L'horizon de prédiction dans ce type de méthodes est très dépendant de l'échantillonnage choisi pour la série temporelle.

- *Modèle de prédiction météorologique numérique* : les modèles numériques utilisent des algorithmes de résolution numérique des équations météorologiques assimilant les données météorologiques acquises par des stations de mesures réparties sur le globe. Elles fournissent ainsi des prévisions de nombreuses variables qualifiant l'état de l'atmosphère (température, pression, vitesse du vent,...etc.) pour chaque point de la grille spatiale de prédiction. Les prédictions nécessitent un temps de calcul important. La résolution temporelle des prévisions est de l'ordre de 3 à 6 heures. Ces modèles permettent une prévision de l'irradiation à long terme (plusieurs jours) via différents traitements statistiques des sorties obtenues.

- *Imagerie satellitaire* : les satellites météorologiques géostationnaires fournissent des images de l'atmosphère et de la terre sur l'ensemble du globe avec une résolution temporelle intra-horaire (15 minutes pour METEOSAT seconde génération). Ces

caractéristiques font de l'imagerie satellitaire un outil de premier ordre pour la description et le suivi de phénomènes météorologiques de moyenne et grande échelle. Ainsi, de nombreuses méthodes de prévision du l'irradiation profitent de ces images depuis 1980. L'horizon de prévision atteint est généralement de l'ordre de quelques heures.

- *Imagerie hémisphérique* : les images hémisphériques sont des images du ciel prises depuis le sol via une caméra possédant un angle de vision de 180°. Les travaux impliquant ces images ont émergé il y a une vingtaine d'années avec l'apparition de capteurs de plus en plus performants. Ces images permettent une description très fine de la couverture nuageuse avec une résolution temporelle de l'ordre de la seconde. Elles sont particulièrement adaptées à l'estimation et à la prédiction à très court-terme (jusqu'à 30 minutes).

## 2. Pourquoi prédire le rayonnement solaire ?

L'installation de tout système d'énergie solaire, dans un site donné, nécessite des études préalables. En effet, le dimensionnement et la simulation sont primordiaux pour assurer un fonctionnement optimal. Pour faire ce genre d'étude, des mesures fiables, sur des durées relativement longues, de certaines variables météorologiques, et spécialement, celles du rayonnement solaire sont indispensables.

Le manque de longues séries de données ou de séries de données de mauvaise qualité (discontinuités et non fiabilités) peut engendrer des erreurs lors de la conception de ces systèmes, ce qui a un impact négatif sur l'investissement. Malheureusement, les mesures du rayonnement solaire sont généralement inexactes et rares dans le monde entier [5]; en raison du prix élevé des appareils de mesure. Il n'y a qu'un nombre limité de stations de mesure de rayonnement solaire, c'est pourquoi il y a un manque de mesures d'irradiation solaire sur de grandes surfaces, ceci d'une part. D'autre part, quand ces données existent, il y a généralement des périodes de rupture dues à des pannes ou au mauvais suivi, puisque la majorité de ces stations appartiennent à des établissements non bénéficiaires économiquement de ces données.

Cependant, d'autres paramètres météorologiques tels que la température ambiante, l'humidité et la vitesse du vent sont relativement facile à mesurer dans un plus grand nombre de stations météorologiques avec un coût relativement faible par rapport à celui du rayonnement. D'autre part, l'optimisation d'un système solaire ou la simulation de ses performances nécessitent au moins, des données journalières, voire même, horaire de l'irradiation solaire. Par conséquent, il est souhaitable d'élaborer des relations entre les

données météorologiques disponibles et l'irradiation solaire et de développer des techniques précises (modèles) pour prédire cette dernière. Ces modèles sont des outils qui permettent la génération de longues séries de données de l'irradiation solaire à différents pas de temps. Ceci pourrait fournir des informations utiles aux décideurs en matière de sélection, de conception et de planification de nouvelles centrales solaires.

### **3. Objectifs de cette thèse**

Dans la présente thèse, nous avons ciblé deux objectifs :

Le premier vise à trouver la meilleure performance de prédiction parmi un ensemble d'algorithmes de prédiction différents, en utilisant une nouvelle approche inspirée de la théorie d'apprentissage d'ensemble [6]. L'évaluation expérimentale de l'approche proposée sera réalisée à partir de données réelles.

La deuxième partie concerne l'utilisation des algorithmes génétiques pour l'optimisation des paramètres d'un modèle ARMA, ceci dans le but de trouver l'ordre optimal du modèle ARMA et d'améliorer l'estimation de ses paramètres, ensuite l'appliquer pour l'estimation de l'irradiation solaire globale (GHI) sur deux bases de données réelles.

### **4. Contributions de la thèse**

Les principales contributions de la thèse sont:

- En ce qui concerne le choix du modèle de prédiction : une approche de fusion/combinaison basée sur la combinaison ou la classification des résultats de prédiction des différents algorithmes individuels est proposée, dans la quelles plusieurs familles de prédicteurs (autorégressives, neuronales et à noyaux) ont été testées et utilisées.
- Une méthode de prédiction incorporant un algorithme évolutionnaire, à savoir les algorithmes génétiques (AG) et la méthode de prédiction à moyenne mobile autorégressive (ARMA) a été proposée dans l'intérêt de tirer profit de leurs forces intrinsèques.

### **5. Organisation du manuscrit**

Cette thèse présente l'ensemble des travaux de recherche et les différents résultats obtenus. Elle est répartie sur quatre chapitres.

Nous décrirons dans le premier chapitre le phénomène du rayonnement solaire global incident sur la surface de la Terre, en exposant les faits théoriques qui permettent de

comprendre les différents éléments qui le compose. Les différents phénomènes physiques qui sont sujets à ce rayonnement, la structure de l'atmosphère et son effet sur le rayonnement solaire. La connaissance de ces divers paramètres permet d'établir un bilan radiatif du système terre-atmosphère.

Dans le second chapitre, nous présentons l'état de l'art des méthodes de prévision, notamment des prédicteurs de natures différentes comme les réseaux de neurones, les méthodes auto-régressives, les machines à vecteurs de support (SVM), ...etc. De plus, ce chapitre présente une classification des modèles de prévision suivant les caractéristiques des données d'entrées et les horizons de prédiction.

Nous présenterons dans le chapitre trois, la méthodologie de prédiction multi-modèle adoptée dans la première partie.

Dans le quatrième chapitre, nous proposons une méthode de prédiction intégrant les algorithmes génétiques (AG) et la méthode de prédiction à moyenne mobile autorégressive (ARMA) afin de tirer profit de la force intrinsèque des deux modèles.

Nous terminons cette thèse par une conclusion générale, où nous résumons notre travail en mettant l'accent sur son originalité ainsi que sur les différentes perspectives ouvertes suite aux diverses études réalisées dans le cadre de cette thèse.