

I. Synthèse bibliographique :

I.1 Introduction :

La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré. Pour cela, quelques auteurs mettent l'accent sur le développement de modèles thermiques de photo-conversion en régime permanent ou dynamique. Certaines de ces analyses s'appuient en outre sur des confrontations avec des études expérimentales en conditions contrôlées ou in situ sur divers sites.

D'autres recherches ont pour but l'optimisation des performances des composants solaires existants en améliorant les conditions de fonctionnement (inclinaison, orientation du composant...) ou en proposant des configurations géométriques innovantes. Elles se basent sur la modification des dimensions ou des propriétés des matériaux de constitution (isolant thermique, absorbeur, cellules PV...) ou des fluides caloporteurs (air, eau...). Ces améliorations visent à accroître la quantité d'énergie solaire absorbée et les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur ou à réduire, voire éliminer, les pertes thermiques extérieures du capteur hybride.

I.2 Travaux effectués dans le monde :

HEGAZY [1] a comparé en **2000**, les performances thermiques et électriques de quatre capteurs solaires PV/T hybrides à air différencié par le mode de refroidissement mécanique des modules **PV** : au-dessus de l'absorbeur (**prototype I**), en dessous (**prototype II**), de part et d'autre (**prototype III**), et par double circulation d'air (**prototype IV**). Les quatre prototypes sont schématisés sur la (**figure I.1**) ci-après: Chacun de ces capteurs est vitré et a une longueur de **9 m**, et une largeur de **1 m**. L'épaisseur de la lame d'air a été choisie en fonction d'un critère d'optimisation proposé par **HEGAZY** pour divers débits massiques, à savoir:

$$\left(\frac{h}{l}\right)_{optimum} = 2.5 \cdot 10^{-3}$$

Où **h** est la hauteur de la lame d'air et **L** la longueur du canal traversé par le flux turbulent d'air.

Le générateur PV est composé de **20** modules constitués chacun de **36** cellules PV en silicium cristallin montées en série. Il couvre **62,8 %** de la surface de l'absorbeur qui est de **9 m²**. La tension électrique nominale aux bornes d'un module PV est de **16,5 V**, soit une puissance nominale de **50 Wc**. Le modèle stationnaire réalise pour chacun de ces composants est unidirectionnel.

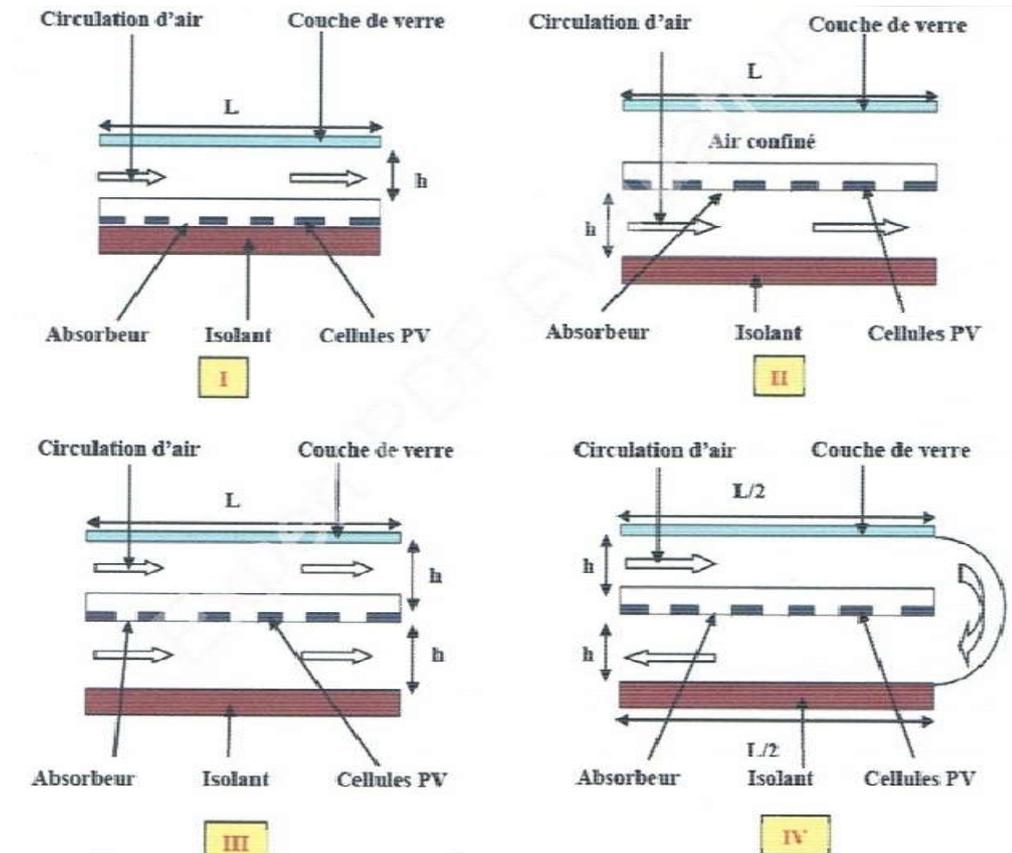


Figure I.1 : Les prototypes I, II, III et IV de capteur solaire PV/T à air. [1]

HEGAZY souligne que les performances d'un capteur solaire PV/T hybride à air dépendent de la température maximale de l'air à la sortie, des rendements thermiques et électriques et de l'énergie électrique nette disponible après soustraction de l'énergie nécessaire au fonctionnement du ventilateur et des autres appareils alimentés par le module PV. La simulation réalisée pour une journée ensoleillée a montré que l'accroissement du débit massique de ventilation améliore comme attendu, le rendement thermique. Le prototype (I) a le plus faible rendement global alors que le prototype (III) semble donner les meilleures performances pour un fort ensoleillement et peut être aisément assemblé en usine. Les résultats obtenus ont montré de plus que pour de faibles débits massiques de ventilation, l'utilisation d'un absorbeur sélectif est inappropriée pour ce type de capteur solaire, car elle réduit la production d'énergie électrique.

En 2001, Trip anagnostopoulos [2] effectue l'étude d'un capteur solaire hybride faisant appel à deux types de fluides caloporteurs disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique (à air ou à eau).

Le système comporte un absorbeur soudé à des tubes en cuivre situé en face avant du composant, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air .

Puis, en 2003, Mei [3] présentent le modèle dynamique d'un capteur solaire PV/T à air intégré à la façade d'un bâtiment. La façade sud du bâtiment considéré par Mei et al comporte de haut en bas, des capteurs solaires à air, des panneaux PV connectés en série et séparés d'un double vitrage intérieur par une lame d'air de **14 cm**, et une paroi en briques. Les modules PV sont composés de cellules poly- cristallines encapsulées entre deux couches de verre. Les autres façades sont composées de béton cellulaire et de bardage métalliques. L'air est aspiré à la base de la lame d'air située à l'arrière des panneaux PV.

Le modèle unidirectionnel de la façade a été validé à partir de mesures expérimentales réalisées in situ. Les besoins en chauffage et en rafraîchissement d'un bâtiment avec et sans intégration de capteur solaire à air ont été comparés. De plus, l'influence des conditions météorologiques sur les performances de ces bâtiments a été évaluée sur divers sites en Europe. Les résultats présentés ont montré que le capteur solaire à air ventilé couvre **12 %** des charges de chauffage pour les sites ensoleillés (**Barcelone**) mais ne couvrent que **2 %** des charges de chauffage dans les sites localisés plus au nord (tel que **Stuttgart**). Il faut malgré tout moduler ces résultats car les besoins de chauffage sont très différents suivant les sites.

Plus tard, en 2005, TIWARI [4] ont présenté l'étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PV/T à air ventilé naturellement ou mécaniquement.

Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV chacun de surface **0,61 m²**, connectés en série et montés sur une couche isolante non corrosive de **tedlar**. Le module PV est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'**EVA** et protégées par une couche de verre. Ce composant a été intégré à un banc d'essai en acier inclinable et monté à **New Delhi**, en Inde (**figure I.2**). Des ventilateurs

disposés à l'entrée de la lame d'air située entre le tedlar et une couche isolante en bois permettent la ventilation forcée des modules PV en face arrière.



Figure. I.2 : Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air. [4]

L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Cette analyse a montré que la récupération complémentaire de l'énergie thermique produite permet une amélioration du rendement global du système PV/T à air d'environ **18 %**.

En **2006**, **VOKAS** [5] ont mené l'étude théorique d'un capteur solaire PV/T hybride à air en mettant l'accent sur ses performances thermiques. Le capteur solaire PV/T expérimenté consiste en un capteur solaire thermique sur lequel est collé un panneau PV. Le modèle réalisé est basé sur celui d'un capteur solaire plan et sur les travaux de DUFFIE et BECKMAN. Le rendement thermique de ce capteur solaire PV/T hybride à air, de **1,32 m²** de surface, a été comparé à ceux d'un capteur solaire thermique à air standard, de **1,32 m²** de surface, et à ceux d'un capteur solaire thermique à air à absorbeur sélectif de **2 m²**. Dans le cas où la température d'entrée d'air dans le capteur solaire est égale à la température de l'air ambiant, les résultats obtenus montrent que le capteur solaire PV/T hybride à air a un rendement thermique inférieur de **9 %** à celui du capteur solaire thermique standard (dont le rendement est de **70 %**). Le capteur solaire à absorbeur sélectif a le rendement thermique le plus élevé (**75 % environ**). Cependant, l'avantage du capteur solaire hybride est qu'il peut produire outre une quantité importante d'énergie thermique, de l'énergie électrique sur une surface équivalente à celle du capteur solaire standard (soit **1,32 m²**, ici) et sur une surface inférieure à celle du capteur solaire à absorbeur sélectif (**2 m²**).

De même, **VOKAS**, ont montré que la part des besoins en chauffage couverte par une surface de **30 m²** de ce système **PV/T** hybride à air est de **47,79 %** en moyenne, à Athènes. Le capteur solaire standard peut couvrir **54,26 %** des besoins en chauffage dans la même ville.

Cependant, la différence entre ces valeurs n'étant que d'environ **6,65 %**, les performances du capteur solaire hybride peuvent être considérées satisfaisantes.

Enfin, une autre étude paramétrique montre que comme attendu, la localisation géographique ainsi que la surface de captation ont une forte influence sur la productivité du composant hybride.

En **2007**, Tripanagnostopoulos [6] réalise à l'Université de Patras, l'étude de capteurs solaires **PV/T** hybrides dont le fluide caloporteur est soit de l'air soit de l'eau, et pouvant être intégrés au bâti. L'objectif de ces travaux était de réduire la température de fonctionnement des modules **PV**, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous- face du composant.

En **2007** aussi, Kalogirou et Tripanagnostopoulos [6] poursuivent une étude précédente menée sur les capteurs solaires **PV/T** hybrides à air en analysant cette fois, le comportement de capteurs solaires **PV/T** hybrides à eau comportant des panneaux **PV** à base de cellules en silicium poly- cristallin ou de cellules amorphes, sur trois sites. Ces composants ont été intégrés à des bâtiments industriels et ont chacun une surface totale de **300 m²**.

Le capteur solaire hybride a été isolé en face arrière par une couche de **5 cm** de polyuréthane. Les résultats des simulations réalisées à partir du logiciel **TRNSYS** montrent que la production électrique d'un capteur solaire **PV** est supérieure de **25 %** à celle du composant hybride. Mais, le système hybride permet de couvrir une grande partie des besoins en énergie thermique des bâtiments considérés. L'évaluation de l'aspect économique de ces systèmes a montré qu'ils sont avantageux en particulier pour les sites bien ensoleillés.

Le constat a été fait que les systèmes hybrides à eau constitués de modules **PV** sans protection thermique en face avant, ont d'importantes pertes thermiques entraînant ainsi un faible niveau de température de fonctionnement du système. Une couverture de verre peut ainsi être ajoutée en face avant pour y remédier bien que les absorptions et réflexions

supplémentaires inhérentes du rayonnement solaire entraînent une baisse du rendement électrique.

En 2009 une autre forme de collecteur PV/T à air à passage simple a été conçue par OTHMAN. [7] Le collecteur PV/T, comme montré dans(**figure I.3**) a été conçu avec des plaques rainurées en V placées sous le panneau PV. Pendant l'expérience, l'air s'écoule avec un débit s'étendant de a été passé à travers les ailettes.

Le résultat montre qu'en ajoutant les plaques rainurées à la structure, le capteur PV/T augmente son efficacité de **30 %** par rapport à l'autre type de collecteurs.

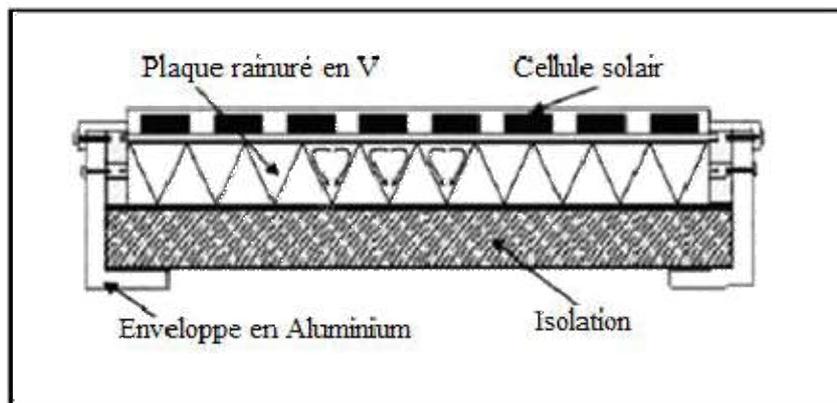


Figure. I.3 : Coupe transversale d'un collecteur PV/T à air avec une plaque rainurée. [7]

En 2009, EBRAHIM M. [8] ont présenté une étude expérimentale concernant l'effet du débit massique sur l'efficacité d'un capteur hybride à air de passage simple à deux conduites (au-dessus et en dessous de la plaque photovoltaïque). Le système hybride se compose de la cellule photovoltaïque collée directement sur l'absorbeur avec des ailerons attachés au fond de l'absorbeur. L'effet du débit massique de l'écoulement sur les efficacités photovoltaïque, thermique et combiné du collecteur PV/T et sur la gamme des conditions de fonctionnement a été discuté. Les résultats, pour un rayonnement solaire de 600 W/m^2 et à une température ambiante de 35 °C prouvent que l'efficacité combinée (thermique et électrique) de PV/T augmente de **49,14 % à 62,82 %** pour divers débits massiques allant de **0,0316 à 0,09 kg/s**.

JOSHI A.S. et al [9], en 2009, ont traité dans une étude numérique validée expérimentalement deux types de capteurs hybrides l'un de verre à tedlar et l'autre de verre-à-verre. Les deux modèles sont comparés pour les données climatiques de **New Delhi en Inde**. Les expressions analytiques du bilan énergétique pour les cellules solaires,

la surface arrière, la température de sortie de l'air et l'efficacité thermique globale sont données pour les deux cas.

Cette étude a traité l'évaluation comparée des performances énergétiques pour les deux types de capteurs. De cette étude, plusieurs conclusions ont été tirées :

- La température de surface arrière du capteur est plus élevée dans le collecteur **PV/T** de verre-à-verre qu'en collecteur **PV/T** de verre-à-tedlar.
- Le collecteur **PV/T** de verre-à-verre donne les meilleurs résultats en termes d'efficacité thermique par rapport à ceux de collecteur **PV/T** de verre-à-tedlar.
- L'efficacité thermique globale du collecteur verre-à-verre est plus élevée par rapport au collecteur de verre-à-tedlar, est de l'ordre de **43,4 à 47,4 %** pour le collecteur verre-à-verre et de l'ordre de **41,6 à 45,4 %** pour le collecteur de verre-à-tedlar.
- L'efficacité thermique globale diminue avec l'augmentation de la longueur de conduite dans les deux cas, une efficacité thermique globale maximum de **45,3%** et **42,61%** pour une longueur de **1,2 m** et **7,2 m**, respectivement pour le collecteur verre-à-verre et une efficacité thermique globale maximum de **43,41%** et **40,71%** pour une longueur de **1,2 m** et **7,2 m**, respectivement pour l'autre collecteur verre-à-tedlar.
- L'efficacité thermique globale augmente avec l'augmentation du débit massique.

SARHADDI F. [10] ont présenté, en **2010**, un modèle thermique et électrique détaillé. Le module est développé pour calculer les paramètres thermiques et électriques d'un collecteur **PV/T** typique à air (**figure I.4**).

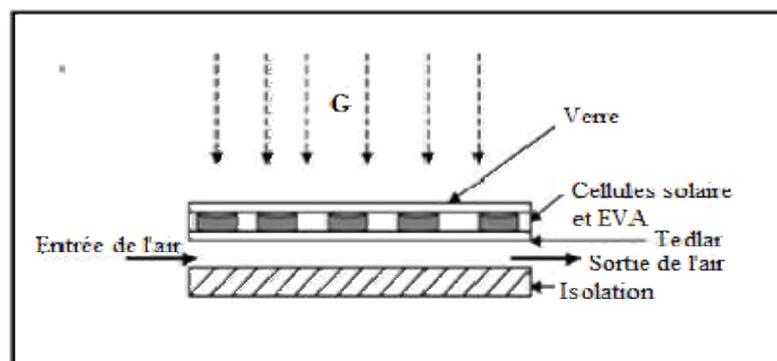


Figure. I.4 : Coupe transversale du capteur hybride étudié par SARHADDI [10]

Les paramètres thermiques et électriques incluent la température de cellule solaire, la température de face arrière de module PV, la température de sortie de l'air, la tension électrique de circuit ouvert, le courant de court-circuit, la tension maximum (de point de puissance max), le courant maximum (de point de puissance max)... etc. Quelques corrections sont faites sur les coefficients de perte de chaleur afin d'améliorer le modèle thermique du collecteur **PV/T**. Un meilleur modèle électrique est employé pour augmenter la précision de calculs des paramètres électriques du **PV/T** à air. Le modèle électrique présenté peut estimer les paramètres électriques tels que la tension électrique de circuit ouvert, le courant électrique de court-circuit, la tension électrique maximum, et le courant électrique maximum. De plus, une expression analytique pour l'efficacité énergétique globale d'un **PV/T** à air est donnée en termes thermique, électrique, dimensions du capteur et paramètres climatiques.

Un programme de simulation sur ordinateur est développé afin de calculer les paramètres thermiques et électriques de capteur hybride. Les résultats trouvés par la simulation numérique sont en bon accord avec les mesures expérimentales remarquables dans la littérature précédente. Ils ont trouvé également que l'efficacité thermique, l'efficacité électrique et l'efficacité énergétique globale du collecteur hybride à air sont d'environ **35,18%**, **10,01%** et **45%**, respectivement, pour un échantillon des paramètres climatiques et de fonctionnement .

En **2011**, **TEO H.G.** [11] ont étudié un système de refroidissement actif pour les modules photovoltaïques, l'énergie électrique et thermique est produite par le système hybride du module **PV/T**. Les résultats de l'expérience montrent l'effet du mécanisme de refroidissement actif. Dans le cas où aucun refroidissement n'a été employé, la température de fonctionnement du module **PV/T** a atteint une valeur de **68 °C** et l'efficacité électrique a chuté de manière significative à **8,6%**. En exploitant un ventilateur pour refroidir le module **PV/T**, la température du module a été maintenue à **38 °C** et l'efficacité électrique portée à environ **12,5%**. En outre, un débit massique optimum a été également trouvé dans cette étude (par rapport aux dimensions du capteur **PV/T** étudié).

Le débit d'air **0,055 kg/s** est suffisant pour absorber une quantité maximum de la chaleur du module PV. Quand le débit dépasse cette valeur, l'énergie thermique et l'énergie électrique ne sont plus affectées. Ceci aide en choisissant l'estimation de la

puissance du ventilateur afin d'éviter de gaspiller l'énergie inutile. Pour amplifier l'efficacité électrique du module PV, la température et le gradient de température au-dessus du module photovoltaïque sont considérés comme critiques. La plus grande efficacité des systèmes PV/T refroidis par air aura une contribution significative aux applications du système photovoltaïque.

En 2012, MORTEZAPOUR H. [12] ont présenté analytiquement et expérimentalement l'évaluation des performances d'un collecteur hybrides photovoltaïque thermique à deux passages d'air. Des expressions mathématiques pour des paramètres d'utilisation pour un PV/T de verre à verre et un PV/T de verre à tedlar (figure I.5) ont été développées et expérimentalement validées par un capteur PV/T de type verre à tedlar. L'influence du débit d'air sur l'efficacité du capteur solaire a également été étudiée. Les résultats ont prouvé que le PV/T de verre à verre a donné une température de sortie d'air, une température de cellules et une efficacité thermique plus élevée qu'un capteur PV/T verre à tedlar². Cependant, la température de surface arrière et l'efficacité électrique étaient plus hautes en cas de collecteur verre au tedlar. L'augmentation du débit d'air a mené la plus basse température de l'air de sortie et une efficacité électrique plus élevée du module photovoltaïque. L'efficacité électrique expérimentale maximum, l'efficacité thermique et l'efficacité globale pour le collecteur de verre à tedlar ont atteint respectivement 10,35%, 57,9% et 84,5% .

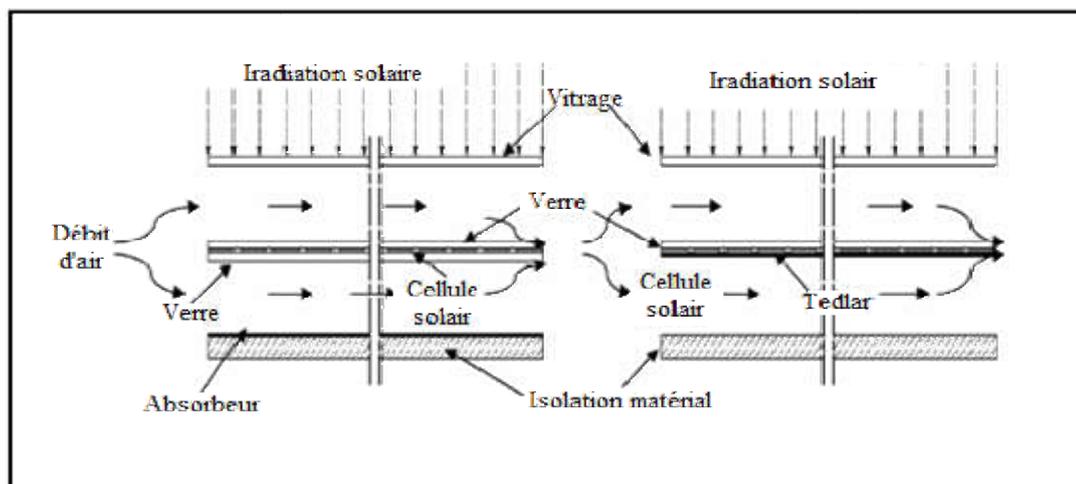


Figure . I.5: Vue schématique (a) d'un PV/T de verre à verre,(b) d'un PV/T de verre à tedlar. [12]

I.3 Travaux effectués en Algérie :

En 2006, **K. TOUAFEK [13]** présentent une Étude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique. L'objectif est de mettre en œuvre un prototype de capteur hybride pour évaluer ses performances électriques et thermiques. Les résultats obtenus permettent de penser que ce type de capteur constitue une bonne alternative aux modules photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques installés séparément .

K. TOUAFEK [14] présentent en 2008 une simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique, elle est suivie en 2009, d'une étude thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique (**PV/T**) à air recouvert destiné au chauffage d'habitation. L'étude porte sur la détermination de la cartographie thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique à air recouvert d'une vitre supplémentaire au dessus du module classique. Ils ont déterminé la distribution de la température au niveau de chaque point du capteur hybride à air pour différents débits (de l'air).

Les résultats donnent la distribution de la température dans le capteur hybride à air recouvert et non ventilé, pour une température d'entrée d'air de **30°C** ils ont eu en sortie **60°C** et la température de la vitre protectrice du capteur égale à environ **70°C**.

Et pour le même capteur **PVT** à air recouvert, mais avec ventilation et pour une température d'entrée d'air de **20°C** ils ont eu en sortie **40°C** et une température de la vitre protectrice du capteur égale à environ **60°C**. On remarque donc que le fait d'augmenter le débit d'air fait chuter le niveau de température à la sortie du capteur hybride à air recouvert.

En 2013, **TOUAFEK K. et al [15]**, présentent une nouvelle conception d'un collecteur hybride où le capteur possède deux plaques absorbantes, l'une en dessous du module photovoltaïque et l'autre au dessus de la couche isolante afin d'augmenter les performances globales du capteur hybride (**figure I.6**). Une étude de modélisation et simulation numérique a été faite pour évaluer les performances électriques et thermiques de ce type de capteur. Cette étude est argumentée par des tests expérimentaux pour la validation du modèle numérique développé.

Le modèle mathématique est basé sur un système d'équations de bilan énergétique de chaque composant du capteur hybride, les résultats donnent un rendement thermique qui

varie entre **22%** et **68%** de **8h00** à **midi** avec une puissance thermique maximale de **290 W** et une puissance électrique maximale de **46 W**. Notons que l'air circule avec un débit massique de **0,022 kg/s** et la température de l'air en sortie atteint **35 °C**. L'application de cette nouvelle conception donne donc un bon rendement thermique et électrique par rapport aux collecteurs hybrides traditionnels.



Figure. I.6 : Photo du capteur hybride étudié par TOUAFEK et al. [15]

I.4 Conclusion :

L'étude bibliographique menée nous a permis de situer le travail demandé dans le cadre des différents travaux menés en Algérie et à travers le monde notamment l'importance à accorder à certains aspects et à certains paramètres à prendre en compte dans le développement théorique et numérique développé dans les chapitres suivants de ce document. L'intérêt du travail à mener est également mis en valeur.

I.5 Les énergies renouvelables :

Introduction :

Dans le terme énergie renouvelable, le mot renouvelable signifie que les sources captées pour créer de l'énergie se renouvellent et se reconstituent constamment et en un temps raisonnablement court (c-à-d des mois ou des années et non des siècles).

Ces sources d'énergies sont l'eau, le vent, le soleil, la biomasse et la chaleur de l'intérieur de la planète (Géothermie).

I.5.1 L'énergie éolienne :

C'est un principe vieux comme les moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (**15 km/h minimum**), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

Il existe deux modèles de base d'éoliennes : le modèle à axe horizontal et le modèle à axe vertical. [16]

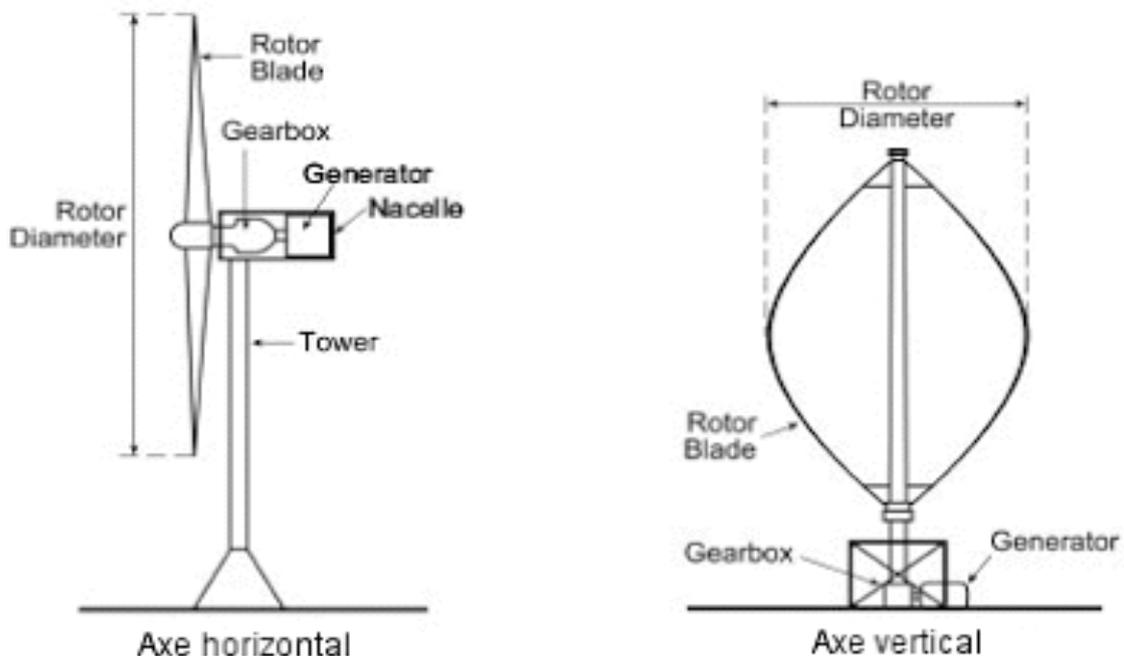


Figure I.7 : LES DEUX TYPES DE L'EOLIENNE

I.5.2 Énergie hydraulique :

Les centrales hydroélectriques convertissent le potentiel d'énergie de l'eau en énergie électrique en créant une chute du dénivelé de l'eau. Certaines centrales hydroélectriques tirent parti d'une chute naturelle du dénivelé d'une rivière.

De nombreuses centrales hydroélectriques utilisent toutefois des barrages pour faire monter les niveaux d'eau en amont de la centrale et utilisent la baisse des niveaux pour produire davantage d'électricité ou pour stocker de l'eau et la libérer pour produire de l'électricité en fonction de la demande. La quantité d'électricité produite dépend de la distance verticale que l'eau franchit et du débit de l'eau

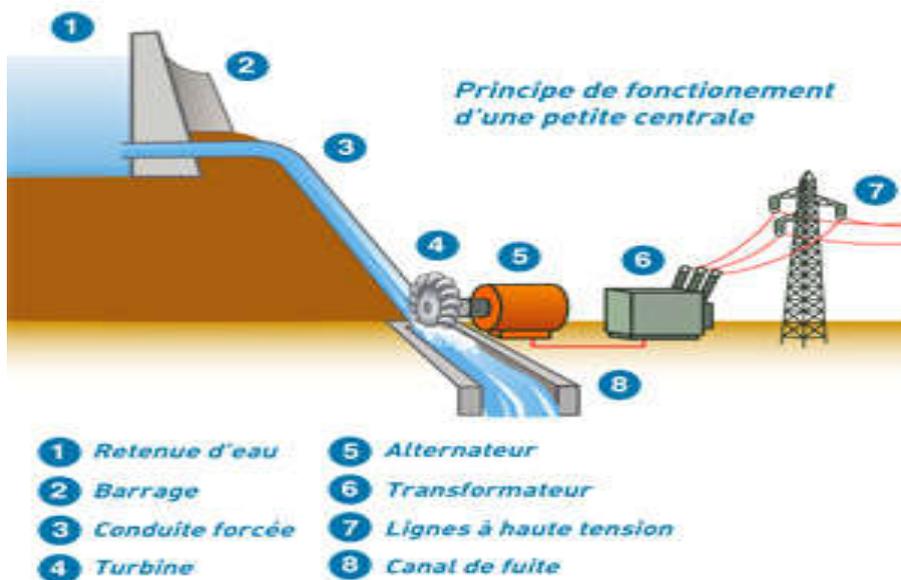


Figure I.8 Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

I.5.3 La géothermie :

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. C'est une application suivant la profondeur, à chaque fois que l'on descend de 100 m sous terre, on gagne 2 à 3 °C en moyenne.

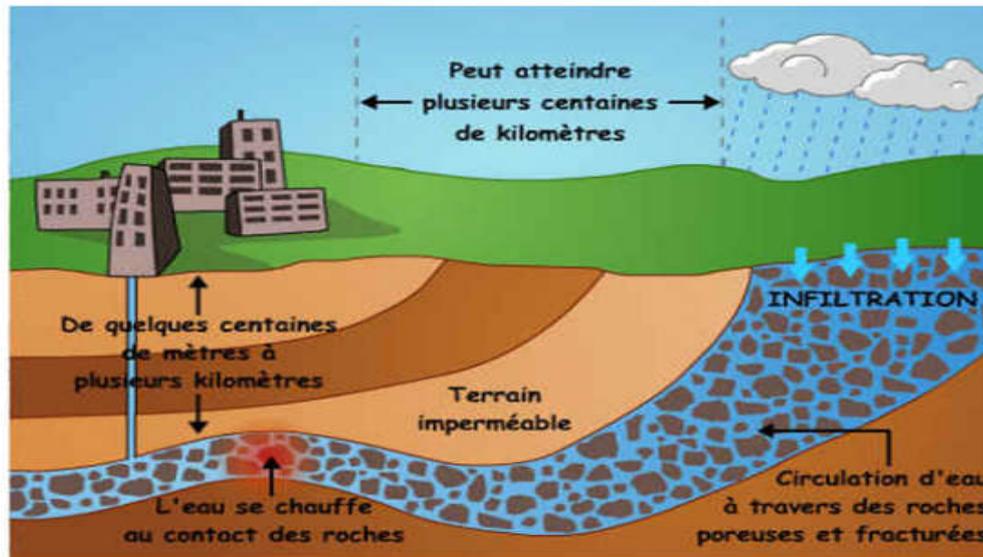


Figure I.9 Principe de la géothermie

I.5.4 La biomasse :

Ce terme générique désigne, en fait, toute matière d'origine organique. Dès lors, les utilisations énergétiques de la biomasse recouvrent un grand nombre de techniques. Globalement, on peut utiliser la biomasse de trois façons différentes : en la brûlant, en la faisant pourrir ou en la transformant chimiquement.

1. La brûler, c'est s'en servir comme d'un combustible de chaudière. On utilise aussi bien des déchets de bois, de récoltes que certains déchets, comme les ordures ménagères, les déchets industriels banals ou certains résidus agricoles.

2. En se décomposant, sous l'effet des bactéries, certains déchets putrescibles (comme certaines boues de stations d'épuration des eaux usées ou la fraction organique des déchets ménagers, les épluchures par exemple) produisent du biogaz. Ce mélange de gaz est en majorité composé de méthane, utilisable, une fois épuré, pour alimenter, lui aussi, des chaudières ou des véhicules fonctionnant au GNV (Gaz Naturel Véhicule).

3. Enfin, certaines cultures, comme le colza, les betteraves ou certaines céréales, telles que le blé, peuvent être transformés en biocarburant. L'huile de colza transformée est un excellent substitut au gazole. Alors que la transformation chimique des céréales ou de la betterave peut fournir de l'ETBE, un additif qui, ajouté à l'essence, permet de réduire certaines émissions polluantes de nos voitures.

I.5.5 L'énergie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil dans son rayonnement, direct ou diffus. Sur terre grâce à divers procédés elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique obtenue à partir de cette dernière .[17]

Il existe deux types d'énergie solaire : le photovoltaïque et le solaire thermique.

I.5.5.1 Énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque.

I.5.5.2 Énergie solaire thermique :

Le solaire thermique consiste à utiliser le rayonnement solaire on le transformant en énergie thermique. Il se présente de différentes façons : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau et chauffage solaires, rafraîchissement solaire, cuisinières et sècheurs solaires.

La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) où indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

I.5.5.3 Caractéristiques spécifiques de l'énergie solaire :

Certaines particularités de l'énergie solaire doivent être prises en compte pour optimiser son utilisation, les principales caractéristiques sont la dilution et l'intermittence.

➤ La dilution :

L'énergie du rayonnement solaire est un niveau d'énergie relativement réduit c'est ce qui est désigné connu sous le nom de dilution. La dilution nécessite l'utilisation d'une surface importante de captation pour obtenir des puissances élevées ou bien de prévoir une concentration des rayons solaires pour obtenir des températures élevées.

➤ L'intermittence :

L'intermittence du rayonnement solaire et l'autre Caractéristiques spécifiques de l'énergie solaire ainsi que sa variation journalière et même suivant l'année, en effet l'énergie solaire est asservie aux conditions météorologiques. Dans les régions à climat tempéré, le problème de l'intermittence est difficile à résoudre.

Une solution souvent employée est d'envisager des stockages d'importances très variables suivant les applications envisagées. Par exemple il est nécessaire de prévoir un stockage quotidien et de l'utiliser durant la nuit de même de prévoir le stockage nébuleux qui correspond à des passages nuageux accidentels.

I.5.5.4 Paramètres de position :

Pour définir la position terre-soleil à un instant donné, on utilise les coordonnées suivantes :

I.5.5.4.1 Les coordonnées géographiques terrestres (φ , L) :

Qui permettent le repérage d'un point sur la terre (**figure I.10**), à savoir :

- **La latitude φ** , comptée positive dans l'hémisphère nord, et négative dans l'hémisphère sud.
- **La longitude L** , positive à l'ouest, négative à l'est par rapport au méridien de Greenwich.

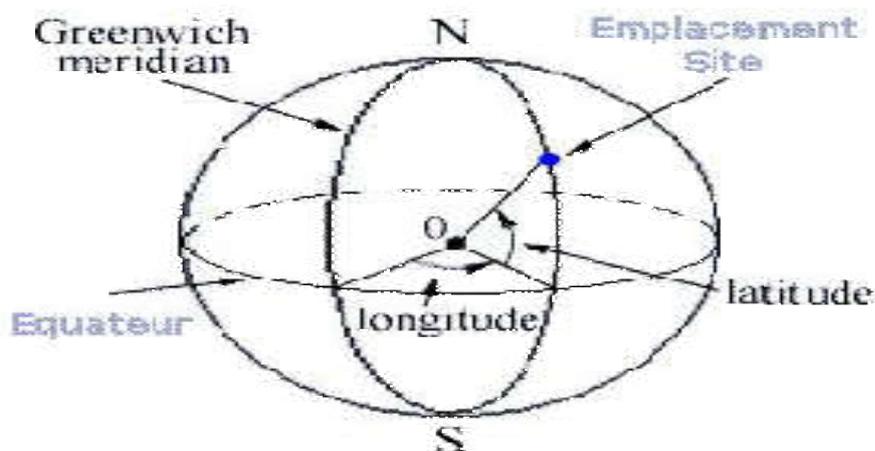


Figure I.10: Les coordonnées géographiques terrestres [18].

I.5.5.4.2 Les coordonnées horaires : (ω δ α) Les coordonnées horaires sont :

- **L'angle horaire (ω ou H)** : qui est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire du soleil avec le plan contenant le méridien céleste, il est compté positivement l'après midi.
- **La déclinaison (δ)** : est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (**21 mars et 21 septembre**), maximale au solstice d'été (**21 juin**) et minimale au solstice d'hiver (**21 décembre**). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation:

$$\delta = 23,45 \sin [0,980(j+284)] \quad (I.1)$$

Où j est le numéro du jour de l'année.

- **L'ascension droite (α)** : est l'angle qui fait le plan contenant le cercle horaire passant par le soleil et celui passant par le point vernal γ et contenant l'axe du monde.

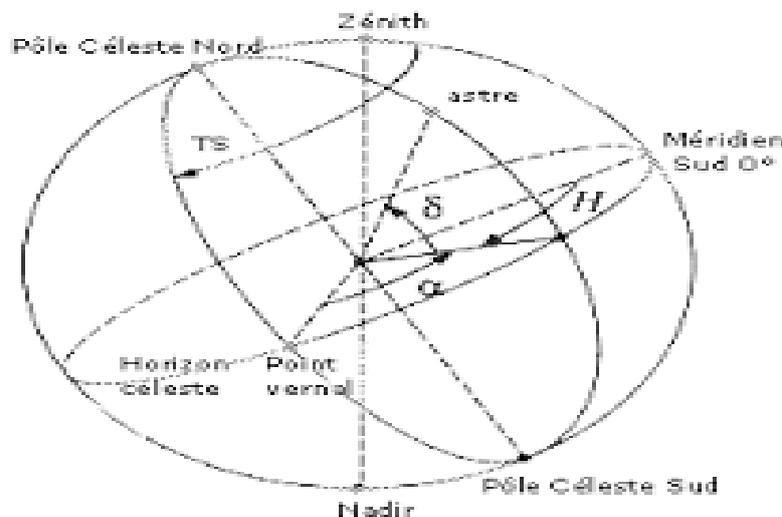


Figure I.11: Les coordonnées horaires [18].

I.5.5.4.3 Les coordonnées horizontales (h , a) : déterminent la projection du soleil sur l'horizon du lieu (figure I.11), et sont définies comme suit :

- **Hauteur angulaire (h) :** c'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal c'est-à-dire tangent au sol.
- **Azimut (a) :** correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil; a est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

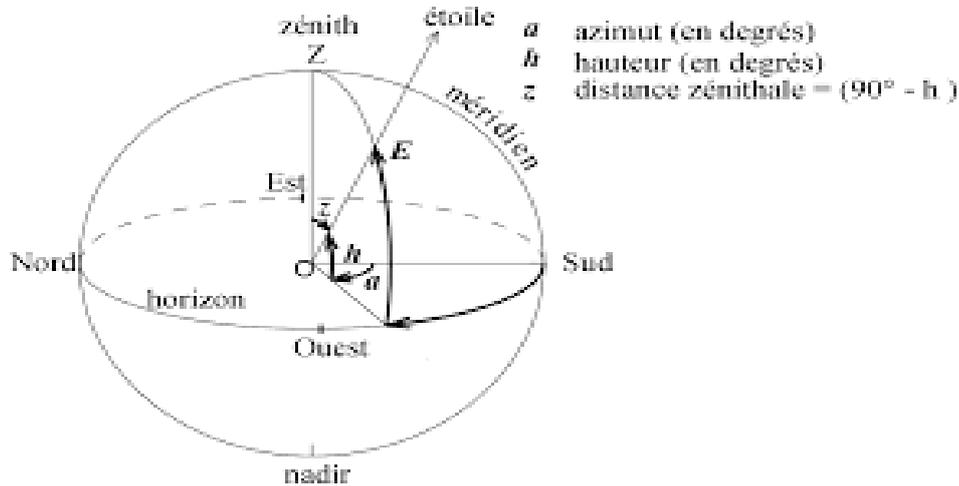


Figure I.12: Les coordonnées horizontales [18].

On peut écrire trois expressions scalaires appelées formules de Gauss reliant entre elles les coordonnées a, h, ω, δ pour une latitude donnée :

$$\cos(h) \cdot \sin(a) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \quad (I.2)$$

$$\cos(h) \cdot \cos(a) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi) \quad (I.3)$$

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) \quad (I.4)$$

I.5.5.5 Le temps solaire :

L'heure solaire est l'heure basée sur le mouvement du soleil dans le ciel. Le midi solaire correspond au moment où le soleil est le plus haut dans le ciel, ce moment est généralement décalé par rapport au midi de l'heure légale :

I.5.5.5.1 Temps solaire vrai : Le soleil tourne dans le plan de l'équateur de 360° en **24** heures, soit 15° par heure, il existe ainsi une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire ω

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

I.5.5.5.2 Durée de jour :

Le module ωt de l'angle horaire au lever du soleil s'obtient en écrivant $\sin(h)=0$. On en déduit que la durée du jour est:

$$d = 24 \frac{\omega t}{\pi} \quad (\text{I.6})$$

La durée du jour est en heures et ωt en radians.

I.5.5.5.3 Equation du temps :

La variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme correctif appelé équation de temps noté **ET** (en min), est donné par la relation suivante:

$$\text{ET}=[-0,0002+0,4797\cos(0,984j)-3,2265\cos(2,0,984j)-0,0903\cos(3,0,984j)-7,3509\sin(0,984j)-9,3912\sin(2,0,984j)-0,3361\sin(3,0,984j)] \quad (\text{I.7})$$

I.5.5.5.4 Temps solaire moyen TSM :

Varie de ± 16 min par rapport au TSV :

$$\text{TSM}=\text{TSV}-\text{ET} \quad (\text{I.8})$$

I.5.5.5.5 Temps universel (TU) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) pour un lieu situé à la longitude « L » : [17]

$$\text{TU}=\text{TSM}+(L/15) \quad (\text{I.9})$$

TSM : Temps Solaire Moyen

L : la longitude exprimée en degrés et les temps en heures.

I.5.5.5.6 Temps légal TL :

C'est l'heure que nous lisons aux horloges publiques:

$$\text{TL}=\text{TU}+C \quad (\text{I.10})$$

C : étant le décalage entre le méridien de Greenwich et l'état considéré (C=1 heure pour l'Algérie).

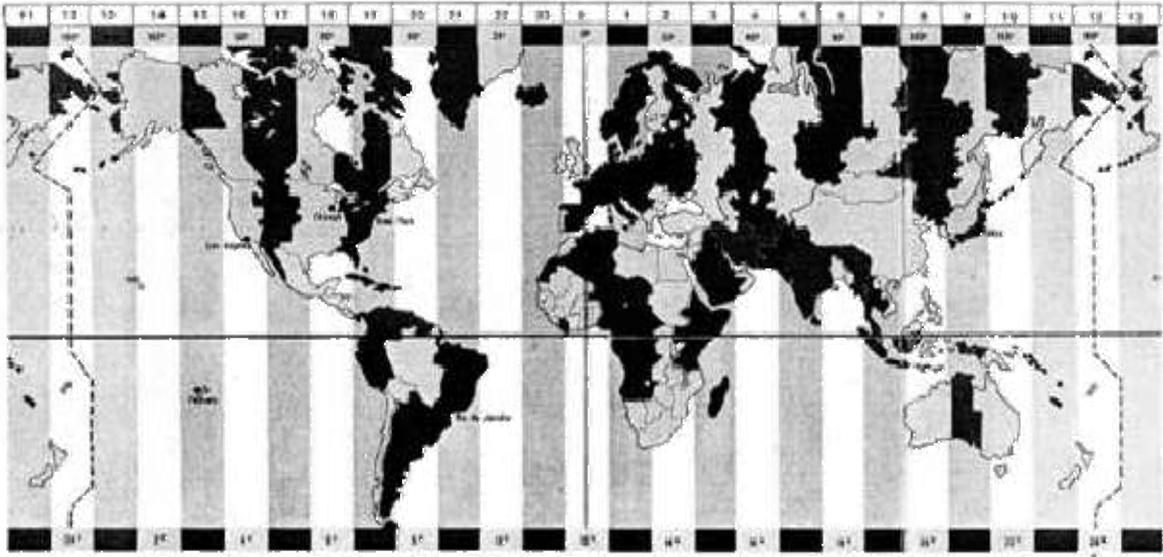


Figure. I.13 : Fuseaux horaires avec le décalage horaire .

I.5.5.6 Le rayonnement solaire :

Le rayonnement émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Ce rayonnement constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil [18].

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de $3 \cdot 10^8$ m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et $8\mu\text{m}$.

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique.

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau (I.1).

Longueur d'onde (μm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m ²)	87	656	623

Tableau I.1 : Répartition spectrale du rayonnement thermique.

I.5.5.7 Le spectre de la radiation solaire :

Le spectre de la radiation solaire peut approximativement se diviser en ultraviolet (UV), lumière visible, infrarouge (IR) et grandes longueurs d'ondes (chaleur). La figure (I.14) illustre le rayonnement solaire.

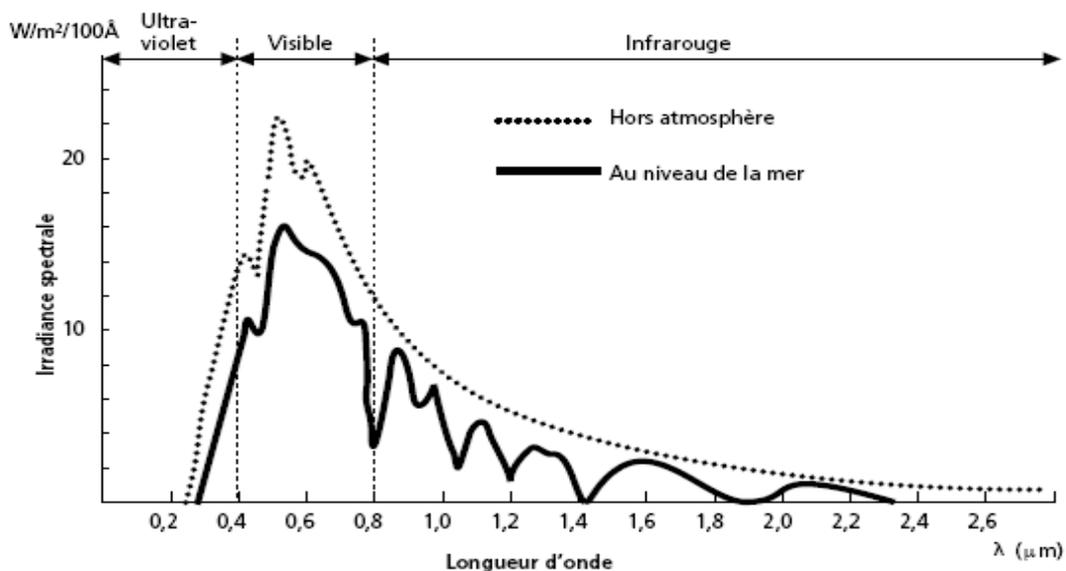


Figure I.14 : Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre

I.5.5.8 Rayonnement solaire hors atmosphère :

L'essentiel du rayonnement solaire hors atmosphère se trouve dans l'intervalle spectral (200 - 400) nm. Nous pouvons voir sur la **Figure (I.15)**

Le rayonnement en dehors de l'atmosphère de la terre est représenté et les paramètres géométriques du soleil et du collecteur sont déterminés; puis la proportion du rayonnement atteignant le dispositif, qui dépend de plusieurs facteurs géométriques (latitude, azimut, etc..) et environnementaux (absorption par : vapeur d'eau, gaz, etc..), est formulée.[19]

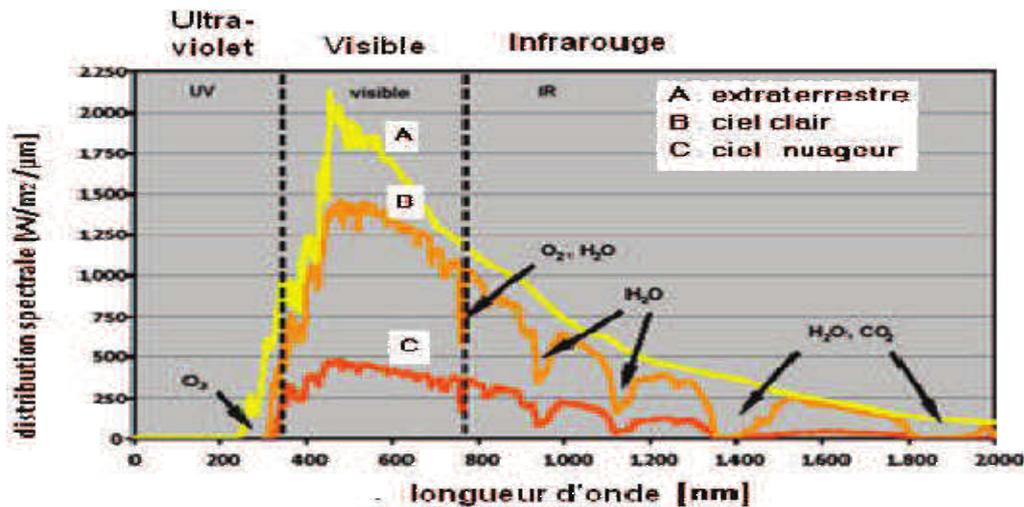


Figure I.15: Le spectre solaire. [19]

I.5.5.9 Atténuation du rayonnement solaire (rôle de l'atmosphère) :

L'énergie solaire ne parvient pas en intégralité sur la terre. En effet elle subit des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

- L'absorption est sélective et dépend principalement de 4 éléments, qui sont :

- L'ozone qui forme un écran et arrête les UV ($\lambda < 0,28\mu\text{m}$) nocifs pour la vie.
- L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers $0,69$ et $0,76\mu\text{m}$).
- Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ($\lambda > 2\mu\text{m}$).
- La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR, on ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol ($Z < 5\text{km}$).

- Les poussières et les nuages ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire.

I.5.5.10 L'irradiation ou rayonnement solaire au sol :

C'est l'énergie reçue pendant une certaine durée. On distingue plusieurs composantes qui sont principalement :

- **Le rayonnement direct (S)** est le rayonnement qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère, ses rayons sont parallèles entre eux.

- **Le rayonnement diffus (D)** est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols, ...). Il n'a pas de direction privilégiée.
- **Le rayonnement global (G)** est la somme des rayonnements direct et diffus.

I.5.5.11 L'albédo :

En réalité la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo [18].

On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente.

On utilise une échelle graduée de 0 à 1, correspondant respectivement au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement visible qu'il reçoit.

Tableau I.2 regroupe les valeurs d'albédos pour différentes surfaces :

Type de surface	Albédo
Surface de lac	0.02 à 0.04
Forêt de conifères	0.05 à 0.15
Forêt tropicale	0.12
Herbe verte	0.25
Sable léger et sec	0.25 à 0.15
Sol sombre	0.05 à 0.15
Glace	0.30 à 0.40
Mer chaude	0.05
Mer froide	0.15
Neige tassée	0.60
Neige fraîche	0.85
Nuage	0.86
Verre à vitres	0.10

Tableau I.2 Albédo pour différentes surfaces [18].

I.5.5.12 Taux d'ensoleillement :

Par ciel clair, sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS0.

On appelle taux d'ensoleillement σ , le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement

I.5.5.13 Le gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme. Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le **tableau I.3** selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.3 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques [20].

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant

l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

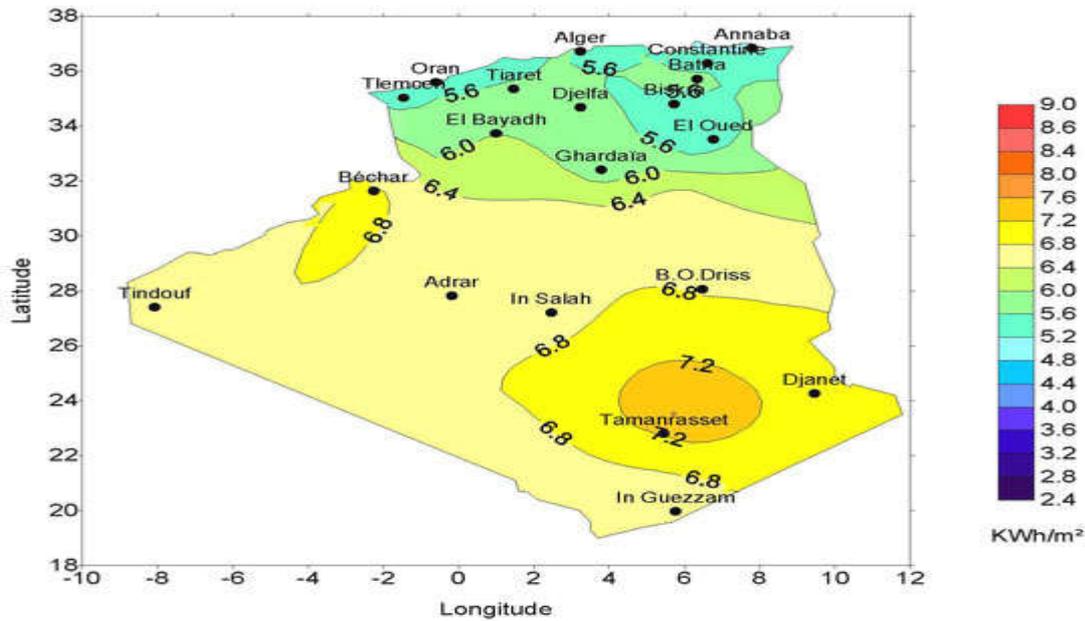


Figure I.16: Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la Latitude du lieu [20].

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M réparties sur tout le territoire algérien. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.

I.6 panneau solaire hybride :

Les panneaux solaires hybrides sont des panneaux combinant les fonctions photovoltaïques et thermiques. Ils servent en même temps à la production d'électricité et au chauffage. Le système hybride n'est peut être apparu que récemment mais il est de plus en plus répandu. Un début de succès dû aux possibilités et avantages qu'il offre. [21]

I.6.1 Fonctionnement d'un panneau solaire hybride :

Les panneaux solaires hybrides associent les capteurs photovoltaïques et les capteurs thermiques dans un même module. On les appelle des capteurs PV/T.

Les capteurs photovoltaïques sont placés sur la couche frontale du module. Ils sont connectés, comme dans le cas d'un panneau solaire photovoltaïque normal, à un système électrique pour l'acheminement du courant dans le local. Les capteurs thermiques sont

placés en sous-couche pour capter la chaleur générée par le fonctionnement des capteurs photovoltaïques.

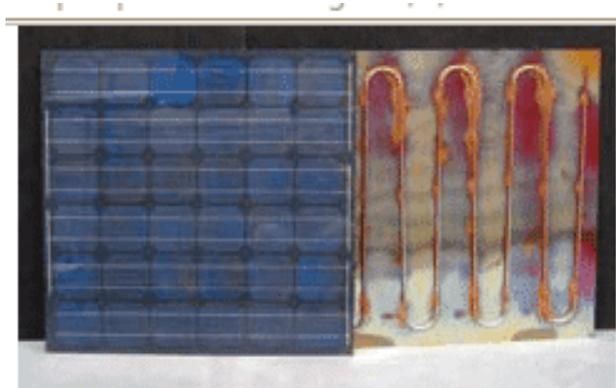


Figure I.17 : Schéma d'un panneau solaire hybride.[21]

Comme dans un panneau solaire thermique, un fluide caloporteur circule à travers les capteurs thermiques en tubes pour récupérer la chaleur et l'acheminer jusqu'à un ballon tampon.

Remarque : le terme hybride est aussi employé pour désigner des panneaux solaires montés avec une éolienne, ou des kits solaires portables combinés à des petites éoliennes, utilisables dans les activités de plein air, les camping car ou pour les bateaux. [21]

I.6.2 Avantages :

- Augmentation du rendement du capteur photovoltaïque en stabilisant la température du panneau.
- Production de l'électricité et de la chaleur sur une même surface.
- L'exploitation n'émet pas de pollution.
- Système silencieux, pas de mouvement.
- L'énergie solaire est gratuite et inépuisable.

I.6.3 Inconvénients :

- La stabilisation de la température du système engendre une production solaire thermique non optimale.
 - L'énergie solaire est présente par intermittence (ensoleillement / jour / nuit).
- [22]

I.7 Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre une généralité sur les énergies renouvelables, ses propriétés et les équations mathématique utilisant dans le domaine d'énergie solaire et le rayonnement solaire spécifiquement. Et nous introduirons aussi en quelques lignes le panneau hybride qui nous intéresse dans notre travail.