

REGULATION DE LA PRODUCTION D'ENERGIES SOLAIRES PHOTOVOLTAIQUES  
INTEGRANT LES RESEAUX ELECTRIQUES

Burkina Faso 2017-2020

Par

GNOUMOU B ARISTIDE (Distant Production House University)

Email : [gnoumoubougnessan@gmail.com](mailto:gnoumoubougnessan@gmail.com)

NIZEYIMANA Jean Baptiste (Distant Production House University)

Email : [njebanize@gmail.com](mailto:njebanize@gmail.com)

**RESUME**

Les énergies et plus particulièrement les énergies renouvelables sont un des éléments clés du développement soutenable aujourd'hui en plein expansion au Burkina Faso. Cette problématique est encore plus sensible dans les régions insulaires. Le chapitre 17 de l'Agenda 21 (Conférence Internationale de Rio, 1992) stipule que les îles sont des cas particuliers à la fois d'un point de vue environnemental et de leur développement. Elles ont des problèmes spécifiques et sont extrêmement fragiles et vulnérables. Dans le contexte actuel du développement durable au Burkina Faso, l'énergie est la pierre angulaire de leur stratégie de planification. En milieu insulaire, les contraintes habituelles dans le domaine de l'énergie sont la distance aux réseaux principaux, la petite échelle, les difficultés de distribution et l'absence de grands marchés traditionnels.

Ces contraintes sont en général contrebalancées par l'extrême abondance des sources renouvelables d'énergie et l'incroyable adaptabilité et capacité d'intégration des technologies d'énergies renouvelables. Des facteurs aux certaines régions du Burkina Faso qui tranchent avec l'inefficacité et le coût élevé des systèmes à énergie conventionnelle dans ces régions insulaires. En fait, nous pourrions dire que les îles doivent devenir de véritables laboratoires pour l'avenir des énergies " durables " Dans le document final rédigé à la fin de la première conférence sur le développement durable d'Afrique (Minorca, 1997), nous pouvons lire : " les sources d'énergie non-renouvelables doivent être considérées comme des solutions provisoires, non souhaitables comme solution à long terme au problème énergétique en Afrique. ".

C'est dans ce contexte que s'inscrivent les activités de recherches que nous avons réalisées depuis notre recrutement sur un poste de Maître de Conférences en Septembre 2017, aux Universités de Burkina Faso. Elles concernent, en grande partie, l'intégration des sources renouvelables (solaire photovoltaïque) dans les réseaux électriques insulaires, avec comme champ d'application. La démarche développée consiste à étudier le système énergétique globalement : en effet, un système solaire ou éolien n'est pas seulement tributaire de sa fiabilité technique et des performances individuelles de ses composants, il dépend de l'agencement des différents composants, de la stratégie de fonctionnement des divers sous-systèmes et de son dimensionnement. De plus, il est dépendant, par nature, des rythmes et aléas de son approvisionnement en énergie. Nous avons donc mis en œuvre une méthodologie globale du système prenant en compte tous les particularismes liés à l'utilisation des sources renouvelables d'énergie. La problématique générale posée par les systèmes utilisant une source renouvelable d'énergie d'origine phénomène (vent, soleil) est la suivante : comment utiliser au mieux un flux énergétique (éclairage solaire, vitesse de vent) fortement dépendant du temps et de l'espace pour répondre à une demande énergétique présente généralement sous une autre forme, elle aussi aléatoire dans le temps ? La particularité des chaînes de conversion solaire ou éolienne, comme celle de tout système à intrant énergétique d'origine phénomène provient du caractère aléatoire de la source du fait des variations météorologiques non prévisibles. Ainsi, même pour un système parfaitement connu d'un point de vue mathématique et technique, certaines grandeurs telles que rendement, efficacité ou productivité restent liées aux fluctuations spatio-temporelles de la source mais également de la charge.

C'est donc pour cette raison que la connaissance et la caractérisation de la source énergétique doivent être étudiées de manière très précise. L'extrait énergétique (la consommation) est lié quant à lui aux besoins de l'utilisateur et/ou aux caractéristiques du réseau de distribution d'énergie. C'est pour cette raison, que la première partie de mes travaux se concentre sur la connaissance et la caractérisation de la source énergétique qu'elle soit solaire ou éolienne. Ainsi, nos principales activités de recherches portent sur : - l'étude des ressources énergétiques : absolument nécessaire pour les raisons exposées précédemment : étude statistique, développement de corrélation et de modèle, interprétation physique des phénomènes. - la production d'énergie à grande échelle à partir de sources renouvelables : très souvent, il s'agit de systèmes directement connectés au réseau de

distribution. Cette production pose des problèmes du fait de sa forte variabilité qui perturbe le fonctionnement du réseau de distribution.

Il faut donc étudier les interactions dynamiques inévitables entre l'offre et la demande, et analyser l'intervention de plusieurs facteurs tels que : centralisation ou distribution des systèmes de production, stockage d'énergie, taille du réseau, .... Pour préserver la stabilité du réseau au fur et à mesure de l'augmentation de la capacité installée. - les systèmes de production multi sources (appelés hybrides) : il s'agit de systèmes d'approvisionnement en électricité, la plupart du temps pour l'alimentation des sites isolés (mais dont l'application en mode connexion réseau électrique est également envisagée) couplant divers types de productions telles qu'éolienne, photovoltaïque et autres. Ils permettent une fourniture d'électricité plus fiable et moins coûteuse. Devant la complexité de ces systèmes, il convient de développer des méthodes de dimensionnement intégrant une optimisation de la gestion de l'énergie et une étude de coût optimal de production.

Le but des travaux entrepris sur ces systèmes n'est pas de rendre compte de l'évolution précise des paramètres entrant dans son fonctionnement tels que la tension, l'intensité, mais à partir de variables purement énergétiques (et non électriques) de dimensionner les différents sous-systèmes et de choisir la meilleure stratégie de fonctionnement pour chaque sous-système. Dans ce cadre, la modélisation physique globale utilisée permet de décrire le comportement de chaque sous système, puis on adjoint une étude de coût de production pour finaliser l'optimisation.

## **1. INTRODUCTION**

Le marché de la production d'électricité à partir de l'énergie solaire croît fortement depuis une dizaine d'années. Dans ce contexte, les générateurs photovoltaïques connectés au réseau de distribution de l'électricité prennent de plus en plus d'importance. La quantification, pour ces applications, des performances de l'élément fondamental de ces générateurs, le module photovoltaïque, est donc essentielle. Aujourd'hui, les performances des modules sont exprimées en termes de puissance maximale délivrée dans des conditions standard. Or, du point de vue énergétique comme financier, c'est la quantité d'énergie délivrée, en fonction du lieu et de la mise en œuvre des modules, qui importe.

C'est pourquoi les travaux de recherche sur les méthodes de prédiction du comportement des modules, en ensoleillement réel, et en termes d'énergie produite ou de rendement moyen en conditions réelles de fonctionnement, sont particulièrement importants. De nombreux travaux sur le comportement électrique des modules mettent en avant plusieurs facteurs qui ont une influence sensible sur le rendement de la conversion du rayonnement en électricité : le niveau d'éclairement incident sur les modules, le spectre de ce rayonnement et la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques au sein du module.

Les lois comportementales que l'on en déduit doivent, pour aboutir à une quantification du rendement moyen des modules, être appliquées aux différents climats qu'il peut rencontrer. Plusieurs méthodes permettent ainsi de caractériser, pour les applications photovoltaïques, un climat local. On distingue, parmi ces méthodes, celles qui consistent à étendre les modèles par pas de temps à des périodes de l'ordre d'un an, de celles qui privilégient dans les calculs, une grandeur essentielle : l'éclairement. En effet, plusieurs auteurs soulignent l'intérêt des propriétés statistiques des paramètres en jeu en fonction des niveaux d'éclairement possibles, et, en particulier, la température de module moyenne en fonction de l'éclairement. C'est sur ce point que porte l'essentiel du travail présenté dans ce document.

Il est, de plus, important de noter que seul le comportement thermique du module aux moments où le niveau d'énergie qu'il reçoit est grand sera abordé dans cette thèse, l'étude ayant pour objectif de servir à améliorer la prise en compte de l'échauffement des modules dans la prédiction de la quantité d'énergie qu'ils peuvent délivrer. En particulier, la thermique du module la nuit, qui est intéressante pour sa caractérisation en tant qu'élément de l'enveloppe du bâtiment, n'est pas traitée. Les modules photovoltaïques constituent un système thermique relativement simple : une plaque, soumise à un écoulement variable (le vent), et à un environnement radiatif donné (le ciel et le sol, ou, éventuellement le toit), absorbe le rayonnement solaire dans le visible, en convertit une partie en courant continu, et s'échauffe. Les modèles de simulation des profils de température de module au cours d'une journée s'appuient sur la mise en équation de ce bilan énergétique. La quantification des paramètres des lois gouvernant la dissipation de l'énergie sous forme convective ou radiative, du module vers son environnement, est la principale difficulté du calcul.

Toutefois, le principe même de la méthode, qui suppose connus les profils des paramètres météorologiques en entrée des modèles pour de longues périodes, est souvent mis en défaut : la connaissance empirique d'un climat local est rarement disponible sous une forme aussi fine, et les données, quand elles existent sous cette forme, présentent souvent des lacunes. D'autres approches permettent de caractériser un climat local par un nombre plus restreint de grandeurs. Le travail présenté dans ce document porte pour l'essentiel sur l'une d'entre elles : l'utilisation d'un « profil de site », c'est-à-dire des propriétés statistiques des variables en jeu à tous les niveaux d'éclaircissements possibles. L'objectif de cette thèse est donc d'intégrer une modélisation de la thermique des modules à cette méthode. La mise en œuvre d'outils statistiques appliqués aux probabilités conditionnelles des variables à éclaircissement fixé est justifiée par le développement, au sein du laboratoire, d'une méthode de caractérisation des modules en fonction du niveau d'éclaircissement effectivement « vu » par les cellules, qui doit permettre, à court terme, de prédire de façon précise la production énergétique. La démarche générale consiste donc à mettre en regard des études analytiques ponctuelles des phénomènes et les propriétés statistiques des grandeurs qui sont en jeu, les premières étant essentielles à la détermination des secondes. Ainsi, la caractérisation d'un système, constitué de modules, d'une mise en œuvre et d'un climat local, par des séries de tests rapides, est une question également soulevée par la problématique de cet article.

Pour atteindre ces objectifs, on s'appuiera dans un premier temps sur les nombreuses études thermiques consacrées aux modules photovoltaïques, présentées en première partie. On montrera que des études ponctuelles, portant sur les phénomènes de dissipation de la chaleur, doivent être menées pour conclure. La deuxième partie est consacrée à l'étude des échanges radiatifs avec le ciel et aux lois phénoménologiques de convection : il s'agit de proposer des protocoles expérimentaux permettant de relier des grandeurs rarement mesurées à des paramètres courants du domaine, et de faire en sorte qu'une campagne de mesures courtes puisse aboutir à des résultats exploitables pour le long terme.

Cette étude expérimentale repose, pour l'essentiel, sur la mesure de flux thermiques, au moyen de différents types de fluxmètres : pyranomètres pour le rayonnement visible, pyromètres pour l'infrarouge et fluxmètres à gradients tangentiel, associés à des thermocouples, pour les flux convectifs. Après avoir présenté la synthèse de ces éléments de modélisation au sein d'un outil de

simulation des profils de température, on la mettra en œuvre, moyennant deux hypothèses supplémentaires, pour les profils de site. Des propriétés statistiques des variables météorologiques, que l'on présente au début de la troisième partie, mettent en avant l'intérêt que peuvent représenter, pour obtenir une caractérisation encore plus synthétique d'un climat local, des grandeurs pondérées par l'énergie solaire incidente dans le plan des modules. Un travail d'analyse des profils des variables météorologiques permet ainsi, dans le deuxième temps de la troisième partie, d'aboutir à un algorithme de calcul de ces grandeurs. Il est rendu possible par la structuration des données expérimentales en bases de données, sur lesquelles on effectue des requêtes en fonction des besoins de modélisation.

### **1.1 Influence de la température de modules photovoltaïques sur la production d'électricité**

L'énergie solaire est une énergie primaire abondante et gratuite, bien répartie à la surface de la terre. Elle peut être convertie en énergie thermique ou en électricité selon la technologie des capteurs. Les modules photovoltaïques constituent les éléments primaires des systèmes photovoltaïques, qui permettent la conversion du rayonnement solaire en électricité. Sur le marché, les modules photovoltaïques sont caractérisés par leur puissance crête, qui est déterminée en laboratoire, dans des conditions qui correspondent rarement à celles qu'ils rencontrent quand ils sont mis en œuvre sur le terrain. Dans un souci d'amélioration du dimensionnement des systèmes, de garantie de résultats et de lisibilité pour les clients, il est important de proposer des méthodes pour mieux prédire leurs performances une fois qu'ils sont installés.

L'objet de ce chapitre est de montrer le rôle que peut jouer l'étude de la thermique des modules photovoltaïques pour atteindre ces objectifs. Le rendement de la conversion photovoltaïque est lié à la température de fonctionnement des modules : il diminue lorsque la température augmente. Ainsi, la grandeur que l'on doit chercher à déterminer est la température de cellule lorsque le module est installé. Après avoir quantifié la dépendance entre rendement et température de cellule, pour situer l'enjeu, on présentera les transferts thermiques dans et autour des modules, ainsi qu'une mise en équation adaptée au problème. Enfin, plusieurs variables météorologiques, qui gouvernent les différents phénomènes de dissipation de la chaleur des cellules vers l'extérieur, ont une

influence sensible sur le comportement thermique des modules. L'étude de cette influence permettra de dégager deux phénomènes essentiels auxquels on attachera une importance particulière dans la suite du travail.

## 1.2 Production photovoltaïque d'électricité

### 1.2.1 Ressource solaire

Le soleil émet un flux d'énergie que l'on peut décrire de façon approximative par le rayonnement thermique d'un corps noir à 5760 K (RICAUD, 1997) : la densité de puissance rayonnée par le soleil est approchée par la loi de Stefan :  $\sigma T^4 = \frac{P}{A} \cong \frac{P}{A} = \text{Boltzman-Stefan de}$  (constante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) : avec  $T = 5760 \text{ K}$  (1) Lorsque ce flux intercepte, selon la normale, une surface extérieure à l'atmosphère, sa densité vaut en moyenne  $1350 \text{ W/m}^2$  environ. Cette grandeur est appelée constante solaire ; elle varie en fonction de l'activité solaire et du fait de l'ellipticité de l'orbite terrestre. La variation est inférieure à  $\pm 3 \%$ . A l'extérieur de l'atmosphère, une surface horizontale (c'est-à-dire orthogonale à un rayon de la Terre) d'un mètre carré reçoit donc en moyenne environ  $340 \text{ W}$  (soit le quart de la constante solaire, ce qui correspond au rapport entre l'aire du disque terrestre et celle de la sphère terrestre). Pour une année, cela représente une énergie plus de 10 000 fois supérieure à la consommation mondiale d'énergie primaire en 2003 (statistique de l'Agence Internationale de l'Energie - IEA -, publiées en 2005 1).

Le rayonnement solaire est ensuite en partie réfléchi, en partie diffusé à l'intérieur de l'atmosphère, si bien que, au niveau du sol, on distingue deux composantes : l'éclairement direct, en provenance de la portion de la voûte céleste occupée par le soleil (angle solide d'une ouverture de  $5^\circ$  autour du soleil), et le rayonnement diffus, en provenance du reste du ciel. Le rayonnement diffus est la résultante de plusieurs phénomènes : diffusion par les molécules (diffusion de Rayleigh, qui est à l'origine de la couleur bleue de l'atmosphère) ou par des aérosols (diffusion de Mie, indépendante de la longueur d'onde du rayonnement), réflexion sur les nuages ou des poussières. La Figure 1 illustre schématiquement ces phénomènes. La conversion photovoltaïque concerne les deux composantes de l'éclairement, ce qui rend possible la production d'électricité solaire même au cours de journées nuageuses.

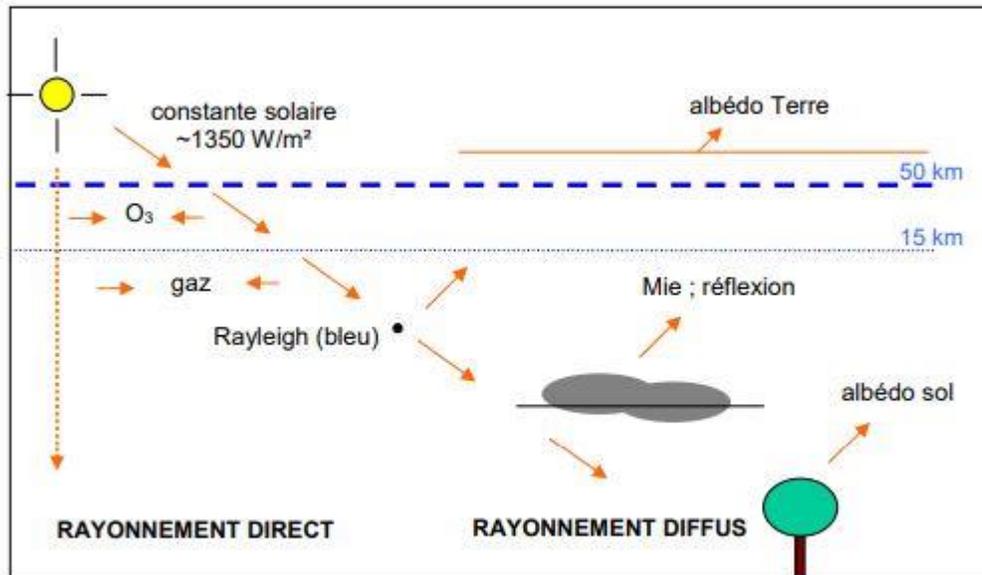


Figure 1. Composantes directe et diffuse de l'éclairement au niveau du sol.

### 1.2.2 Principe général de fonctionnement d'un système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques permettent de convertir de rayonnement solaire en électricité sous forme de courant continu (voir Figure 3). Le rayonnement est absorbé au niveau de cellules semi-conductrices : les photons dont l'énergie est suffisante libèrent des paires électrons - trous qui sont collectées dans un circuit électrique. Le rendement de la conversion varie de quelques pourcents, pour les cellules dites organiques ou le silicium amorphe, à 10 – 14 % pour les modules au silicium cristallin commerciaux et, pour d'autres semi-conducteurs, à 25 % en laboratoire ou pour des applications spatiales. Le principe de conversion du rayonnement en courant, l'effet photovoltaïque, sera détaillé. Les cellules sont connectées entre elles au sein d'un module photovoltaïque. Le montage (en série ou en parallèle) des cellules détermine la tension et le courant aux bornes du module, dont la puissance dans des conditions de laboratoire varie de 40 à 200 Wc (Watt crête) pour la plupart des modules commerciaux.

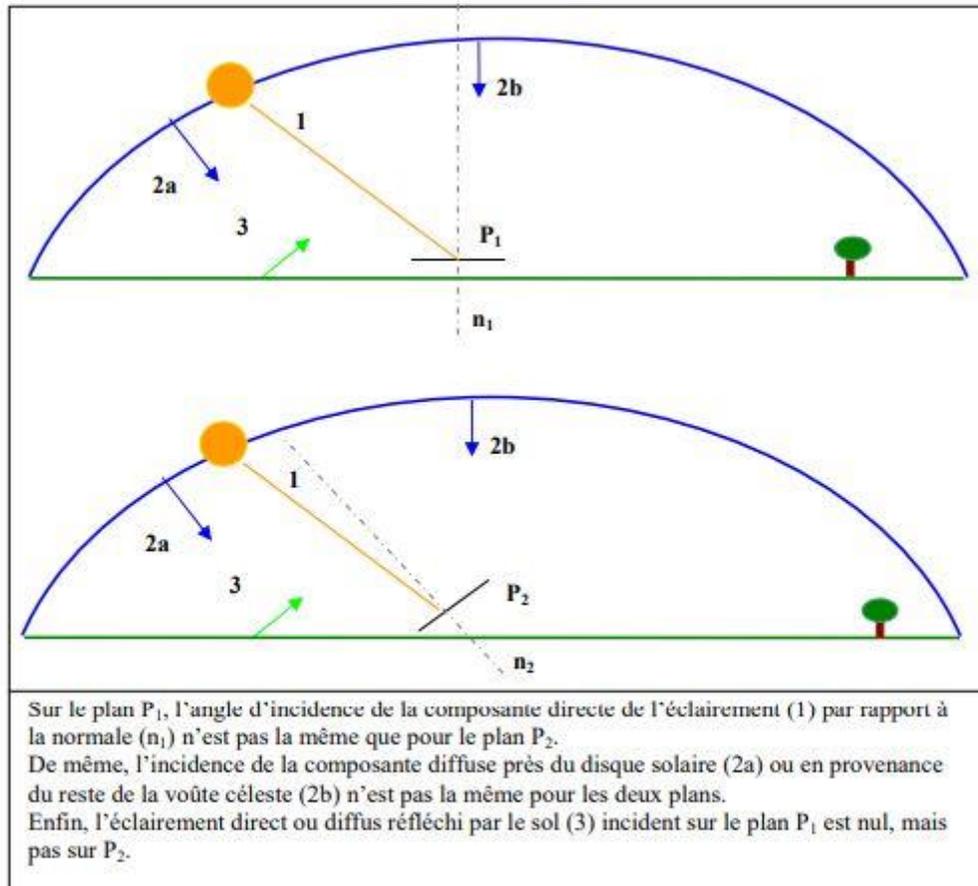


Figure 2. Ressource solaire et orientation du plan du capteur.

## 2. METHODOLOGIE

Dans cette partie, les aspects méthodologiques en sont l'une des parties les plus importantes. Pour cette raison, le but est d'expliquer ces aspects méthodologiques de l'entreprise. Les principaux axes de ces aspects sont à savoir : les approches utilisées, les méthodes de collecte des données et les instruments de recherche, le plan d'échantillonnage (population, techniques d'échantillonnage, taille de l'échantillon) ainsi que les méthodes de traitement des données.

### 2.1 Conception de l'étude

La conception de l'étude étant un cadre qui a été établi pour rechercher des réponses aux questions de recherche, elle permet d'aborder efficacement le problème de la recherche de manière logique et aussi sans ambiguïté que possible. À cet égard, la conception de cette étude est basée sur les principes fondamentaux de la recherche exploratoire où l'intention n'est pas de fournir des preuves concluantes, mais aide à avoir une meilleure compréhension du problème en explorant le sujet de recherche avec différents niveaux de profondeur (Saunders, 2012).

## **2.2 Stratégie de l'étude**

Cette recherche se réfère aux critiques, documentations et autres matériels de lecture et les réactions de l'entretien lors de la collecte des données doivent être pris en compte. En s'adressant aux littératures écrites, cela peut aider à interpréter et à mieux comprendre la réalité complexe d'une situation donnée de manière qualitative. L'approche de cette étude est qualitative car elle explore et comprend comment formuler des stratégies pour le relèvement d'un secteur de la santé en crise car elle suppose que le sens et les connaissances sont construits dans un contexte social et cherchent à comprendre les perspectives subjectives des participants (validité sociale) pour fournir une description riche des phénomènes.

## **2.3 Collecte de données**

En général, la collecte de données peut être utilisée grâce à diverses techniques. Il existe principalement deux manières différentes : par des données primaires et secondaires. Les données primaires sont des données qui ont été collectées spécialement à cette fin. Cela implique à la source d'origine de première main, alors que les données secondaires se réfèrent aux informations collectées par d'autres (Bryman et Bell, 2011).

## **2.4 Outils et méthodes de collecte de données : documentation**

La recherche documentaire fait référence à la bibliothèque et à la documentation en ligne. Il se compose de livres, d'articles de synthèse, de rapports et d'autres documents écrits dans la ligne de l'étude. En outre, des données en ligne ont été collectées ; ces données complétaient celles que nous n'avons pas trouvées dans les livres.

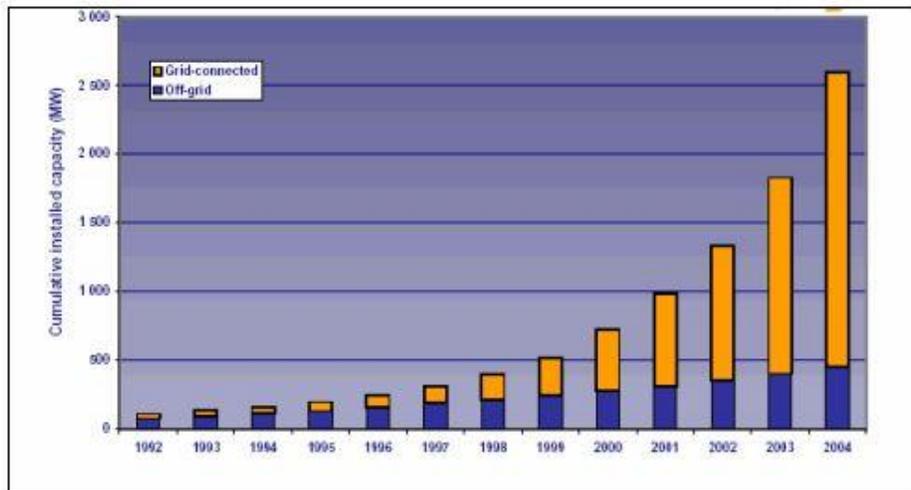
## **2.5 Analyse des données**

L'analyse des données est le processus de description et d'évaluation des données. Cependant, la base de la recherche réside dans l'interprétation des données et dans la description de l'expérience vécue des êtres humains (Atkinson et al 2001). Comme la nature de cette étude s'inspire des sources de données des données primaires et secondaires, leur analyse sera basée sur l'approche interprétative ou analytique qui se concentre sur la façon dont les répondants interprètent leur réalité subjective et y attachent un sens. Comme cette étude est qualitative, il n'y a pas de manière unique d'analyser les données qualitatives (Powell et Renner, 2003 :1), nous ne nous sentons pas obligés de séparer une partie de l'analyse des données. Pourtant, nous aurons des résultats directs de la documentation et les relierons à ce qui a été dit par les observateurs dans leurs littératures et obtiendrons l'analyse des données en utilisant le prisme des cadres théoriques et conceptuels conçus pour cette étude.

### **3. RESULTATS**

#### **3.1 Marché du photovoltaïque**

Si, historiquement, les applications spatiales ont été à l'origine du développement du photovoltaïque dans les années 50, les applications terrestres, qui ont commencé à se répandre à relativement grande échelle après le premier choc pétrolier, représentent aujourd'hui un marché important. Il connaît une forte croissance (entre + 10 % et + 30 % selon les années) depuis plusieurs années. Il est nettement dominé par le Japon, l'Allemagne et les Etats-Unis, dans lesquels a été installée près de 90 % de la puissance crête totale installée en 2004, soit 680 MWc (Watt crête, voir 2.1). Dans les pays participant au programme Photovoltaic Power Systems (PVPS) de l'IEA, la part relative des systèmes raccordés au réseau est de plus en plus importante : les programmes d'intégration au bâtiment ou de mise en œuvre de systèmes sur toiture, par exemple en Allemagne (100 000 Dächer Programm), dynamisent le marché.



### 3.2. Température et effet photovoltaïque

Dans un semi-conducteur cristallin, par exemple le silicium, la structure cristalline détermine les différents niveaux d'énergie accessibles aux électrons. Ces niveaux d'énergie constituent deux ensembles que l'on peut considérer continus : les bandes de valence et de conduction, séparées par une bande interdite, dont la largeur, ou gap (de l'ordre de l'électron-Volt), dépend du matériau. On peut introduire une impureté dans le réseau cristallin : c'est un atome dit dopant. L'atome est accepteur d'électron s'il est situé sur la colonne précédente de l'élément constitutif du réseau dans la classification périodique des éléments, il est donneur s'il est sur la colonne suivante. On peut doper le silicium avec du bore (dopage P : il y a un excès de trous) ou avec du phosphore (dopage N : excès d'électrons). Lorsqu'on met en contact un semi-conducteur dopé N et un semiconducteur dopé P, on obtient une jonction p-n. Les cellules photovoltaïques sont des jonctions p-n. Au niveau de la jonction, les porteurs de charge en excès diffusent vers l'autre couche (les électrons de n vers p, les trous de p vers n) : c'est le courant de diffusion.

Ce courant permet aux électrons de la zone n de se recombiner avec les trous de la zone p, et inversement : il apparaît une zone sans porteurs de charges, et, ainsi, un champ électrique (tension de diffusion) qui s'oppose au courant. Lorsque la cellule est soumise à un rayonnement, les photons d'énergie supérieure au gap peuvent créer une paire électron-trou ; les porteurs de charge sont alors

séparés par la tension de diffusion et collectés sur les deux faces de la cellule : on récupère un courant continu. L'excès d'énergie par rapport au gap est dégradé en chaleur.

### **3.3 Thermique des modules photovoltaïques**

#### **3.3.1 Description d'un module au silicium cristallin**

Un module photovoltaïque au silicium cristallin est composé d'un ensemble de cellules, connectées en série / parallèle, de façon à obtenir les niveaux de courant et de tension souhaités. Pour optimiser le système d'un point de vue optique, c'est-à-dire pour minimiser les pertes par réflexion, une couche antireflet est déposée à la surface des cellules, qui leur donne une couleur bleue caractéristique. Ces cellules sont maintenues mécaniquement par l'encapsulation du module, en éthylvinyl-acétate (EVA), qui est un polymère que l'on fond pour coller les cellules au verre trempé, d'épaisseur variable.

L'ensemble cellule, EVA et verre constitue la face avant du module. En face arrière, selon les applications, la protection des cellules est assurée soit par une feuille de Tedlar, soit par du verre, maintenus par une nouvelle couche d'EVA. De la face arrière à la face avant, on a donc les couches suivantes :

- du verre, dont l'épaisseur est comprise entre 3 et 4 mm selon les constructeurs,
- une couche fine d'EVA, qui sert de colle (le procédé industriel consiste à faire fondre une feuille d'EVA : il est difficile de déterminer avec précision son épaisseur après solidification),
- une couche mince optique (en général 75  $\mu\text{m}$  de  $\text{TiO}_2$ ),
- une cellule photovoltaïque (de 200 à 300  $\mu\text{m}$  environ, selon l'année de production ; l'épaisseur de silicium tend à diminuer avec les améliorations des procédés industriels),
- une couche d'EVA de 0,4 à 0,5 mm ; ces valeurs sont fonction du procédé et tendent également à diminuer,
- une feuille protectrice en Tedlar ou du verre (modules bi-verres). Les propriétés thermo physiques de ces matériaux sont référencées dans différents abaques ou ouvrages propres au domaine photovoltaïque.

## Conclusion

Le résultat de l'étude montre que les modules sont d'autant mieux refroidis qu'ils sont loin de la toiture ; l'influence de leur mise en œuvre peut dégrader le rendement, en relatif, d'environ 1 %. L'intérêt du calcul mis en œuvre, outre ce résultat, est qu'il rend possible la comparaison de deux systèmes testés sous des conditions météorologiques différentes. On peut ainsi imaginer que, pour un site et une mise en œuvre dont on connaît bien les propriétés météorologiques et thermiques (lois de convection et température de ciel), une campagne de mesure courte, permettant de caractériser, en ensoleillement réel, les modules utilisés, soit extrapolée à une période plus longue. L'approche par profil de site est donc un outil intéressant de prédiction de production d'électricité photovoltaïque. En ce sens, le profil de site semble être l'outil le mieux adapté à la représentation synthétique d'un climat local en vue d'applications photovoltaïques.

## REFERENCES

- Voyant, C. (2011). *Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels* (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- Nocito, C. (2010). *Développement d'un textile intégrant des cellules photovoltaïques pour application de protection solaire store enroulable* (Doctoral dissertation, Lille 1).
- Chabaud, A., Eynard, J., & Grieu, S. (2013, July). Gestion multicritère des ressources énergétiques à l'échelle d'un habitat individuel: interaction bâtiment/réseau électrique. In *5èmes Journées Doctorales/Journées Nationales MACS* (Vol. 5, pp. Communication-JD).
- Kamel, L. (2016). *Gestion d'énergie dans un réseau intégrant des systèmes à source renouvelable* (Doctoral dissertation, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE).

- AMOUSSOU, I. (2017). Dimensionnement technico-économique d'une centrale de production d'énergie solaire photovoltaïque connectée au réseau.