

L'énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs

L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE POUR LES INGÉNIEURS CONCEPTEURS

ECAMPUSONTARIO



L'énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs Droit d'auteur © 2024 par eCampusOntario est sous licence Licence Creative Commons Attribution 4.0 International, sauf indication contraire.

TABLE DES MATIÈRES

AVIS SUR LES DROITS D'AUTEUR ET LICENCE CREATIVE COMMONS	vii
Préface	viii
À PROPOS DE CET OUVRAGE	ix

Partie I. Partie I. Corps principal

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION À L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	1
CHAPITRE 2 : ÉVALUATION DES RESSOURCES SOLAIRES	13
CHAPITRE 3 : TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES	18
CHAPITRE 4 : ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES	19
CHAPITRE 5 : SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDÉS AU RÉSEAU ET DIMENSIONNEMENT DES BRANCHES	20
ANNEXE : LECTURES COMPLÉMENTAIRES ET RÉFÉRENCES	21

AVIS SUR LES DROITS D'AUTEUR ET LICENCE CREATIVE COMMONS



Le document L'énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs par Bilal Shahid est protégé sous droits d'auteur et est sous licence Creative Commons Attribution 4.0 International, sauf mention contraire.

Avis sur les droits d'auteur

Le contenu du présent site Web (ou de la présente publication) est protégé par des droits d'auteur et est la propriété intellectuelle de Bilal Shahid. Tous droits réservés, sauf indication contraire.

Licence Creative Commons :

Sauf indication contraire, le contenu créé par Bilal Shahid est placé sous licence internationale Attribution 4.0 de Creative Commons. Vous êtes libre de :

- Partager : copier et redistribuer le matériel par le moyen ou dans le format de votre choix.
- Adapter : remanier, transformer et exploiter le matériel à quelque fin que ce soit, même à des fins commerciales.

Selon les modalités suivantes :

- Attribution : Vous devez mentionner la source de manière appropriée en fournissant un lien vers le contenu original et en indiquant si des modifications ont été apportées. Vous devez le faire d'une manière raisonnable, sans toutefois suggérer que Bilal Shahid vous approuve ou approuve votre utilisation du matériel.

Pour toute réutilisation ou distribution, vous devez indiquer clairement aux tiers les modalités de la licence de ce document. La meilleure façon de le faire est d'inclure un lien vers cette page Web.

Pour toute question ou demande de renseignements sur les autorisations dépassant le cadre de la présente licence, veuillez communiquer avec Bilal Shahid à l'adresse [Bshahid@conestogac.on.ca].

PRÉFACE

Dans le paysage en évolution constante de l'ingénierie, la recherche de solutions énergétiques durables et innovantes est devenue primordiale. Parmi ces solutions, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est un exemple de prouesse technologique, car elle exploite la puissance inépuisable de la lumière du soleil pour produire de l'électricité propre et renouvelable. Cet ouvrage, intitulé « L'énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs », propose un voyage complet au cœur de la technologie photovoltaïque, dévoilant ses principes, ses méthodologies de conception et la science complexe qui contribue à ses capacités de transformation.

Alors que notre monde est confronté au besoin urgent d'utiliser des énergies de remplacement respectueuses de l'environnement, le rôle des ingénieurs concepteurs devient de plus en plus crucial. Cet ouvrage est conçu pour servir de guide complet, dotant ainsi les ingénieurs concepteurs et les passionnés en herbe d'énergie solaire des connaissances et des compétences nécessaires pour naviguer dans les complexités des systèmes solaires photovoltaïques. Des principes fondamentaux de la physique des semi-conducteurs aux nuances de la conception des systèmes, chaque chapitre est méticuleusement adapté pour fournir un mélange équilibré de compréhension théorique et d'idées pratiques.

Tout au long de ce voyage, l'ouvrage intègre également des équations, des schémas et des calculs pour combler le fossé entre la théorie et l'application. Les définitions sont démystifiées, les abréviations clarifiées et les complexités techniques démêlées pour habiliter les lecteurs de différents niveaux d'expertise.

« L'énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs » n'est pas uniquement un guide, c'est une invitation à partir à la découverte de l'excellence en ingénierie, de pratiques durables et d'un avenir où l'énergie solaire nous illuminera tous. Joignez-vous à nous pour naviguer sur les chemins resplendissants de la technologie solaire photovoltaïque, où l'innovation se retrouve au carrefour de la responsabilité, et où les ingénieurs concepteurs deviennent les architectes d'un avenir plus radieux.

À PROPOS DE CET OUVRAGE

Bilal Shahid

L'énergie solaire photovoltaïque pour les ingénieurs concepteurs est un guide complet à l'intention des ingénieurs, des architectes et des concepteurs qui souhaitent intégrer des solutions d'énergie solaire dans leurs projets. Cet ouvrage aborde les principes fondamentaux de la technologie photovoltaïque, offrant un équilibre entre les connaissances théoriques et les applications pratiques. Grâce à ses discussions approfondies sur la conception des cellules, les composants du système et l'analyse des performances, ce livre constitue une ressource précieuse tant pour les professionnels que pour la population étudiante. Que votre emploi consiste à concevoir des bâtiments durables ou à travailler sur des projets d'énergie renouvelable, ce livre vous apportera les connaissances et les outils nécessaires pour exploiter efficacement la puissance de l'énergie solaire photovoltaïque.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION À L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

1.1 Aperçu de la technologie photovoltaïque

La technologie photovoltaïque, ou PV, représente une méthode révolutionnaire pour exploiter l'énergie solaire et la convertir en électricité. La technologie PV repose sur le principe de l'effet photovoltaïque, selon lequel certains matériaux génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Ce chapitre donne un aperçu exhaustif des principes clés sous-jacents à la technologie photovoltaïque, en explorant les concepts fondamentaux du rayonnement solaire, de la physique des semi-conducteurs et des mécanismes complexes qui facilitent la transformation de la lumière du soleil en une source d'énergie électrique utilisable.

La section commence par examiner la structure de base des cellules photovoltaïques, en soulignant l'importance des matériaux semi-conducteurs lorsqu'il s'agit de capter et de convertir la lumière du soleil. Le lecteur découvrira les processus complexes qui se déroulent aux niveaux atomique et moléculaire, et comprendra comment les photons excitent les électrons pour ensuite lancer le flux de courant électrique. En mettant l'accent sur les différents types de cellules photovoltaïques, y compris les technologies monocristallines, polycristallines et à couche mince, cette section jette les bases d'une exploration plus approfondie des aspects liés à la conception et à la construction de ces cellules au cours des chapitres suivants.

L'effet photovoltaïque

Lorsque les photons, les particules élémentaires de la lumière, entrent en collision avec d'autres matériaux, ils transmettent leur énergie aux électrons, les libérant de leur confinement atomique et déclenchant un flux de charges électriques.

L'effet photoélectrique est décrit par l'équation suivante :

$$E = h \cdot f - \phi$$

Dans laquelle,

- E représente l'énergie de l'électron émis,
- h représente la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J·s),
- f représente la fréquence de la lumière incidente,
- ϕ correspond au travail d'extraction du matériau, représentant l'énergie minimale requise pour libérer un électron.

Cette équation montre que pour qu'il y ait une émission photoélectrique, l'énergie des photons incidents ($h \cdot f$) doit être supérieure ou égale au travail d'extraction du matériau (ϕ). Si l'énergie des photons excède le travail d'extraction, l'énergie excédentaire contribue à l'énergie cinétique des électrons émis.

Concepts fondamentaux : Rayonnement solaire et physique des semi-conducteurs

Afin de comprendre la chorégraphie complexe de l'effet photovoltaïque, il faut d'abord saisir les concepts fondamentaux du rayonnement solaire et de la physique des semi-conducteurs. Le rayonnement solaire, c'est-à-dire l'énergie radiante émise par le soleil, constitue la principale source d'énergie des systèmes photovoltaïques. Il est ainsi primordial de comprendre les caractéristiques du rayonnement solaire, notamment son intensité, son spectre et sa variabilité, en vue d'optimiser les performances des cellules photovoltaïques.

La physique des semi-conducteurs, fondement de la technologie photovoltaïque, dévoile les secrets des matériaux qui servent de catalyseurs à l'effet photovoltaïque. Les matériaux semi-conducteurs, généralement le silicium cristallin, ouvrent la voie à la capture et à la conversion efficaces de la lumière du soleil en électricité. Cette section se penche sur les niveaux atomique et moléculaire des semi-conducteurs, offrant aux lecteurs une vue microscopique des matériaux qui forment l'ossature des cellules photovoltaïques.

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle des conducteurs (comme les métaux) et celle des isolants (les éléments non métalliques). La conductivité d'un semi-conducteur peut être commandée et modifiée, ce qui en fait un composant clé dans le domaine de l'électronique. Bien qu'il existe de nombreux autres matériaux qui présentent des propriétés semi-conductrices, le silicium (Si) et le germanium (Ge) sont les semi-conducteurs les plus courants.

Voici les principales caractéristiques des semi-conducteurs :

1. **Conductivité** : Les semi-conducteurs ont des niveaux de conductivité qui se situent entre les conducteurs et les isolants. Ils sont conducteurs d'électricité dans certaines conditions, mais peuvent aussi agir comme des isolants dans d'autres conditions.
2. **Largeur de bande interdite** : Les semi-conducteurs ont une bande interdite, une plage d'énergie dans laquelle aucun électron ne peut exister. Cette largeur de bande interdite est essentielle pour déterminer la conductivité du matériau. Il existe deux types de semi-conducteurs en fonction de leur bande interdite : les semi-conducteurs intrinsèques et les semi-conducteurs extrinsèques.
 - **Semi-conducteurs intrinsèques** : Semi-conducteurs purs sans impuretés intentionnelles. Le silicium et le germanium sont des semi-conducteurs intrinsèques.
 - **Semi-conducteurs extrinsèques** : Semi-conducteurs dopés intentionnellement avec des impuretés pour modifier leurs propriétés électriques. Ce processus génère des porteurs de charge, soit des électrons, soit des électrons-trous, ce qui améliore la conductivité. Les semi-conducteurs extrinsèques sont plus couramment utilisés dans les dispositifs électroniques.

En physique des semi-conducteurs, les matériaux de type P (positif) et de type N (négatif) sont deux types de semi-conducteurs distincts qui jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des dispositifs électroniques, y compris les cellules solaires et les transistors. Ces matériaux sont généralement constitués de semi-conducteurs tels que le silicium ou le germanium.

Matériau de type P

1. **Dopage avec accepteurs :** Les semi-conducteurs de type P sont créés en introduisant certains atomes d'impureté, appelés accepteurs, dans le réseau cristallin du matériau semi-conducteur. Parmi les accepteurs courants, on trouve le bore (B) dans le silicium.
2. **Formation d'électrons-trous :** L'introduction d'atomes accepteurs crée un excès d'électrons-trous dans le réseau cristallin du semi-conducteur. Un électron-trou est essentiellement une position vacante où un électron pourrait exister. Ces électrons-trous se comportent comme des porteurs de charge positifs.
3. **Mobilité de l'électron-trou :** Dans les matériaux de type P, les porteurs de charge prédominants sont les électrons-trous positifs. Lorsqu'une tension externe est appliquée, ces électrons-trous se déplacent dans le matériau, contribuant ainsi à la circulation du courant électrique. Toutefois, il est important de noter que les électrons (porteurs de charges négatives) existent également dans les matériaux de type P, mais qu'ils sont minoritaires.
4. **Représentation symbolique :** Les semi-conducteurs de type P sont souvent représentés par l'ajout du symbole « + », de la manière suivante : Si+.

Matériau de type N

1. **Dopage avec donneurs :** Les semi-conducteurs de type N sont le résultat de l'introduction de certains atomes d'impureté, appelés donneurs, dans le réseau cristallin du semi-conducteur. Les donneurs les plus courants sont le phosphore (P) dans le silicium.
2. **Excès d'électrons :** Les atomes donneurs créent un excès d'électrons libres dans le réseau cristallin. Ces électrons libres deviennent les porteurs de charge prédominants dans les matériaux de type N.
3. **Mobilité d'un électron :** Lorsqu'une tension externe est appliquée, ces électrons libres se déplacent dans le matériau, contribuant ainsi au courant électrique. Bien que les électrons-trous (porteurs de charges positives) existent également dans les matériaux de type-N, ils sont minoritaires.
4. **Représentation symbolique :** Le symbole des semi-conducteurs de type N est souvent indiqué par l'ajout du symbole « - », de la manière suivante : Si⁻.

Jonction P-N

Lorsqu'un semi-conducteur de type P est mis en contact avec un semi-conducteur de type N, une jonction P-N se forme. À la jonction, les électrons du matériau de type N diffusent dans le matériau de type P et se

recombinent aux électrons-trous. Cela crée une zone de déplétion avec une charge négative nette du côté du type P et une charge positive nette du côté du type-N. Le champ électrique qui en résulte s'oppose à toute diffusion ultérieure des électrons, établissant ainsi un équilibre.

La jonction P-N est fondamentale dans les dispositifs à semi-conducteurs, servant de base aux diodes, aux transistors et aux cellules solaires. La compréhension du comportement des matériaux de type P et de type N est essentielle pour la conception et l'optimisation des performances de ces dispositifs dans diverses applications électroniques.

Ballet atomique : Comment les photons excitent les électrons

Au cours de son voyage au cœur de la technologie photovoltaïque, le lecteur assiste à l'envoûtant ballet atomique où les photons insufflent de l'énergie aux électrons, les libérant de leurs orbites stables. Cette danse, régie par les lois de la mécanique quantique, constitue l'essentiel de l'effet photovoltaïque. Des expressions techniques, comme l'énergie de la bande interdite, où les électrons passent d'un niveau d'énergie à un autre, et les spectres d'absorption, qui déterminent les longueurs d'onde de la lumière absorbée, deviennent le langage par lequel les ingénieurs communiquent avec le monde quantique.

Ce chapitre dévoile les subtilités des schémas de bandes d'énergie, et illustre comment les matériaux semi-conducteurs créent un environnement propice à la conversion efficace de l'énergie solaire. Des expressions telles que bandes de valence et bandes de conduction sont essentielles pour définir les états d'énergie des électrons et leur rôle essentiel dans la production de courant électrique. Cette perspective microscopique permettra aux lecteurs de comprendre en profondeur le fonctionnement interne des cellules photovoltaïques.

Types de cellules photovoltaïques : technologies monocristallines, polycristallines et à couche mince.

Après avoir jeté les bases dans le domaine de la physique des semi-conducteurs, ce chapitre s'oriente vers les manifestations tangibles de la technologie photovoltaïque, notamment les cellules photovoltaïques. Ces cellules, qui constituent les éléments de base des panneaux solaires, se présentent sous différentes formes, chacune ayant des caractéristiques et des applications uniques.

Les cellules monocristallines, caractérisées par une structure monocristalline, sont le gage du summum de l'efficacité. Leur composition uniforme facilite la circulation des électrons, maximisant ainsi la conversion de la lumière du soleil en électricité. Les cellules polycristallines, composées de plusieurs cristaux, établissent un équilibre entre efficacité et rentabilité, et offrent une solution pratique pour diverses applications. Les technologies à couche mince, qui utilisent des couches de matériaux semi-conducteurs, sont souples et abordables, ce qui ouvre la voie à des conceptions et des applications innovantes.

Les expressions techniques telles que l'efficacité, le facteur de remplissage et les taux de dégradation deviennent des paramètres essentiels pour évaluer et comparer ces différents types de cellules. Les ingénieurs s'efforcent de trouver des compromis entre l'efficacité et les coûts, en sélectionnant la technologie la plus

adaptée à un contexte donné. À l'aide de schémas et de calculs, ce chapitre dévoile les subtilités de ces technologies et jette les bases d'une prise de décision éclairée en matière de conception et de construction de systèmes photovoltaïques.

1.2 Évolution historique

L'évolution historique de l'énergie solaire photovoltaïque est un voyage fascinant qui s'étend sur plusieurs siècles. Des premières expériences du 19^e siècle aux technologies de pointe actuelles, cette section présente un récit chronologique des étapes qui ont façonné l'évolution de la technologie photovoltaïque. Commençant par la découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839, le récit progresse à travers des percées significatives, telles que l'invention de la première cellule solaire par Charles Fritts en 1883 et le développement de cellules solaires au silicium dans les années 1950.

Premières expériences et découverte de l'effet photovoltaïque

La découverte fondamentale qui a jeté les bases de la technologie solaire photovoltaïque est l'effet photovoltaïque, observé pour la première fois par le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. Becquerel, tout en étudiant le comportement de différents matériaux lorsqu'ils sont exposés à la lumière, a remarqué que certains matériaux généraient un courant électrique lorsqu'ils étaient éclairés. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet photovoltaïque, a permis de libérer le potentiel de l'énergie solaire en vue de la production d'électricité.

Première cellule solaire

En s'appuyant sur la découverte de Becquerel, l'inventeur américain Charles Fritts a fait un grand pas en avant en 1883 en construisant la première cellule solaire fonctionnelle. Fritts a utilisé une fine couche de sélénium enduite d'une couche d'or pour créer un dispositif capable de convertir la lumière en électricité. Bien que la cellule solaire de Fritts ait un rendement relativement faible, ses travaux ont jeté les bases des développements futurs dans ce domaine.

Contribution d'Einstein

La compréhension théorique de l'effet photovoltaïque a été remise sous les projecteurs au début du 20^e siècle par les travaux d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique. L'explication d'Einstein sur la façon dont la lumière interagit avec les matériaux au niveau atomique a fourni un cadre théorique pour comprendre la production d'électricité à partir de la lumière. Cette découverte théorique a ouvert la voie à de nouvelles avancées dans la technologie des cellules solaires.

Cellules solaires au silicium et course à l'espace

La véritable percée de la technologie photovoltaïque solaire a eu lieu dans les années 1950 avec le développement des cellules solaires au silicium. En 1954, les laboratoires Bell ont concrétisé la première cellule solaire en silicium, marquant une amélioration significative de l'efficacité et ouvrant la voie à des applications commerciales. Les premières applications concernaient principalement l'exploration spatiale, puisque les cellules solaires étaient devenues essentielles pour alimenter les satellites et les engins spatiaux pendant la course à l'espace.

Années 1970 : Croissance et diversification

Les années 1970 ont été marquées par une intensification des efforts de recherche et de développement, motivée par des préoccupations environnementales croissantes ainsi que la recherche de sources d'énergies renouvelables. Les cellules solaires ont trouvé des applications au-delà de l'exploration spatiale et ont commencé à être utilisées dans les systèmes d'alimentation à distance, comme les phares et les tours de communication. La crise pétrolière des années 1970 a également contribué à accroître l'intérêt pour l'énergie solaire en vue de parvenir à l'indépendance énergétique.

Années 1980 : L'émergence de la technologie des couches minces

Les années 1980 ont vu l'émergence de la technologie des cellules solaires à couche mince comme une solution viable aux cellules traditionnelles en silicium cristallin. Les cellules à couche mince, fabriquées à partir de matériaux tels que le silicium amorphe, le tellure de cadmium et le sélénure de cuivre, d'indium et de gallium, offraient des avantages tels qu'une flexibilité et des coûts de fabrication plus faibles. Cette diversification des matériaux et des technologies a contribué à rendre les systèmes solaires photovoltaïques de plus en plus accessibles.

Années 1990 et 2000 : Amélioration de l'efficacité et intégration au réseau

Les progrès réalisés dans le domaine de la science et de l'ingénierie des matériaux ont permis de constamment améliorer l'efficacité des cellules solaires au cours des années 1990 et 2000. Les recherches se sont concentrées sur l'amélioration des performances des cellules en silicium et sur l'exploration de nouveaux matériaux ayant de meilleures propriétés d'absorption de la lumière. L'intégration des systèmes solaires photovoltaïques dans les réseaux électriques est devenue plus courante, puisque les gouvernements du monde entier encouragent l'adoption des énergies renouvelables au moyen de tarifs de rachat et d'autres mesures politiques.

Progrès récents

Au 21^e siècle, la technologie solaire photovoltaïque a fait de remarquables progrès. Des efforts de recherche

ont été consacrés à augmenter l'efficacité des cellules solaires, à explorer des configurations de cellules en tandem et à développer de nouveaux matériaux pour améliorer leurs performances. Le coût de l'énergie solaire a considérablement baissé, ce qui la rend de plus en plus concurrentielle par rapport aux sources d'énergie conventionnelles.

Le contexte historique souligne non seulement la persévérance des scientifiques et des ingénieurs, mais réaffirme également l'importance croissante de l'énergie solaire en tant que solution viable et durable. Les crises énergétiques du 20^e siècle ont joué un rôle essentiel dans l'accélération des efforts de recherche et de développement, ce qui a permis d'accroître l'efficacité et l'accessibilité financière des systèmes photovoltaïques. La compréhension de cette trajectoire historique offre aux ingénieurs une perspective précieuse sur les défis relevés et le potentiel de progrès à venir.

Chronologie de l'évolution de l'énergie solaire photovoltaïque (PV)

1839 :

- **Découverte de l'effet photovoltaïque :** La première découverte de Becquerel est fortuite : il n'a que 19 ans lorsqu'il observe l'effet photovoltaïque.

1883 :

- **Première cellule solaire :** Même si la cellule solaire de Fritts, composée de sélénium et d'or, n'offrait qu'un rendement de 1 à 2 %, elle marquait tout de même la naissance d'une technologie solaire pratique.

1905 :

- **Effet photoélectrique d'Einstein :** L'explication de l'effet photoélectrique par Einstein lui vaudra le prix Nobel de physique en 1921.

1954 :

- **Première cellule solaire pratique au silicium :** La première cellule solaire au silicium, d'un rendement de 4 %, est principalement utilisée dans les applications spatiales, notamment pour l'alimentation des satellites.

Années 1970 :

- **La crise de l'énergie suscite l'intérêt :** L'énergie solaire attire l'attention pendant les crises pétrolières et le président Jimmy Carter installe des panneaux solaires sur la Maison-Blanche en 1979.

Années 1980 :

- **Émergence de la technologie des couches minces :** En 1985, Exxon réalise une percée dans la technologie des couches minces, établissant un nouveau record d'efficacité pour l'époque.

Années 1990 et 2000 :

- **Améliorations de l'efficacité :** En 2009, les chercheurs franchissent une étape importante avec une cellule solaire affichant un rendement de 41,6 %, ce qui représente un saut technologique important par rapport aux technologies antérieures.

Années 2000 à 2020 :

- **Intégration au réseau et soutien stratégique :** La loi allemande sur les énergies renouvelables de 2000 donne une poussée aux progrès en énergie solaire, faisant de l'Allemagne un chef de file mondial en matière de capacité solaire installée.
- **Réduction des coûts et masse**
- **Adoption :** Dès 2019, l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) indique que l'énergie solaire est la source d'électricité la moins chère de l'histoire.

Présent (2020 à 2023) :

- **Croissance rapide et innovation** : Les coûts de l'énergie solaire continuent de baisser; l'Arabie saoudite, connue pour son pétrole, vise une capacité solaire de 58,7 gigawatts d'ici 2030.
- **Progrès en matière de stockage de l'énergie** : Les *Gigaentreprises* de Tesla, axées sur le stockage de l'énergie, visent à révolutionner l'adoption de l'énergie solaire en rendant le stockage de l'énergie plus accessible.
- **Recherche et développement** : En 2022, les chercheurs dévoilent des cellules solaires transparentes, ouvrant la voie à leur intégration dans les fenêtres et autres surfaces similaires.

1.3 Importance dans l'ingénierie moderne

Il importe, dans le paysage contemporain de l'ingénierie, de ne pas surestimer l'importance de l'énergie photovoltaïque solaire.

La présente section explore le rôle de la technologie photovoltaïque en vue de relever les défis pressants du 21^e siècle, notamment les changements climatiques, la sécurité énergétique et le développement durable. Alors que le monde s'oriente vers des sources d'énergie plus propres et plus durables, l'énergie photovoltaïque solaire apparaît comme un acteur clé de la transition énergétique mondiale.

Cette section traite de l'intégration des systèmes photovoltaïques dans divers projets d'ingénierie, depuis les bâtiments résidentiels et commerciaux jusqu'aux applications hors réseau et aux fermes solaires à grande échelle. Les ingénieurs se voient présenter des exemples concrets illustrant la polyvalence et l'adaptabilité de l'énergie solaire photovoltaïque, soulignant son rôle dans la réduction des émissions de carbone, l'atténuation de l'impact environnemental et la promotion de l'indépendance énergétique.

Lutte contre les changements climatiques et impact environnemental

Les changements climatiques sont une menace plus grande que jamais, et l'impératif de transitionner vers des sources d'énergie renouvelables et à faible teneur en carbone est devenu un élément central des efforts d'ingénierie à l'échelle mondiale. L'énergie photovoltaïque solaire apparaît comme un acteur clé de ce changement de paradigme, offrant une source d'énergie propre et abondante qui produit de l'électricité sans émettre de gaz à effet de serre. La réduction de l'empreinte carbone est une contribution essentielle de l'énergie photovoltaïque solaire pour l'atténuation des changements climatiques, qui s'inscrit dans le cadre des efforts internationaux visant à limiter l'augmentation de la température mondiale.

L'impact environnemental de l'énergie photovoltaïque solaire va au-delà de la réduction des émissions. Contrairement aux sources d'énergie conventionnelles qui dépendent de combustibles fossiles limités, l'énergie solaire photovoltaïque exploite la puissance inépuisable de la lumière du soleil. Cette approche durable réduit la dépendance à l'égard des combustibles fossiles et atténue la dégradation de l'environnement liée à l'extraction, au transport et à la combustion de ressources non renouvelables. L'ingénierie moderne, motivée par un engagement en faveur de la gestion de l'environnement, reconnaît le rôle essentiel de l'énergie photovoltaïque solaire dans la promotion d'une coexistence harmonieuse avec la planète.

Sécurité et indépendance énergétiques

L'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle essentiel dans le renforcement de la sécurité énergétique en diversifiant le bouquet énergétique et en réduisant la dépendance à une production centralisée d'électricité. La nature décentralisée des systèmes photovoltaïques solaires permet une production d'énergie répartie, permettant aux collectivités, aux entreprises et même aux ménages de produire leur propre électricité. Cette décentralisation améliore non seulement la résistance aux perturbations, mais contribue également à une plus grande indépendance énergétique, en réduisant la vulnérabilité face aux incertitudes géopolitiques et économiques associées aux sources d'énergie traditionnelles.

Dans les régions où l'accès à une infrastructure de réseau fiable est limité, l'énergie photovoltaïque solaire devient une bouée de sauvetage, fournissant une source d'électricité indépendante des réseaux électriques centralisés. Les zones éloignées et hors réseau, souvent marginalisées dans les réseaux traditionnels de distribution d'énergie, bénéficient énormément de la facilité de déploiement et de l'évolutivité des systèmes photovoltaïques solaires. L'ingénierie moderne, qui met l'accent sur l'inclusion et l'accessibilité, considère l'énergie photovoltaïque solaire comme un catalyseur permettant de combler le fossé énergétique et de promouvoir l'équité sociale.

Viabilité économique et création d'emplois

L'importance de l'énergie photovoltaïque solaire dans l'ingénierie moderne est soulignée par sa viabilité économique croissante. Les progrès technologiques, associés aux économies d'échelle, ont considérablement réduit le coût des systèmes photovoltaïques solaires. Par conséquent, l'énergie solaire est devenue de plus en plus concurrentielle par rapport aux sources d'énergie traditionnelles, ce qui en fait un investissement intéressant pour les entreprises, les gouvernements et les particuliers.

L'industrie solaire s'est imposée comme un contributeur important à la création d'emplois et à la croissance économique. De la recherche et développement en passant à la fabrication, l'installation et l'entretien, le secteur solaire couvre un large éventail de compétences et d'occasions d'emploi. L'ingénierie moderne reconnaît le rôle de l'énergie photovoltaïque solaire non seulement dans l'approvisionnement en énergie propre, mais également dans la promotion de l'innovation, de l'esprit d'entreprise et du développement d'une économie verte solide.

Résilience et préparation aux catastrophes

Face aux catastrophes naturelles et aux phénomènes météorologiques extrêmes, la résilience des infrastructures énergétiques devient un élément essentiel de l'ingénierie moderne. Les systèmes photovoltaïques solaires, caractérisés par leur nature modulaire et distribuée, offrent des avantages intrinsèques en termes de résilience. Contrairement aux centrales électriques qui peuvent être sujettes à des points de défaillance uniques, les panneaux solaires photovoltaïques peuvent continuer à produire de l'électricité même après des perturbations localisées.

Les micro-réseaux alimentés par des panneaux solaires photovoltaïques constituent une solution énergétique résiliente pour les collectivités, garantissant une source d'électricité fiable en cas d'urgence. La nature décentralisée de l'énergie solaire photovoltaïque contribue à la préparation aux catastrophes en réduisant la vulnérabilité de l'infrastructure énergétique aux perturbations à grande échelle. L'ingénierie moderne, guidée par les principes de résilience et d'adaptabilité, reconnaît l'importance de l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans les infrastructures résistantes aux catastrophes.

Avancées technologiques et innovation

La recherche incessante de progrès technologiques est une caractéristique de l'ingénierie moderne, et c'est pourquoi l'énergie solaire photovoltaïque se situe à l'intersection de l'innovation et des solutions énergétiques durables. Les efforts de recherche et de développement en cours se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires, l'exploration de nouveaux matériaux et l'innovation dans la conception des systèmes. Les cellules solaires en tandem, les cellules solaires en pérovskite et d'autres technologies émergentes promettent d'améliorer davantage les performances et l'accessibilité des systèmes solaires photovoltaïques.

Exercice 1.1

Questions de l'exercice pour les étudiants

- Compréhension conceptuelle :** a. Explique l'effet photovoltaïque et son lien avec le fonctionnement des cellules solaires photovoltaïques. b. Quels sont les principaux composants d'une cellule solaire photovoltaïque et comment contribuent-ils à la conversion de la lumière du soleil en électricité?
c. Décris la différence entre les technologies photovoltaïques monocristallines, polycristallines et à couche mince.
- Fondements mathématiques :** a. Calcule l'énergie en joules délivrée par un photon de lumière solaire dont la longueur d'onde est de 500 nm. b. Si une cellule solaire a un rendement de 15 % et qu'elle reçoit un rayonnement solaire de $1\,000\text{ W/m}^2$, calcule l'énergie électrique qu'elle peut produire. c. Compte tenu de la puissance électrique d'un panneau solaire, détermine l'énergie qu'il peut produire au cours d'une journée avec 6 heures d'ensoleillement maximum.
- Conception et efficacité :** a. Discute des facteurs qui ont une incidence sur l'efficacité d'un système solaire photovoltaïque. Comment les concepteurs de systèmes peuvent-ils en optimiser l'efficacité?
b. Crée un plan de conception de base pour un système solaire photovoltaïque résidentiel, en tenant compte de facteurs tels que l'emplacement, l'orientation et la taille du système. c. Compare les avantages et les inconvénients des systèmes de panneaux solaires orientables et à inclinaison fixe.
- Rendement énergétique et calculs :** a. Calcule le rendement énergétique quotidien d'un système solaire photovoltaïque de 5 kW dans un endroit qui reçoit en moyenne 5 heures de lumière solaire par jour. b. Détermine, en fonction du rendement et de la surface du panneau solaire, sa production d'énergie quotidienne. c. Explique en quoi consistent le concept de facteur de capacité et son importance dans l'évaluation des performances d'un système solaire photovoltaïque.
- Impact environnemental :** a. Discute des avantages et des défis environnementaux associés à la technologie solaire photovoltaïque. b. Compare l'impact environnemental des systèmes solaires photovoltaïques à celui d'autres sources d'énergie telles que les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire.
- Tendances technologiques :** a. Étudie et présente un aperçu des avancées technologiques récentes dans le domaine de l'énergie photovoltaïque solaire, telles que les cellules solaires en pérovskite ou les panneaux bifaces. b. Explique comment les solutions de stockage d'énergie, comme les batteries, peuvent améliorer l'utilisation des systèmes photovoltaïques solaires. c. Discute de l'intégration potentielle de la technologie photovoltaïque dans l'infrastructure et l'architecture urbaines.

À la fin de ce chapitre, les lecteurs auront acquis une compréhension globale des principes fondamentaux de la technologie photovoltaïque, de son parcours historique et du rôle essentiel qu'elle joue dans le façonnement de l'avenir de l'ingénierie moderne. Avec ces connaissances, les ingénieurs peuvent se lancer dans les chapitres suivants, où ils approfondiront les subtilités de la conception et de la mise en œuvre de l'énergie photovoltaïque solaire.

CHAPITRE 2 : ÉVALUATION DES RESSOURCES SOLAIRES

Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque (PV) solaire, il est primordial de comprendre les ressources solaires disponibles sur un site en particulier. L'évaluation des ressources solaires constitue le fondement de la conception de systèmes photovoltaïques efficaces et performants. Ce chapitre se penche sur les subtilités de l'évaluation des ressources solaires, en dévoilant les paramètres clés, les techniques de mesure et l'importance d'une collecte de données exactes.

2.1 Éclairement énergétique et insolation

L'**éclairement énergétique** désigne la puissance par unité de surface reçue du rayonnement électromagnétique, en particulier de la lumière du soleil, sur une surface donnée. Il s'agit d'une mesure de l'intensité de l'énergie radiante incidente, exprimée en watts par mètre carré (W/m^2). L'éclairement énergétique prend en compte l'ensemble du rayonnement électromagnétique, y compris la lumière visible, ultraviolette et infrarouge, qui frappe une surface perpendiculairement.

Dans le contexte de l'énergie solaire et de l'énergie photovoltaïque, l'irradiation est un paramètre crucial pour évaluer la quantité d'énergie solaire disponible à un endroit en particulier. Elle permet de déterminer la puissance potentielle des panneaux solaires ou d'autres dispositifs solaires. Les deux principaux types d'irradiation solaire sont l'irradiation horizontale globale (GHI), qui représente le rayonnement solaire total reçu sur une surface horizontale, et l'irradiation normale directe (DNI), qui représente le rayonnement solaire provenant directement du soleil et frappant une surface perpendiculaire aux rayons du soleil.

L'**insolation**, terme dérivé de « rayonnement solaire entrant », désigne la quantité totale d'énergie solaire reçue sur une surface spécifique au cours d'une période donnée, généralement exprimée en énergie par unité de surface et par unité de temps (par exemple, $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{jour}$ ou $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{jour}$). Elle tient compte de la durée et de l'intensité de l'ensoleillement tout au long de la journée et est souvent utilisée pour caractériser le potentiel d'énergie solaire d'un endroit.

L'insolation est tributaire de divers facteurs, notamment la situation géographique, la période de l'année, l'heure de la journée et les conditions météorologiques locales. Il s'agit d'un paramètre essentiel pour évaluer la faisabilité et l'efficacité des systèmes d'énergie solaire, puisqu'il donne une idée de la disponibilité moyenne de l'énergie solaire sur un site donné. Les données relatives à l'ensoleillement sont essentielles pour les concepteurs de systèmes et les ingénieurs afin d'estimer la production d'énergie des installations solaires et d'optimiser leurs performances en fonction du climat local et des conditions environnementales.

Le calcul de l'insolation (exposition solaire) d'un site nécessite la prise en compte de différents facteurs tels que la situation géographique, la période de l'année, l'heure de la journée et les conditions météorologiques locales. L'insolation est souvent exprimée comme l'énergie solaire totale reçue par unité de surface sur une

période donnée, généralement par jour. La formule de calcul de l'ensoleillement quotidien (en kilowattheures par mètre carré et par jour, kWh/m²/jour) est la suivante :

Insolation = constante solaire × durée de l'ensoleillement × facteur de conversion

Alors :

- **Constante solaire** : La constante solaire moyenne, qui représente l'irradiation solaire en dehors de l'atmosphère terrestre, est d'environ 1 361 W/m².
- **Durée de l'ensoleillement** : Il s'agit du nombre d'heures d'ensoleillement sur le site pendant une journée donnée.
- **Facteur de conversion** : Facteur de conversion de l'énergie totale des watts en kilowattheures (généralement 0,001 pour convertir les watts en kilowatts et 24 pour convertir les heures en jours).

N'oubliez pas qu'il s'agit d'un calcul simplifié et que l'insolation réelle peut varier en fonction de facteurs comme les conditions atmosphériques, l'ombrage et la topographie locale.

Pour un calcul plus précis, vous pouvez utiliser des données météorologiques, y compris l'irradiation normale directe (DNI) et l'irradiation horizontale diffuse (DHI), ainsi que des méthodes statistiques. Ces données sont souvent disponibles dans les bases de données météorologiques ou solaires.

Illustrons un calcul de base :

En supposant que la durée d'ensoleillement pour un jour donné est de 10 heures :

$$\text{Insolation} = 1\,361 \times 10\,h \times 0,001 \times 24$$

$$\text{Insolation} \approx 32,66 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}.$$

Formule non analysée Ce résultat représente l'insolation journalière estimée pour l'endroit et le jour spécifiés sur la base de la formule simplifiée. Il est recommandé d'utiliser des données météorologiques plus détaillées et des techniques de modélisation en vue d'obtenir des évaluations justes.

Deux composantes essentielles de l'évaluation des ressources solaires sont l'irradiation horizontale globale (GHI) et l'irradiation normale directe (DNI).

Irradiation horizontale globale (GHI)

La GHI représente le rayonnement solaire total reçu sur une surface horizontale. Elle comprend la lumière directe et diffuse du soleil dispersée par l'atmosphère. La GHI se mesure en watts par mètres carrés (W/m²), et est un paramètre clé dans la compréhension globale du potentiel d'énergie solaire à un endroit donné.

Techniques de mesure : Les pyranomètres au sol servent souvent à mesurer la GHI. Ces instruments sont constitués d'un capteur thermopile qui absorbe le rayonnement solaire et génère un signal électrique proportionnel à l'irradiation reçue.

Irradiation normale directe (DNI)

La DNI fait référence au rayonnement solaire reçu par unité de surface sur une surface placée de manière perpendiculaire aux rayons du soleil. Elle représente la lumière directe du soleil qui atteint la surface de la Terre sans être diffusée. La DNI est essentielle au regroupement de technologies solaires et de systèmes photovoltaïques à rendement élevé.

Techniques de mesure : Les pyréliomètres servent à mesurer la DNI avec exactitude. Ces instruments suivent le mouvement du soleil pendant le jour en vue de s'assurer que les mesures sont prises de façon juste directement du faisceau solaire.

2.2 Mesure de l'irradiation solaire

Une mesure exacte de l'irradiation solaire est essentielle pour une évaluation fiable des ressources solaires. Différents instruments et méthodologies sont utilisés pour capturer la nature dynamique de la lumière du soleil.

Pyranomètres et pyréliomètres

Les *pyranomètres* mesurent l'irradiation solaire totale sur une surface horizontale, en combinant la lumière directe et diffuse du soleil. Les *pyréliomètres*, quant à eux, servent spécifiquement à mesurer la DNI en pointant directement le soleil. Les deux instruments sont étalonnés pour fournir des relevés exacts de l'irradiation.

Collecte de données au sol

Les stations de surveillance solaire au sol sont stratégiquement positionnées pour recueillir des données sur l'irradiation solaire sur de longues périodes. Ces données, recueillies à des résolutions temporelles élevées, fournissent des données précieuses sur les variations quotidiennes et saisonnières du rayonnement solaire.

Collecte de données par satellite

Les plateformes satellitaires, équipées de radiomètres et de spectromètres, offrent une perspective plus large de l'irradiation solaire. Elles fournissent des données spatialement étendues, permettant d'évaluer les ressources solaires au niveau régional et mondial. Cependant, l'exactitude de ces sources de données nécessite souvent une validation au sol.

2.3 Technologies émergentes dans l'évaluation des ressources solaires

Imageurs de ciel

Les imageurs de ciel capturent des images hémisphériques du ciel et servent à déterminer la couverture

nuageuse et évaluer son impact sur l'irradiation solaire. Ils fournissent des données précieuses pour la prévision à court terme de la production d'énergie solaire.

Technologie LiDAR

La technologie LiDAR (Light Detection and Ranging) sert à la cartographie haute résolution du terrain et des obstacles. Dans l'évaluation des ressources solaires, la technologie LiDAR aide à comprendre les caractéristiques topographiques qui peuvent influencer sur le rayonnement solaire.

2.4 Facteurs influençant l'évaluation des ressources solaires

Plusieurs facteurs influencent l'exactitude des évaluations des ressources solaires, notamment :

Conditions atmosphériques

Les conditions atmosphériques, comme les nuages, les aérosols et la vapeur d'eau, ont un impact significatif sur l'irradiation solaire. Des modèles avancés et des techniques de correction atmosphérique sont utilisés pour tenir compte de ces facteurs et obtenir des estimations justes pour ces ressources solaires.

Effets de relief et d'ombrage

Les caractéristiques du terrain et l'ombre des structures avoisinantes peuvent affecter la distribution de l'irradiation solaire. Les modèles altimétriques numériques (MAN) et les analyses d'ombrage contribuent à l'évaluation fiable des ressources solaires dans des paysages complexes.

2.5 Importance d'une évaluation exacte des ressources solaires

L'évaluation juste des ressources solaires est au cœur de la conception de systèmes photovoltaïques qui fonctionnent de manière optimale et efficace. Elle facilite ce qui suit :

Dimensionnement du système et prévision des performances

La compréhension de la ressource solaire permet aux ingénieurs de dimensionner adéquatement les systèmes photovoltaïques et de prévoir leurs performances. Cet aspect est essentiel pour garantir que la capacité installée corresponde aux besoins énergétiques d'un lieu donné.

Faisabilité financière

Les données sur les ressources solaires font partie intégrante de l'évaluation de la faisabilité financière des projets photovoltaïques. Les investisseurs et les parties prenantes s'appuient sur des évaluations justes des ressources solaires pour prendre des décisions éclairées sur la viabilité économique des installations solaires.

Planification de l'intégration au réseau

Pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau, la connaissance de la ressource solaire permet de planifier l'intégration de son énergie dans le réseau électrique. Il s'agit notamment de gérer les fluctuations de la production solaire et d'optimiser la stabilité du réseau.

CHAPITRE 3 : TECHNOLOGIES PHOTOVOLTAÏQUES

CHAPITRE 4 : ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES

CHAPITRE 5 : SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDÉS AU RÉSEAU ET DIMENSIONNEMENT DES BRANCHES

ANNEXE : LECTURES COMPLÉMENTAIRES ET RÉFÉRENCES

Lectures complémentaires et références

1. Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y. et Warta, W. (2018). « Solar cell efficiency tables (version 51) », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(1), 3-12.
2. Sze, S. M. et Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons.
3. Aberle, A. G. (2000). « Surface passivation of crystalline silicon solar cells: A review », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 8(5), 473-487.
4. Green, M. A. (2003). « Third generation photovoltaics: Solar cells for 2020 and beyond », *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 14(1-2), 65-70.