

Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Université d'Oran des sciences et de
technologie Mohamed BOUDIAF

USTOMB

Faculté du Génie Electrique

Département d'électronique

وزارة التعليم العالي
والبحث العلمي

جامعة وهران للعلوم
والتكنولوجيا

محمد بوضياف

كلية الهندسة
الكهربائية

الإلكترونيك قسم

POLYCOPIE DE COURS

SYSTEMES ENERGETIQUES AUTONOMES

Présenté par :

ZERHOUNI FATIMA ZOHRA
ZERHOUNI M'HAMED HOUARI
ZEGRAR MANSOUR

AN : 2020-2021

PREFACE

Ce présent polycopié met l'accent sur une présentation des différents modes de production de systèmes autonomes d'énergie existants de manière à disposer d'un maximum d'informations possibles. Les systèmes énergétiques connaissent une mutation rapide sous l'effet de la montée en puissance des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, ce présent manuscrit de la matière : **systèmes énergétiques autonomes** s'adresse aux étudiants de première année, en master en électronique, filière instrumentation et à tous ceux qui désirent apprendre, améliorer leur connaissance dans cette matière ...C'est une base qui leur permettra de suivre, de comprendre et d'assimiler les rudiments de ces systèmes...

Ce support de cours couvre l'étendue du programme en vigueur de cette matière découverte en master en génie électrique (filiale instrumentation).

La présentation de ce support de cours respecte l'ordre chronologique dans lequel la matière est traitée. Ce manuel est découpé en plusieurs chapitres. Le chapitre 1 est dédié aux dispositifs de production d'énergie électrique. Le chapitre 2 consiste en l'étude de l'énergie éolienne. Le chapitre 3 s'intéresse aux systèmes hybrides. Le chapitre 4 traite l'énergie solaire photovoltaïque. Le dernier chapitre porte sur les autres sources d'énergies renouvelables.

Il a été donc proposé, dans ce polycopié de cours, d'apporter une contribution à l'étude des systèmes énergétiques autonomes. Nous souhaitons que ceci apporte, dans la réflexion sur la transition énergétique, un éclairage nouveau.

Mots clés : Système, énergie, autonomie, renouvelable, production, photovoltaïque, éolienne, hybridation...

Semestre: 1
Unité d'enseignement: UED 1.1
Matière 2: Systèmes énergétiques autonomes
VHS: 22h30 (Cours: 1h30)
Crédits: 1
Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement:

Susciter l'intérêt de l'étudiant aux énergies renouvelables en général et aux systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire ou éolienne en particulier. Faire acquérir à l'étudiant une certaine compétence dans le dimensionnement d'une installation éolienne ou photovoltaïque.

Connaissances préalables recommandées:

Connaissances générales

Contenu de la matière:

Chapitre 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique,

Notions sur les transformations d'énergie (mécanique ; thermique ; hydraulique, ...), Historique (Volta, Oersted, Faraday, etc.), l'alternateur, la dynamo, les modes de production de l'énergie électrique (centrale électrique hydraulique, les centrales thermiques). Les sources d'énergies non renouvelables (fossiles et nucléaires). Les sources d'énergies renouvelables.

Chapitre 2 : Energie éolienne

Historique, principe et structure, Caractéristiques et dimensionnement, Carte du gisement éolien en Algérie, Parcs éoliens et puissance, Normes, Avantages et inconvénients. Exemple d'une installation éolienne.

Chapitre 3 : Systèmes hybrides

Systèmes Hybrides (Hydrolienne, Principe de fonctionnement de l'hydrolienne, Les différents types d'hydroliennes et les exploitants,...)

Chapitre 4 : Energie solaire photovoltaïque

Principe d'une installation photovoltaïque, le gisement solaire en Algérie, Technologies des cellules photovoltaïques, Les modules photovoltaïques, MPPT, Caractéristiques et connectique photovoltaïque, Normes. L'onduleur (rôle, principe, caractéristiques et rendement). Exemple d'une installation photovoltaïque.

Chapitre 5 : Autres sources d'énergies renouvelables

Les familles d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique, Biomasse, Géothermie). Les différentes énergies renouvelables dans le monde. Rentabilité.

Mode d'évaluation:

Examen: 100%.

Références bibliographiques :

1. J. Vernier, Les énergies renouvelables, édition PUF, 2012
2. E. Riolet, Le mini-éolien, édition Eyrolles, 2010
3. A. Labouret et M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, Editions du Moniteur 2009

4. B. Fox, Energie électrique éolienne : Production, prévision et intégration au réseau, Collection Technique et Ingénierie, Dunod/L'Usine Nouvelle 2015 (2^e édition)
5. A. Damien, La biomasse énergie: Définitions, ressources et modes de transformation, Collection Technique et Ingénierie, Dunod/L'Usine Nouvelle 2013 (2^e édition)
6. A. Labouret, M. Viloz, Installations photovoltaïques: Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau, Collection Technique et Ingénierie, Dunod/Le Moniteur 2012 (5^e édition)
7. <http://www.cder.dz/spip.php?article1442>

CHAPITRE 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique

Chapitre 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique,

Notions sur les transformations d'énergie (mécanique ; thermique ; hydraulique, ...), Historique (Volta, Oersted, Faraday, etc.), l'alternateur, la dynamo, les modes de production de l'énergie électrique (centrale électrique hydraulique, les centrales thermiques). Les sources d'énergies non renouvelables (fossiles et nucléaires). Les sources d'énergies renouvelables.

1 NOTIONS SUR LES TRANSFORMATIONS D'ENERGIE

- Le terme énergie vient du grec *energeia* qui signifie «force en action ». C'est la capacité que possède un corps, un système, de produire un travail capable de produire un mouvement, de la chaleur ou d'ondes électromagnétiques (à titre d'exemple la lumière). En économie, on désigne par énergie soit la matière première soit le phénomène naturel qui produit un travail.
- On peut faire une distinction dans le domaine de la thermodynamique. En effet, deux principales formes d'énergie sont dégagées le travail (énergie fournie par une force lorsque son point d'application se déplace, c'est en général l'énergie cinétique macroscopique ou énergie électrique) et la chaleur (énergie cinétique microscopique).
- L'énergie est la capacité de produire un changement d'état ou un travail. L'unité de l'énergie est le joule (J).
- Une **transformation d'énergie** est le passage de l'énergie d'une forme à une autre.

L'énergie a comme propriété de se transformer facilement d'une forme à une autre. L'énergie provient de diverses sources naturelles telles que le Soleil, les combustibles fossiles, le vent ou les aliments. Selon son origine, l'énergie peut se manifester sous différentes formes. Il existe quatre principales formes d'énergie:

- L'énergie thermique
- L'énergie chimique
- L'énergie rayonnante
- L'énergie mécanique
- Autres formes d'énergie

L'humain, pour satisfaire ses besoins, a conçu des objets techniques et des systèmes technologiques qui convertissent une forme d'énergie en une autre qui convient davantage à l'utilisation souhaitée. Pour faire fonctionner ces objets et ces systèmes, il faut de l'énergie. Plusieurs sources d'**énergie primaire** sont disponibles pour assurer leur fonctionnement : éolienne, solaire, hydraulique, fossile, nucléaire, chimique, thermique, mécanique et lumineuse. L'énergie peut passer d'un type à un autre. Par exemple, l'énergie rayonnante du Soleil, lorsqu'elle « frappe » la Terre, se transforme en énergie thermique, ce qui la réchauffe. De la même façon, l'énergie thermique d'un corps chaud se transforme partiellement en énergie rayonnante : c'est pour cela qu'un objet très chaud devient incandescent.

Matière : découverte M1 I USTOMB Département : ELN AN 2021
CHAPITRE 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique

<p>Énergie solaire (ou énergie lumineuse)</p>	 <p>Une plante par la photosynthèse (Source →)</p>	<p>Énergie chimique (production de sucre)</p>
<p>Énergie chimique (contenue dans la nourriture et dégagée par la respiration cellulaire)</p>	 <p>Un être humain (Source →)</p>	<p>Énergie mécanique (mouvement du corps)</p> <p>Énergie thermique</p>
<p>Énergie chimique (dégagée par la combustion du bois)</p>		<p>Énergie lumineuse (ou énergie rayonnante)</p> <p>Énergie thermique</p>
<p>Énergie nucléaire (contenue dans le noyau des atomes d'uranium)</p>	 <p>Une centrale nucléaire (Source →)</p>	<p>Énergie électrique</p>
<p>Énergie chimique (combustion de l'essence)</p>	 <p>Un moteur (Source →)</p>	<p>Énergie mécanique (mouvement de la voiture)</p>



Figure (1) : Exemples de transformations de l'énergie

Voici un diagramme présentant les différents types d'énergie et différents moyens technologiques de les transformer :

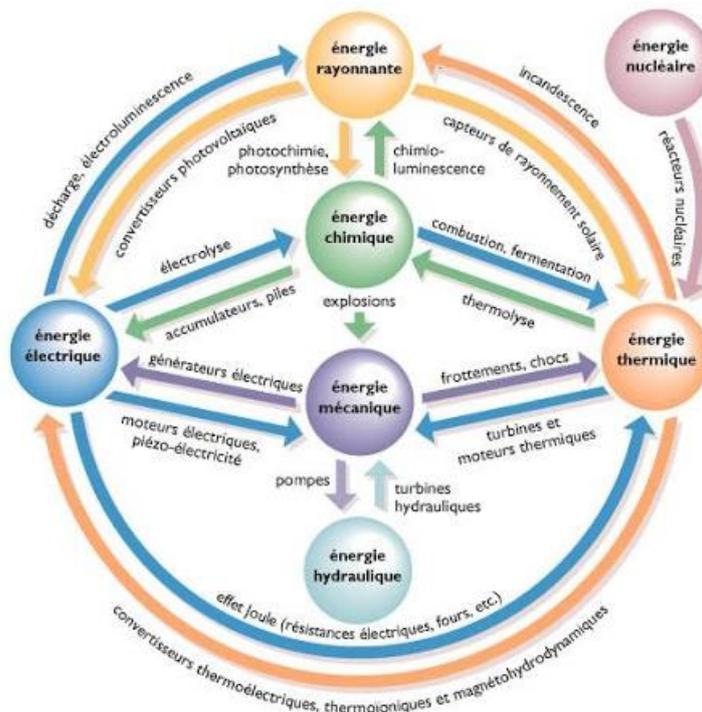


Figure (2) : Différents types d'énergie et transformations

2 HISTORIQUE

1800 : Volta invente la pile. Mais elle ne peut pas stocker de grosses quantités d'électricité. La pile de Volta suscite un énorme intérêt dans le monde scientifique car le courant électrique est alors un phénomène nouveau et inattendu. Grâce à elle, les physiciens de l'époque peuvent entreprendre de nombreuses recherches sur les propriétés du courant électrique et sur la résistance électrique. Ces travaux sont à l'origine du transport d'électricité par câbles.

1820 : Oersted (d'origine Danoise), remarque qu'une aiguille aimantée placée à côté d'un fil conducteur traversé par le courant est déviée. D'une importance capitale, l'expérience d'Oersted établit pour la première fois un lien entre électricité et magnétisme. Elle ouvre la voie à de nombreuses inventions comme celle du télégraphe, qui révolutionnera un peu plus tard les moyens de communication.

1830 : Michael Faraday (un Anglais), montre qu'un courant passe dans une bobine lorsqu'on y introduit un aimant. L'histoire du début des applications de l'électricité est dominée par les découvertes du physicien anglais, Michael Faraday en 1830. En reliant les bornes d'une bobine à un galvanomètre (sorte d'ampèremètre), il observe le passage d'un courant dans la bobine, lorsqu'il introduit ou retire un aimant de cette bobine.

L'importance de cette découverte est extrême car elle rend possible la production de courant électrique sans avoir à utiliser de pile. L'énergie mécanique peut, dès lors, être directement convertie en énergie électrique. C'est ce que font, depuis, tous les alternateurs.

3 ALTERNATEUR ET DYNAMO

L'alternateur

L'alternateur (bobine + aimant) est la partie commune à toutes les centrales électriques. L'alternateur produit une tension variable et alternative. Un alternateur (centrale, voiture) est constitué d'une partie tournante appelée rotor (un ou plusieurs aimants) et d'une partie fixe appelée stator (bobine ou ensemble de bobines). Le rotor tourne à l'intérieur du stator.

L'alternateur est la partie commune à toutes les centrales électriques : l'énergie mécanique reçue par l'alternateur est convertie en partie en énergie électrique. Pour cela, l'alternateur est couplé à une turbine en rotation.

La dynamo

Le mot **dynamo** est l'abréviation de « machine dynamoélectrique ». La dynamo désigne une machine électrique, à courant continu (ou machine dite de Gramme) qui fonctionne en générateur électrique. Elle convertit l'énergie mécanique en énergie électrique¹ en utilisant l'induction électromagnétique, de façon similaire à une magnéto. La dynamo est moins utilisée que l'autre type de générateur, les alternateurs (machine électrique synchrone, étant en général un peu plus coûteuse et de moindre rendement.

4 LES MODES DE PRODUCTION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Brièvement, on citera :

La centrale hydraulique

Source primaire : eau

Une **centrale hydraulique** produit de l'**électricité** grâce à une chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur.

On a les centrales hydrauliques ou marémotrices .

Les centrales thermiques

Dans les centrales thermiques à flamme (pétrole, gaz, charbon) et les centrales nucléaires, c'est de la vapeur d'eau sous pression, envoyée sur les pales de la turbine, qui fait tourner l'alternateur. Ces centrales ne diffèrent que par le dispositif qui produit la vapeur.

L'énergie éolienne

Source primaire : vent

La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend de :

La vitesse du vent, principalement

La surface balayée par les pales

La densité de l'air

L'énergie solaire

Energie du rayonnement solaire convertie en chaleur ou en énergie électriques

L'énergie géothermique

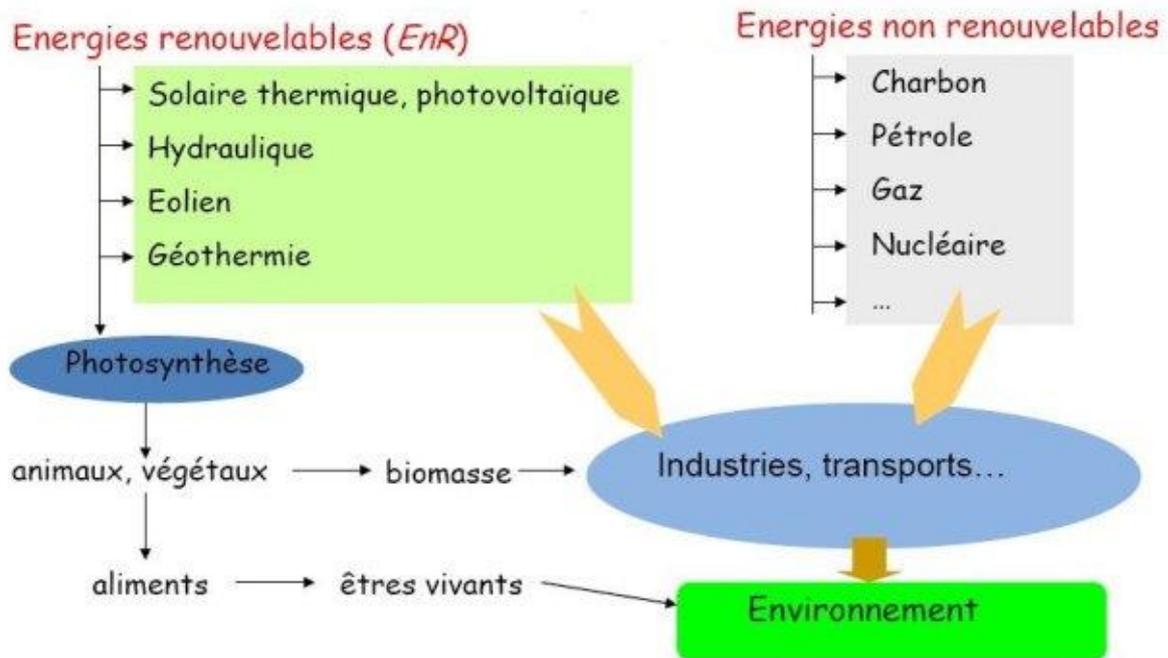
On puise la chaleur dans le sol pour chauffer des habitations ou produire de l'électricité

L'énergie biomasse

Energie que l'on peut extraire des végétaux comme le bois (centrale thermique) ou des plantes (carburant).

5 LES DIFFÉRENTES SOURCES D'ÉNERGIE

On fait habituellement la distinction entre les sources d'énergie d'origine fossile et celles d'origine renouvelable. Ces dernières ont principalement le soleil comme origine.



L'énergie renouvelable est une énergie **produite grâce à un moyen de production renouvelable**. Cela signifie qu'il n'a **pas de quantité limitée**, qu'il sera **toujours disponible**. En produisant de l'énergie renouvelable, il n'y a **pas d'impact véritable sur la planète**.

L'énergie non renouvelable, elle, utilise justement des **ressources** dont la **quantité** est naturellement **limitée**. Il s'agit de matières premières qu'on ne peut pas reproduire. La quantité limitée de matière nécessaire à la production d'énergie oblige à trouver, à terme, de **nouveaux modes de production**.

- **Les énergies renouvelables**

La part des énergies renouvelables dans le mix énergétique ne cesse cependant de **prendre de l'ampleur**. Une bonne nouvelle pour la protection de l'environnement !

L'énergie hydraulique

Elle consiste à **utiliser la force cinétique de l'eau**. Le barrage retient l'eau jusqu'à être aspirée dans la centrale hydraulique afin de **faire tourner les turbines**, qui créent de l'électricité.

L'énergie éolienne

CHAPITRE 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique

On peut trouver des éoliennes en mer et sur terre. L'intérêt de les installer en mer est le gain de place mais également la puissance du vent, plus fréquent en mer. Ainsi, les **éoliennes en mer** sont **plus productives que** les éoliennes **sur terre**. En revanche, l'acheminement de l'électricité qu'elles produisent est plus long.

Le vent permet l'entraînement des **turbines des éoliennes**. La production de cette énergie **dépend** entièrement des **conditions météorologiques**.

L'énergie solaire photovoltaïque

Ce mode de production est le **plus accessible pour les particuliers** qui souhaitent consommer l'électricité qu'ils produisent eux-mêmes. Des **centrales de panneaux photovoltaïques** sont également installées pour rendre cette énergie accessible au plus grand nombre.

La production d'électricité est possible grâce au **soleil** dont les **rayons sont transformés** en courant par les **cellules photovoltaïques** du **panneau**. Cette source d'énergie est cependant **intermittente**, car elle ne produit rien ou moins durant la nuit ou en cas de mauvais temps.

La biomasse

Elle permet de **produire de l'électricité, mais également du biogaz** grâce à la **méthanisation de déchets** organiques d'origine végétale et animale. Ce processus de **fermentation des déchets** est utilisé principalement pour la production de gaz vert.

Les **déchets utilisés** pour cela sont du bois, des **déchets industriels** (industrie alimentaire), des **boues d'épuration**, mais également des **déchets ménagers**.

La géothermie

Ce procédé consiste à **utiliser les calories contenues dans le sol ou dans l'atmosphère** pour les ramener à l'intérieur d'une habitation et la chauffer. Ce mode de chauffage est particulièrement **économique**. De plus, il se répand de plus en plus au travers des pompes à chaleur.

Ce mode de production est également utilisé à plus grande échelle par des **centrales spécialisées dans la géothermie**. Ce procédé, exécuté grâce à des **calories puisées plus profondément** dans le sol, permet la **création de chaleur** avec de très hautes températures. Il **alimente des réseaux de chaleur** destinés aux particuliers et aux professionnels.

- **Les énergies non renouvelables**

On parle d'énergie non renouvelable quand sa **quantité est limitée**. Ce sont des sources finies. Une énergie est dite non renouvelable si elle est produite à un rythme trop lent pour que son stock puisse être renouvelé à l'échelle d'une vie humaine.

Les énergies non renouvelables engendrent de nombreux déchets et émettent des gaz à effet de serre.

L'énergie nucléaire

Le nucléaire permet de produire de l'électricité grâce à la **transformation d'eau en vapeur**, à de très hautes températures.

Cette énergie est **non renouvelable** car elle nécessite de l'uranium. Les 3 pays les plus producteurs d'uranium dans le monde sont le Kazakhstan, le Canada et l'Australie.

Ce mode de production a cependant le gros défaut de créer des **déchets nucléaires**. L'uranium est **radioactif**. Le **traitement de ces déchets radioactifs** est un **problème** récurrent. Les déchets sont **enfouis** car impossible à traiter autrement avec nos connaissances actuelles.

Le charbon

Le charbon est une **énergie accessible**, notamment en **termes de coût**. Cependant, la **combustion de cette matière fossile** émet de **grandes quantités de CO₂** dans l'atmosphère. Cette industrie est donc en partie responsable du **réchauffement climatique**.

Le **charbon** est principalement extrait de **Chine**, le pays le plus producteur au monde.

Le pétrole

On parle ici aussi de **combustion de matière fossile**. Cette énergie est polluante car sa combustion émet des **particules fines**, qui restent en suspension dans l'air. On attribue à cette pollution **plusieurs centaines de milliers de morts** à travers le monde.

Le gaz naturel

Le gaz naturel permet principalement la **production de chaleur** chez les particuliers. Des centrales **produisent** également de **l'électricité** grâce à cette énergie.

Donc, les principales **énergies non renouvelables** sont : les **énergies fossiles** (le charbon qui provient du bois, le pétrole et le gaz naturel) et **l'énergie nucléaire** qui est produite à partir de l'uranium.

Matière : découverte M1 I USTOMB Département : ELN AN 2021
CHAPITRE 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique

Pour résumer, voici un tableau récapitulatif des principales sources d'énergie (renouvelables et non renouvelables).

Energie	Type d'énergie	Origine
Pétrole	Non renouvelable	Combustible fossile
Gaz	Non renouvelable	Combustible fossile
Charbon	Non renouvelable	Combustible fossile
Nucléaire	Non renouvelable	Combustible nucléaire
Solaire	Renouvelable	Soleil
Eolienne	Renouvelable	Vent
Hydraulique	Renouvelable	Eau
Geothermique	Renouvelable	Terre
Biomasse	Renouvelable	Déchets végétaux

REFERENCES

<https://www.superprof.fr/ressources/scolaire/physique-chimie/seconde/mecanique/sources-energie.html>.

<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.energieplanete.fr%2Fconversion-energie-types.html&psig=AOvVaw3dTA-IVzQe-myY9IiNbMn1&ust=1611843732272000&source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFwoTCLDN7PunvO4CFQAAAAAdAAAAABAD>.

<https://sites.google.com/site/stsecondaire/5e-secondaire/energie-transformations>.

<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/10110/10110-conversion-denergie-et-efficacite-energetique-ensps.pdf>.

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Dynamo>.

https://www.ilephysique.net/physique_3_production_energie_electrique_cours.php.

energieplanete.fr.

<https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-un-barrage>.

Matière : découverte M1 I USTOMB Département : ELN AN 2021
CHAPITRE 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique

<https://uved.univ-perp.fr/module1/co/1-sources-energie.html>.

<https://blog.olawatt.com/guides-dossiers/lenergie-verte/energie-renouvelable-definition-difference-energies-non-renouvelables>.

Sites consultés en JANVIER 2021.

Marek Wróbel, Marcin Jewiarz, Andrzej Szlęk, Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2018, Série: Springer Proceedings in Energy, Springer International Publishing, 2020.

Anthony N. Penna, The History of Energy Flows: From Human Labor to Renewable Power, Routledge, 2020.

Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Cellules solaires 5ème édition , Les bases de l'énergie photovoltaïque, Dunod 2010.

Bertrand Cassoret, Energy Transition, CRC Press, 2021.

Chapitre 2 : Energie éolienne

Historique, principe et structure, Caractéristiques et dimensionnement, Carte du gisement éolien en Algérie, Parcs éoliens et puissance, Normes, Avantages et inconvénients. Exemple d'une installation éolienne.

1 INTRODUCTION

- L'énergie éolienne (prend sa racine du mot grec Eole, le Dieu du vent) est l'énergie produite grâce au vent. C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques : les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, car elle cause moins de pollution. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons.
- Le vent ne peut assurer un apport énergétique régulier et il est difficile à contrôler.
- Les **éoliennes** produisant de l'électricité sont appelées **aérogénérateurs**, tandis que les éoliennes servant au pompage de l'eau sont appelées éoliennes Bollée. Mais le mot éolienne est employé pour désigner un aérogénérateur, de façon générale. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent comprises entre 14 et 90 km/h. Au-delà, elles s'arrêtent pour des raisons de sécurité. La production électrique varie selon la vitesse du vent. C'est avec des vents de 45 à 90 km/h que l'éolienne produit sa puissance maximale.

2 HISTORIQUE

L'utilisation de la force du vent pour produire de l'énergie n'est pas nouvelle. L'énergie du vent est apparue pour la première fois sous l'image de voiles pour les bateaux leur permettant d'avancer. La première machine à avoir utilisé le vent en tant que source d'énergie fut le moulin à vent. Quant à l'énergie éolienne, elle fut pour la première fois exploitée par les perses dans une conception très simple pour l'irrigation de leurs cultures. Elles ont ensuite été utilisées pour pomper l'eau et couper le bois, puis en 1891 le premier aérogénérateur fut inventé par le danois Poul La Cour qui a pour but de produire de l'électricité. Puis, la première éolienne à axe vertical fut inventée bien que la puissance générée était assez faible jusqu'en 1957 où la puissance atteignit 200kw par le constructeur danois Gedser. Mais le marché de l'éolien ne prit de l'ampleur qu'après le premier choc pétrolier en 1973.

3 PRINCIPE, STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT

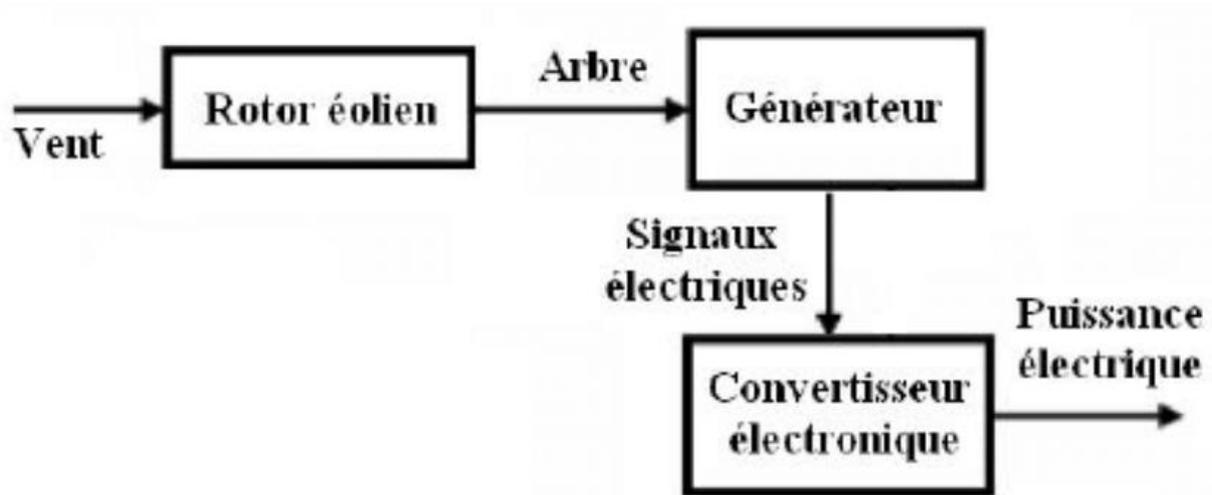


Figure (1): Principe du système de conversion éolien

- Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique (figure 1) : le vent fait tourner des pales qui font elles même tourner le générateur de l'éolienne. À son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Le courant électrique est ensuite transformé et injecté dans le réseau électrique pour alimenter les foyers. Il peut être stocké pour être utilisé, ultérieurement.

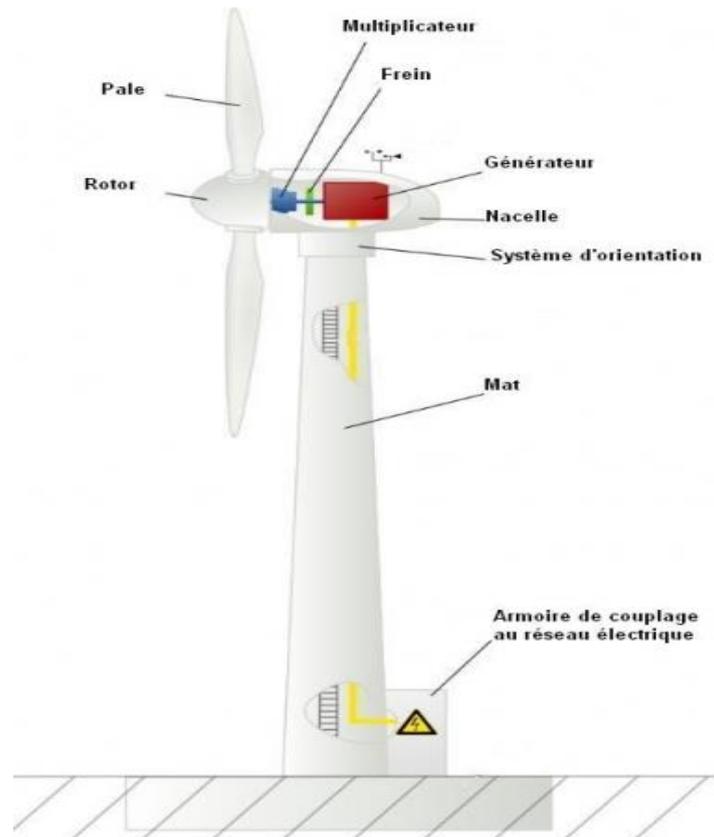


Figure (2): Les principales composantes de la structure d'une éolienne commerciale.

- La machine (figure 2) se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement.

Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Ainsi, le multiplicateur a pour rôle d'accélérer le mouvement lent des pales.

- L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 volts. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur, et sa tension est augmentée à 20 000 volts. Elle est alors injectée dans le réseau électrique et peut être distribuée aux utilisateurs.

3 TYPES D'ÉOLIENNES

Il existe deux types d'éoliennes:

1-avec un axe **vertical**, perpendiculaire au sol



Figure (3): avec axe vertical

2- avec un axe **horizontal**, parallèle au sol.



Figure (4) : avec axe horizontal

4 CARACTERISTIQUES

On distingue :

Les éoliennes terrestres

Les éoliennes terrestres tripales à axe horizontal sont les éoliennes les plus implantées sur le territoire.



Figure (5) : éolienne terrestre

Les éoliennes en mer posées

Fixes et destinées aux fonds de moins de 50m, ces éoliennes, actuellement les plus puissantes, peuvent exploiter les forts vents marins côtiers.



Figure (6) : éolienne en mer posée

Les éoliennes en mer flottantes

Avec une fondation flottante, reliées au fond par des lignes d'ancrage, ces éoliennes peuvent être implantées plus au large, dès 30m de fond.



Figure (7) : éolienne en mer flottante

La puissance d'une éolienne (en kW, kilowatts) mesure sa capacité de production d'électricité. C'est une caractéristique technique qui ne dépend que de l'éolienne en elle-même, et non de l'endroit où elle est posée. Les éoliennes sur terre ou en mer sont en constante évolution, de plus en plus performantes et puissantes. L'apparition de turbines de plus de 4MW pour le terrestre permet d'augmenter l'énergie produite sans multiplier le nombre d'éoliennes. Avec le développement de l'éolien en mer, les éoliennes en mer posées dépassent désormais les 8MW et les solutions flottantes les 2MW.

5 DIMENSIONNEMENT

Le but de cette partie est de dimensionner d'un point de vue énergétique l'installation d'éoliennes terrestres afin de produire $C = 74,872 \text{ GWh/an}$. Afin de calculer le nombre d'éoliennes de 3 MW nécessaires pour subvenir à cette consommation, il suffit de diviser C par le nombre d'heures de fonctionnement dans une année (nous l'estimons à 5 000 heures) puis de diviser par la puissance annuelle moyenne réelle de l'éolienne, 1,8 MW (P) par exemple. On trouve $n = 8,32$ éoliennes.

Il faudrait donc 9 éoliennes d'une puissance totale nominale de 27 MW et d'une puissance totale réelle P' de 16,2 MW pour couvrir les besoins énergétiques de l'usine. Cela correspond à une production énergétique réelle p de :

$$p = 81,00 \text{ GWh}$$

On obtient une production énergétique de 81,00 GWh/an.

En considérant que les 9 éoliennes sont séparées de 500 mètres à 1 km, soit 4 fois le diamètre des pales si les éoliennes sont placées à la perpendiculaire des vents dominants et 7 fois le diamètre des pales si elles sont placées dans l'axe des vents dominants, et qu'elles sont placées en ligne, on obtiendrait une distance totale nécessaire de 5 à 9 km.

6 CARTE DU GISEMENT EOLIEN EN ALGERIE

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. La vitesse annuelle des vents varie du 1.2 à 6.3 m/s à 10 m de hauteur. Les sites situés au sud de l'Algérie sont plus ventés, avec un maximum enregistré à Adrar à 6.3 m/s, suivi par Hassi R'mel avec 6.1 m/s. Le rendement électrique des éoliennes varie en fonction de la vitesse du vent, par exemple en passant d'une vitesse de 5m/s à 10 m/s, la quantité d'électricité produite se multiplie par 8 en non pas par deux, et pour les installations de grandes puissances, les vitesses du vent doivent être supérieures à 6 m/s, la hauteur de référence état 10 mètres. Aussi, la disponibilité (heures/an) joue un rôle important dans l'importance du gisement éolien.

La figure (8) montre la carte des vents de l'Algérie à 10 m d'altitude.

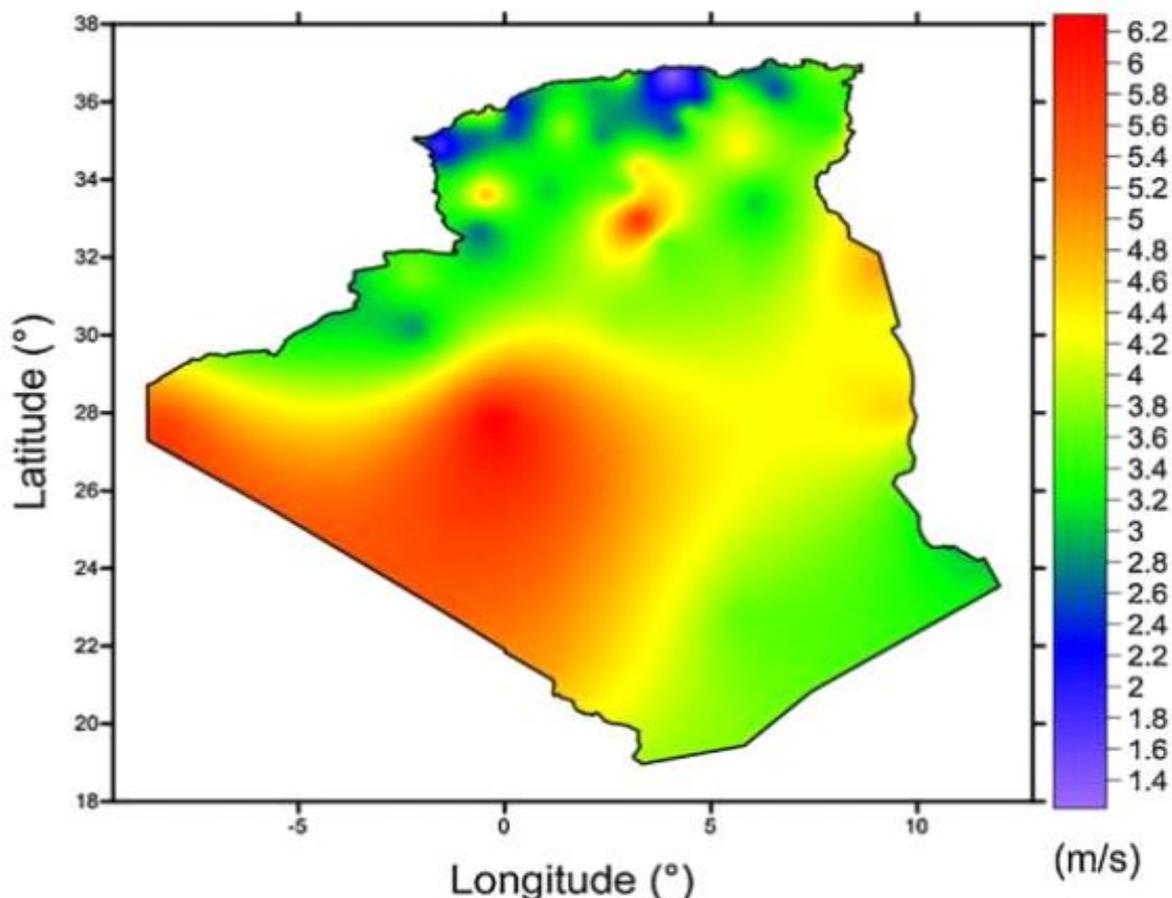


Figure (8) : Carte des vents de l'Algérie à 10 m d'altitude (m/s).

7 PARC EOLIEN ET PUISSANCE

Un parc éolien, ou une ferme éolienne, est un site regroupant plusieurs éoliennes produisant de l'électricité. Il se trouve en général dans un lieu où le vent est fort et/ou régulier. Une ferme éolienne sur terre est constituée de plusieurs éoliennes distantes entre elles d'au moins 200 m dont la production d'électricité est destinée à la vente au distributeur local. Bien que chaque machine ait une faible emprise au sol, il faut disposer d'une superficie de l'ordre de 10 hectares pour un parc éolien significatif. On distingue deux types de parc éolien, onshore (à l'intérieur des terres) ou offshore (au large des côtes).

En 2018, la production mondiale d'électricité éolienne s'élevait à 1 273,4 TWh, en hausse de 12,4 % ; elle représentait 4,8 % de la production totale d'électricité

- La Ferme éolienne de Gansu, province du Gansu, en Chine, est le plus important parc du monde avec 5 160 MW de puissance en novembre 2010, une puissance totale de 20 GW en 2020. Le parc de Guazhou comporte à lui seul, plus de 400 éoliennes, produisait 200 MW en 2010 et 400 MW en 2015.

8 ÉNERGIE EOLIENNE, CERTIFICATIONS ET NORMES

Il existe plusieurs certifications portant sur l'énergie éolienne en Europe. En France, il existe la norme EN 50 308 : "Aérogénérateur, Mesures de Protection Exigences pour la Conception, le Fonctionnement et la Maintenance".

Elle fixe "les prescriptions pour les mesures de protection ayant trait à la santé et à la sécurité du personnel, applicables à la mise en service, au fonctionnement, et à la maintenance des éoliennes d'axe horizontal".

Ses prescriptions tiennent compte des risques mécaniques (chutes, glissement, ...), thermiques (incendie, brûlures ...), électriques, engendrés par le bruit ou résultant de la non observation des principes d'ergonomie.

Elle fait référence à près d'une trentaine d'autres normes, et notamment aux normes de la série EN 292 (sécurité des machines).

Cependant, si les industriels souhaitent volontairement faire certifier leurs installations éoliennes, il existe des organismes indépendants comme GL (Germanisher Lloyd).

9 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE

• Avantages

1-coût de production relativement faible

2-L'énergie éolienne est une énergie propre (pas d'émissions de gaz, pas de particules)

- L'énergie éolienne est renouvelable et « décarbonée » en phase d'exploitation.
- Le terrain où les éoliennes sont installées reste toujours exploitable pour les activités industrielle et agricole. L'installation peut être démantelée relativement facilement.
- Leur développement offshore présente un potentiel non négligeable.
- Implantées localement, les éoliennes peuvent permettre de répondre à des besoins électriques de masse tout comme à des besoins domestiques limités, selon leur taille.

- **Inconvénients**

1- Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable

2- La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques

Le développement de l'énergie éolienne s'est fortement accéléré de puis 1995 avec une progression moyenne de 20% par an dans le monde

Cette progression s'accompagne par une évolution de fiabilité de la taille des éoliennes et de leur rendement

- L'énergie éolienne dépend de la puissance et de la régularité du vent.
- C'est une source d'énergie intermittente.
- Les zones de développement sont limitées.
- Les éoliennes peuvent susciter des conflits d'usage d'ordre environnemental comme les nuisances visuelles et sonores.
- Il peut exister des conflits d'utilisation de l'espace terrestre ou marin avec les autres usagers (exemple : pêcheurs, plaisanciers).

10 EXEMPLE D'UNE INSTALLATION EOLIENNE

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953, à Adrar, par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mat de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales a fonctionné pendant près de 10 ans. Par ailleurs, deux autres éoliennes ont été installées à Mécherai, pour l'alimentation en eau potable de la ville et à Naama, pour le pompage de l'eau. Les deux machines étaient couplées à une génératrice à courant continu et entraînaient une pompe électrique à courant continu. Une autre éolienne du même type a été installée pour la protection cathodique des tubages du Chott Chergui. Le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe a installé 77 éoliennes de pompage de l'eau sur les Hauts plateaux. Mais suite aux nombreux incidents mécaniques rencontrés avec les éoliennes de pompage mécanique, il est généralement admis que pour les forages de grandes profondeurs, l'option aérogénérateur couplé à une pompe électrique est plus fiable. Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4 m/s.



Figure (9) : Eolienne d'Adrar

L'installation électrique d'une éolienne peut-être schématisée simplement selon

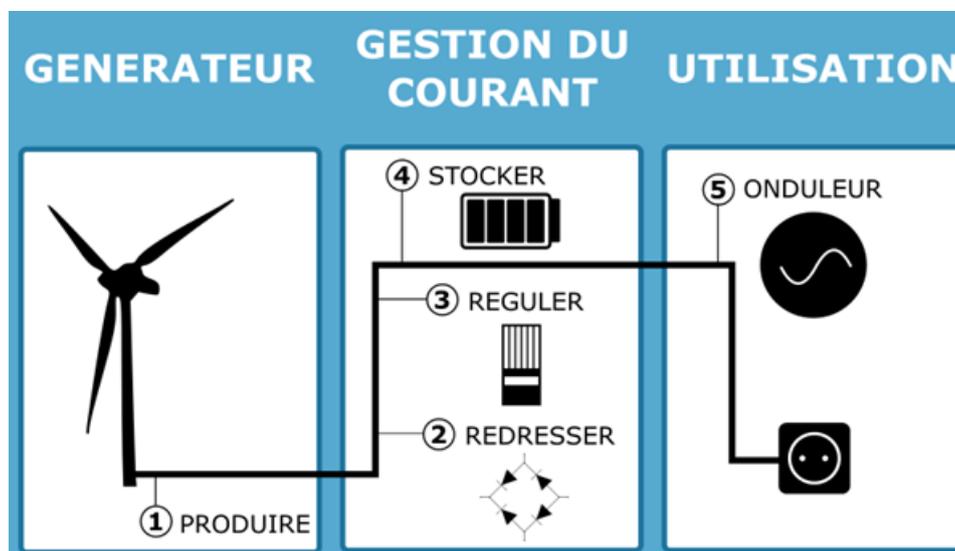


Figure (10) : Installation simplifiée

1) Production du courant

La production du courant se fait via l'éolienne grâce au générateur. C'est un courant alternatif. En effet, bien que nos appareils électriques fonctionnent avec du courant alternatif, ceux-ci requièrent une fréquence et une tension stables au risque d'être dégradés instantanément... Et le courant directement produit par notre éolienne ne possède pas ces caractéristiques, on dit qu'il s'agit d'un courant « sale » car sa fréquence et sa tension sont très variables au cours du temps et en plus n'est produit que de façon intermittente car

dépendante du vent. C'est pourquoi il faut passer par une série d'étapes permettant de rendre ce courant « propre » et utilisable par nos appareils.

2) Redresser le courant

On utilise un pont de diodes qui va permettre de passer du courant alternatif au courant continu.

3) Réguler le courant

Le régulateur ou contrôleur de charge a deux fonctions. D'une part il va lisser le signal du courant, c'est à dire qu'il va permettre d'obtenir un courant continu de tension plus stable, les pics de tensions venant compenser les creux. Et d'autre part il va dissiper le courant superflu pour fournir un courant de sortie ne dépassant pas une tension voulue.

Le courant continu est « propre ». En cas de ralentissement ou d'arrêt de l'éolienne, la tension chutera et nous n'aurons plus de courant.

4) Stockage

Quand l'éolienne produit du courant, le surplus est stocké dans des batteries d'accumulateurs et sera restitué lorsque l'éolienne ne produira pas suffisamment pour alimenter l'installation.

5) Onduleur

L'onduleur est l'appareil qui permet de passer du courant continu au courant .

REFERENCES

Yu Ding, Data Science For Wind Energy, Chapman And Hall/CRC, 2020.

Marc Rapin, Jean-Marc Noël, Énergie éolienne - Principes. Études de cas, Dunod, 2010.

Max F. Platzer, Nesrin Sarigul-Klijn , The Green Energy Ship Concept: Renewable Energy from Wind Over Water, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, Springer International Publishing, Springer, 2021.

https://fee.asso.fr/wp-content/uploads/2018/05/fee_comprendre_principes.pdf.

<https://fee.asso.fr/comprendre-leolien/principes-et-fonctionnement/#:~:text=Le%20principe%20de%20fonctionnement%20de,du%20vent%20en%20%C3%A9nergie%20%C3%A9lectrique.>

<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne#:~:text=L'%C3%A9nergie%20%C3%A9olienne%20est%20donc,par%20un%20syst%C3%A8me%20de%20gouvernail.>

https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber33_16.pdf.

<https://univ-blida2.dz/eco/wp-content/uploads/sites/23/2018/04/%D8%A7%D8%AD%D9%85%D8%AF-%D8%B4%D9%88%D9%85%D8%A7%D9%86-%D9%88%D8%B3%D8%A7%D9%85-%D8%A8%D9%88%D8%AE%D8%A7%D8%B1.pdf>.

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1210>.

<https://www.acteurdurable.org/energie-eolienne/#:~:text=%C3%89nergie%20%C3%A9olienne%2C%20certifications%20et%20normes,-Il%20existe%20plusieurs&text=En%20France%2C%20il%20n'existe,le%20Fonctionnement%20et%20la%20Maintenance%E2%80%9D>.

https://www.umc.edu.dz/images/ber37_6_7.pdf.

<https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/technique>.

<http://www.fabriquer-eolienne.com/installation-electrique-eolienne-infographie/>

Sites consultés en janvier 2021.

Chapitre 3 : Systèmes hybrides

Systèmes Hybrides (Hydrolienne, Principe de fonctionnement de l'hydrolienne, Les différents types d'hydroliennes et les exploitants,...)

1 DEFINITION DE L'HYBRIDATION

Un système hybride est un système caractérisé par plusieurs sources différentes et/ou plusieurs charges différentes et/ou plusieurs éléments de stockage et/ou plusieurs formes d'énergie (électrique, thermique) .

2 C'EST QUOI UNE HYDROLIENNE ?

Une hydrolienne est un générateur d'électricité entraîné par un courant d'eau naturel, celui d'une rivière ou celui de la marée, ou encore par un courant marin stable. C'est une manière d'exploiter le potentiel de l'énergie marémotrice.

3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'HYDROLIENNE

Une hydrolienne permet d'exploiter la force de l'eau des mers, des océans ou des fleuves, qui est inépuisable, renouvelable et régulière.

Une hydrolienne transforme de la sorte, l'énergie cinétique des courants marins en énergie électrique. À l'image de ce qui se passe pour une éolienne, une hydrolienne se compose d'une turbine mise en rotation par le mouvement de l'eau. Un alternateur, entraîné par la turbine, produit un courant électrique continu, transformé ensuite en courant alternatif. Les hydroliennes peuvent être installées sous la surface ou posées sur le fond.

On peut qualifier l'hydrolienne d' "éolienne sous-marine", car elle fonctionne sur le même principe que sur l'éolienne. Elle transforme l'énergie cinétique des courants marins en énergie mécanique lorsque le courant traverse l'hélice et la fait tourner, et enfin le mouvement des pales transforme cette énergie en électricité, grâce à l'alternateur comme précité.



Figure (1) : Mécanismes d'une hydrolienne

Une hydrolienne est donc une turbine hydraulique qui utilise l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent.

L'eau a une masse volumique 832 fois plus importante que l'air. Par conséquent, un courant d'eau, même faible, aura une force plus importante contre l'hélice de l'hydrolienne, que le vent contre l'hélice d'une éolienne.

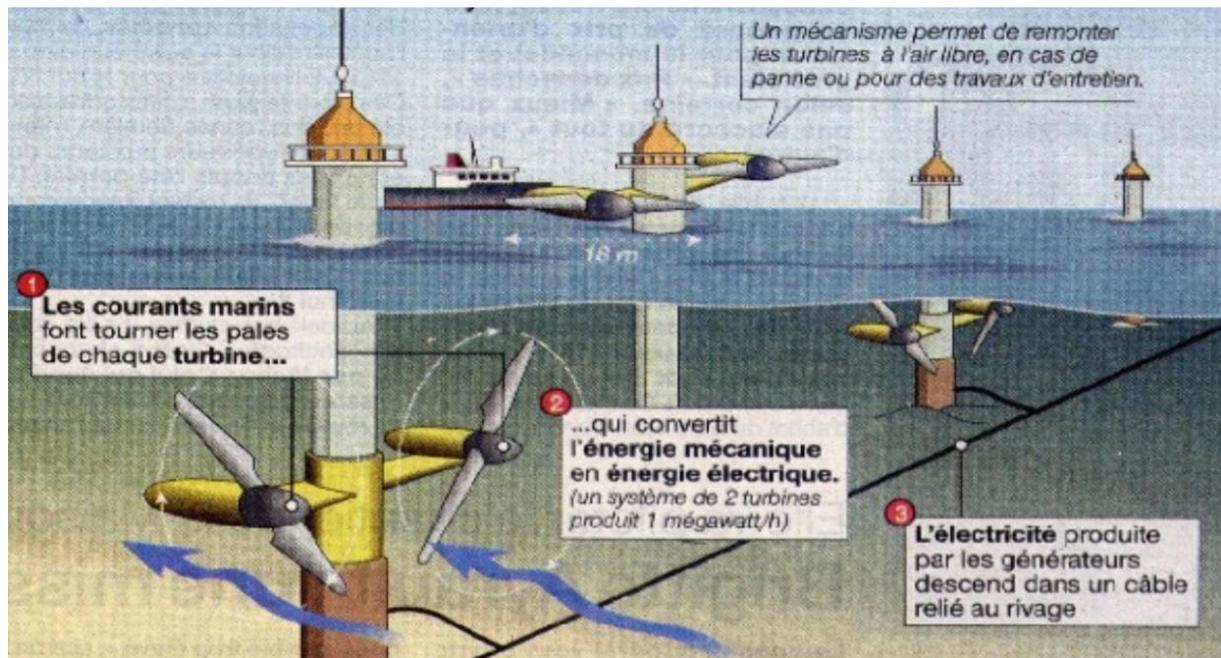


Figure (2) : Principe de l'énergie hydrolienne

4 LES PRINCIPAUX TYPES D'HYDROLIENNE ET EXPLOITANTS

Pour les principaux types d'hydrolienne, on a :

- Hydrolienne à axe horizontal : Ce sont les hydroliennes les plus utilisées. Elles sont fixées au sol marin par un socle. Celles-ci peuvent contenir jusqu'à 4 hélices. Elles possèdent souvent une partie hors de l'eau, pour la maintenance.



Figure (3) : Photos d'hydroliennes à axe horizontal

-L'Hydrolienne « Hydrogen » : Celle ci se situe à la surface de l'eau. Elle ressemble a un moulin à vent .



Figure (4) : Photos d'hydroliennes « Hydrogen »

-Les Hydroliennes de type « chaîne » : Ce sont des enchaînements d'hélices placés sur les fonds marins. Elles ne gênent donc pas la navigation mais elle peuvent recouvrir une grande surface de fonds. Elles sont souvent placées près des côtes ou à l'embouchure des fleuves.



Figure (5) : Hydroliennes de type « chaîne »

Il existe d'autres types d'hydroliennes moins utilisées comme :

- Une hydrolienne transverse en mouvement, souvent comparée à un batteur d'oeuf
- Une hydrolienne à ailes battantes
- Une hydrolienne à turbines libres
- L'hydrolienne de type « rideau » .

Une trentaine de projets d'exploitation d'**hydroliennes est** actuellement testée dans le monde. Cependant les principaux **exploitants** se situent en Norvège, en Grande Bretagne, au Canada, en France, et en Italie.

De nombreux concepts d'hydrolienne ont été expérimentés et exploités. Aucun ne s'est vraiment imposé. Quelques-uns ont donné lieu à des démonstrateurs ou à des réalisations expérimentales mais peu sont rentrés dans un stade de production industrielle. L'EMEC (European Marine Energy Centre) recense plus de 50 principes techniques différents mais le Centre européen de l'énergie marine reconnaît six principaux types de convertisseurs d'énergie marémotrice. Ce sont des turbines à axe horizontal ou vertical...

5 AVANTAGES

Les hydroliennes possèdent de nombreux avantages environnementaux. Elles exploitent l'énergie marémotrice, qui est une source d'énergie naturelle, non polluante et gratuite. Elle est inépuisable et continue (les courants marins sont toujours présents en mer contrairement aux vents sur terre, pour les éoliennes). Les courants marins sont prévisibles, on peut donc estimer avec précision la production d'électricité. Elles ont un impact minimal sur la vie marine, la forme du rotor est étudiée pour ne présenter aucun danger. En effet, les pales possèdent des bords arrondis et donc non coupants. Les hélices ne sont donc pas dangereuses car elles tournent à un rythme de dix à quinze tours par minute, soit dix fois moins vite que celles d'un bateau (ce qui limite les turbulences et ne perturberait pas les animaux) et enfin, ne rejettent aucun déchets. Grâce à la rotation des hydroliennes, cela empêche un dépôt de sédiment sur les dispositifs ainsi que son évasement (l'entretien peut donc être fait moins souvent, étant donné que celles-ci sont difficile d'accès et à entretenir). De plus, son espace nécessaire est réduit. Malgré leurs tailles inférieures aux éoliennes, elles fournissent une puissance électrique égale voir supérieure (masse volumique de l'eau qui est presque huit-cent fois supérieures à celle de l'air, comme entrevu). Elles ne provoquent pas de gênes

sonores (elles sont donc silencieuses au fond de l'eau et inaudibles en surface) et ne sont, la plupart du temps, invisible hors de la l'eau et ne nuisent pas aux paysages.

6 INCONVENIENTS

- La corrosion : le principal problème est causé par la corrosion de l'eau de mer. La rouille et la corrosion des matériaux composant l'hydrolienne ne permettent presque pas leur récupération et leur réutilisation après la « fin de leur vie ».
- La résistance et maintenance : L'hydrolienne doit résister à des conditions environnementales très dures (puissance des courants, sable en suspension...) La maintenance pose problème car l'accès au champ d'hydroliennes peut être difficile. Le personnel doit être formé spécialement pour la maintenance en mer. De plus, certains types d'hydroliennes ne possèdent pas de système leur permettant de remonter en surface, la maintenance doit alors être effectuée sous l'eau par des plongeurs.
- Un entretien parfois fréquent et difficile : l'entretien doit être très fréquent mais il est plus difficile qu'à l'air libre puisqu'on ne peut pas l'ouvrir sans que l'eau ne pénètre à l'intérieur et n'endommage tout le système (mécanique et électrique), Pour cette raison , certaines hydroliennes ont une structure émergeant de l'eau, qui peut être gênante pour la navigation. Des systèmes pourraient permettre de faire monter ou descendre les unités de production.
- Le financement: Le financement de tout ces projets est également un réel problème. Le cout d'installation d'une hydrolienne est de 3,8 millions d'euro pour chaque megawatt installé, soit près d'un million de plus que pour l'éolienne. Des études ont montré que ces hydroliennes seraient très vite rentabilisées (4ans pour certaines) .
- Zones de turbulences: Les hydroliennes créent parfois, des zones de turbulences , de la sorte, les végétaux ne peuvent pas se développer correctement .
- Des poissons peuvent parfois, se heurter aux hélices ...

REFERENCES

<https://tpehydroliennes.webnode.fr/presentation-du-concept/>

<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-hydrolienne-9800/>

<https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/principe-et-fonctionnement-de-l-hydrolienne>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrolienne>

<https://tpehydroliennes.webnode.fr/presentation-du-concept/>

<http://www.ac-grenoble.fr/college/la-chapelle/IMG/pdf/hydrolienne2.pdf>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrolienne>

<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1917>

Sites consultés en février 2021.

FZ Zerhouni, Développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de pv-pac, thèse de doctorat, département d'ELN, USTOMB, 2009.

Alain Ménesguen, Les marées vertes - 40 clés pour comprendre, éditions Quæ, 2017.

Chapitre 4 : Energie solaire photovoltaïque

Principe d'une installation photovoltaïque, le gisement solaire en Algérie, Technologies des cellules photovoltaïques, Les modules photovoltaïques, MPPT, Caractéristiques et connectique photovoltaïque, Normes. L'onduleur. Exemple d'une installation photovoltaïque.

1 INTRODUCTION

Le photovoltaïque (PV) nous offre la capacité à générer de l'électricité d'une manière propre, verte, "calme" et fiable. Les systèmes photovoltaïques comportent des cellules photovoltaïques : des dispositifs pour convertir l'énergie lumineuse directement en électricité. Un module ou panneau photovoltaïque consiste en une connexion série de plusieurs cellules photovoltaïques.

Le processus photovoltaïque produit donc de l'électricité directement de la lumière du soleil.

2 L'ENERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire est la partie ou fraction de l'énergie électromagnétique provenant du soleil, traversant l'atmosphère qui en absorbe une partie, et parvenant à la surface de la Terre. Elle y est trouvée sous forme de lumière et de chaleur. Elle peut être utilisée au moyen de capteurs solaires thermiques pour produire de la chaleur (eau chaude et chauffage d'appoint), au moyen de concentrateurs pour activer des processus chimiques et pour produire de l'électricité, et au moyen d'installations photovoltaïques pour générer du courant.

On y distingue ainsi 3 types :

Energie solaire thermique

Le principe de l'énergie solaire thermique consiste à produire de la chaleur au moyen de capteurs solaires. Le soleil chauffe la maison, la piscine...

L'énergie solaire thermique diffère du solaire photovoltaïque, puisqu'il s'agit de produire du chauffage et non de l'électricité.

Energie solaire thermodynamique

Une centrale solaire thermodynamique à concentration est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur qui permet en général de produire de l'électricité. Ce type de centrale permet, en stockant ce fluide dans un réservoir, de prolonger le fonctionnement de la centrale plusieurs heures au-delà du coucher du soleil.

Energie solaire photovoltaïque

Le principe de l'énergie solaire photovoltaïque est de transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

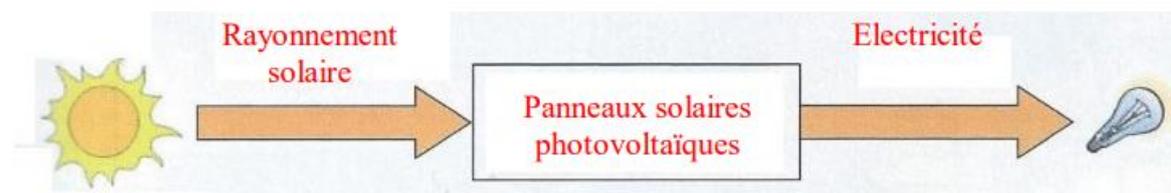


Figure (1) : principe de la conversion solaire photovoltaïque

- L'énergie solaire photovoltaïque provient donc de la conversion de la lumière du soleil, en électricité, au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique.
- L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries.

Conversion photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0,2 micron) à l'infrarouge lointain (2,5 microns), avec une majorité dans le visible (0,3 micron –violet– à 0,8 micron –rouge–) autour d'un pic à 0,45 micron. L'énergie totale portée par ce rayonnement est de près de 1 360 W/m² dans l'espace, au voisinage de la Terre, et de 1 000 W/m² au niveau de la Terre, du fait de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons, l'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h.c}{\lambda} \quad (1)$$

où h est la constante de Max Planck (1858- 1947), c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein (1879-1955) le prix Nobel en 1905. Une façon commode d'exprimer cette énergie est justement son analogue électrique :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (2)$$

Où λ est exprimé en micron, E s'exprime alors en électronvolt (eV).

Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Donc, la conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie du photon en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé, il éjecte un électron d'un niveau d'énergie inférieur, vers un niveau d'énergie plus élevé, créant ainsi une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, cette paire électron-trou revient à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique... Le matériau chauffe au soleil. Récupérer toute ou partie de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque.

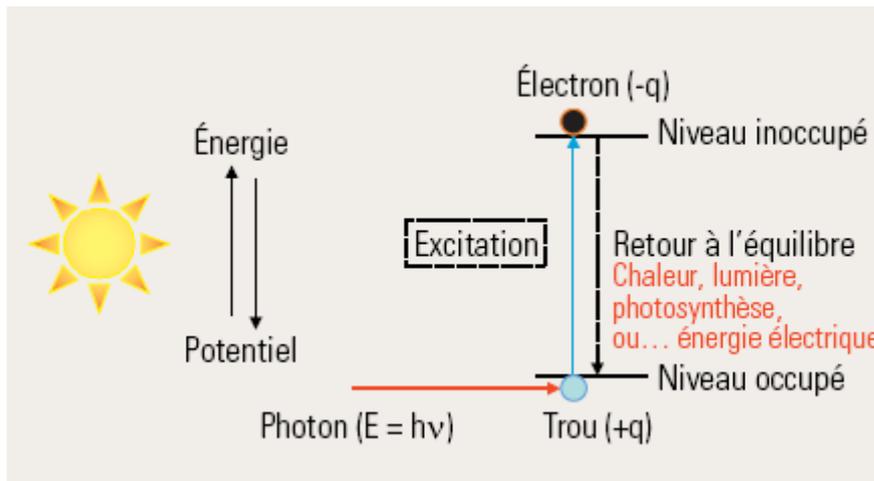


Figure (2) : Processus d'adsorption de la lumière dans un matériau.

Cette conversion photovoltaïque se fait grâce à une pièce maîtresse qui est la cellule solaire photovoltaïque. Avec l'apparition de cette nouvelle technologie c'est le silicium qui a été utilisé comme semi-conducteur car il se trouve en grande quantité dans la silice (sable).

Nous définirons un semi-conducteur comme: "un matériau où les électrons périphériques se répartissent à une température supérieure au zéro absolu, entre deux bandes d'énergie au moins, séparées par un intervalle d'énergie (gap), relativement faible (de l'ordre de 1 eV)".

La transformation de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Comme entrevu, une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium : une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors

une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes: positive et négative de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs (électron, trou). La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{co} . Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit I_{cc} .

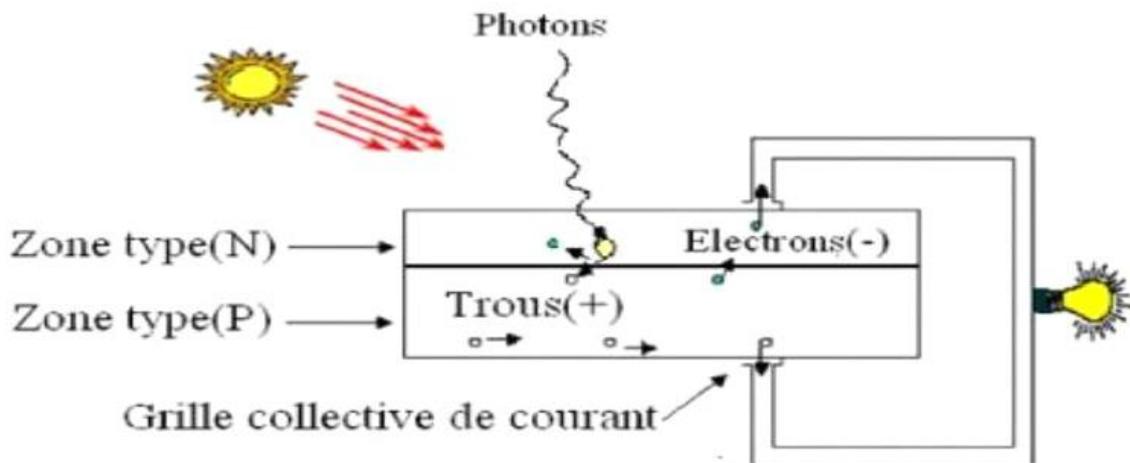


Figure (3) : Présentation schématique d'une cellule solaire

3 PRINCIPE D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

Les installations photovoltaïques autonomes ont pour rôle d'alimenter des récepteurs électriques de façon fiable. Compte-tenu du caractère fluctuant du rayonnement solaire, il est nécessaire de mettre en place une batterie assurant l'alimentation électrique (la nuit).

Une installation solaire photovoltaïque est composée de 4 grands éléments :

- Des modules photovoltaïques ou panneaux solaires qui sont les composants présents dans toutes les installations,
- Des batteries si on veut pouvoir consommer de l'électricité la nuit ou pendant des périodes de faible ensoleillement ou de forte nébulosité,
- Un onduleur s'il faut convertir le courant continu produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif,
- Un régulateur solaire pour améliorer la durée de vie et le rendement de l'installation.



Figure (4) : Exemple d'une installation solaire PV

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité par *effet photovoltaïque* qui a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel. La puissance d'un module photovoltaïque est exprimée en Watt-crête. Le nombre de Watt-crête d'un panneau solaire correspond au nombre de Watt que ce panneau fournit lorsqu'il est utilisé dans des conditions standards. Ensuite, il faut stocker l'électricité produite. Dans une installation solaire photovoltaïque, il faut souvent stocker l'énergie produite pour l'utiliser plus tard. Pour cela on utilise des batteries qui seront chargées quand les panneaux solaires produiront de l'électricité et déchargées quand l'utilisateur la consommera. La quantité d'énergie stockée s'exprime en Watt-heure (Wh) mais les fabricants indiquent souvent la capacité de leurs batteries en Ampère-heure (Ah). Dans ce cas, il faut multiplier ce chiffre par celui de la tension aux bornes des batteries (en général 12 Volt) pour obtenir une équivalence en Watt-heure. Si nécessaire, il faut transformer l'électricité. Les panneaux solaires produisent du courant continu. Le courant stocké et restitué par les batteries est également du courant continu. Sauf, s'ils sont conçus spécifiquement pour être alimentés par une installation solaire, les appareils électriques consomment l'électricité distribuée sur le réseau public, c'est à dire du courant alternatif dont la tension est de 110 ou 220 Volts. Il va donc falloir convertir l'électricité produite par les panneaux solaire pour l'utiliser. Pour cela on utilise un onduleur. Finalement, tous ces éléments sont à relier avec un régulateur.

Pour faire travailler ensemble ces différents composants, il faut un cerveau à l'installation solaire. C'est le rôle du régulateur solaire. Le régulateur va notamment faire en sorte que les batteries ne soient ni complètement déchargées ni surchargées. Certains modèles peuvent aussi permettre de maximiser la puissance fournie par les panneaux solaires quelque soit les conditions climatiques ou de charge.

La qualité du régulateur joue un rôle clé dans la performance de l'installation et la durée de vie des batteries. Même s'il n'est pas absolument nécessaire, il est fortement recommandé d'en utiliser un. En résumé, une installation photovoltaïque autonome est composée des éléments suivants :

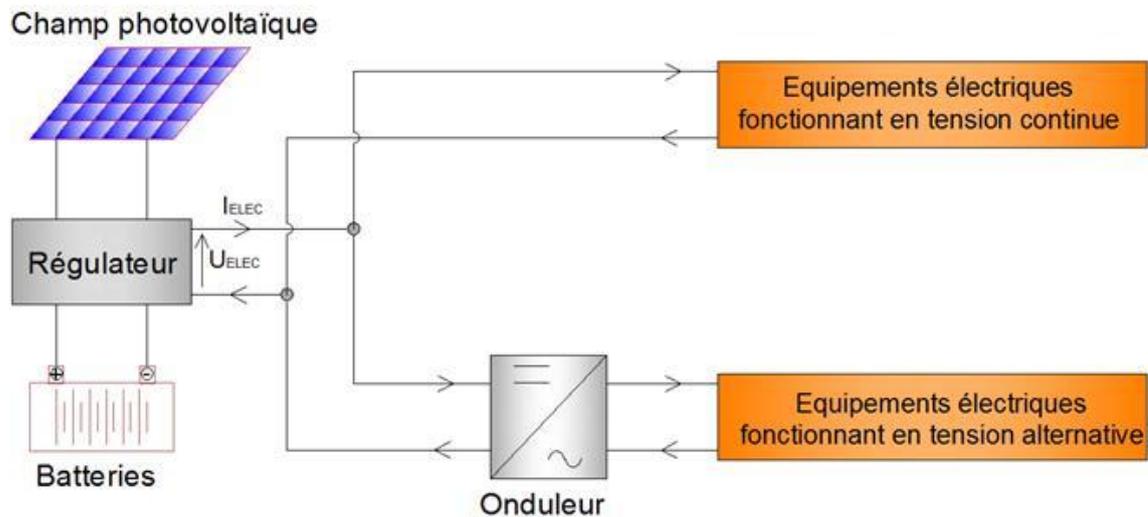


Figure (5) : Eléments souvent utilisés dans une installation PV

4 LE GISEMENT SOLAIRE ET GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE

C'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.

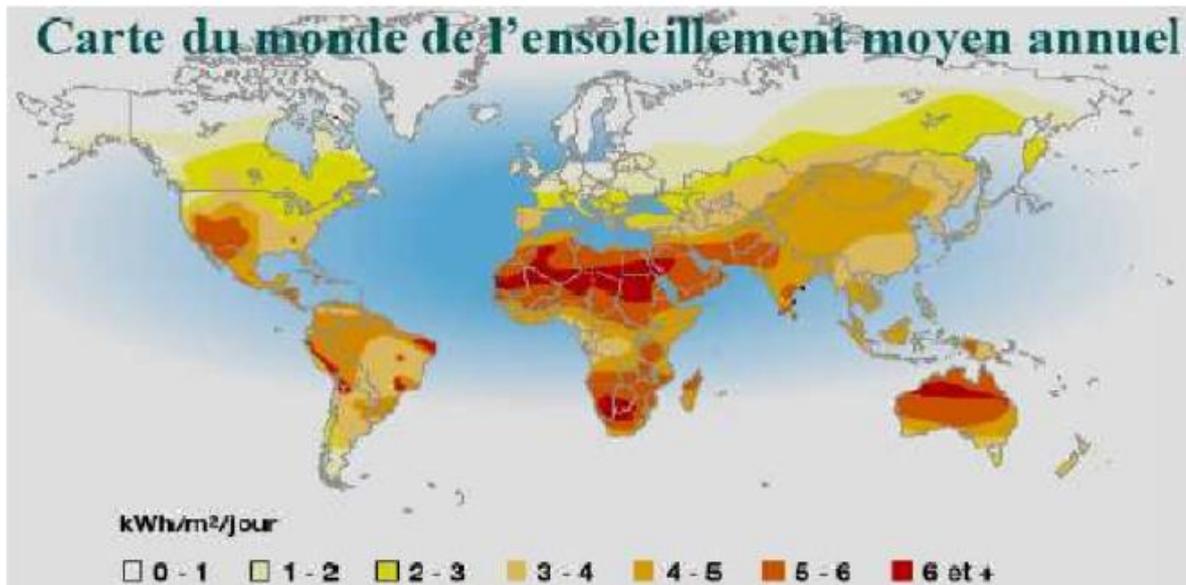


Figure (6) : Ensoleillement moyen annuel

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 ci dessous 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 1: Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'ensoleillement (h/an)	2650	300	3500
Energie moyenne recue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

Tableau 2: La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien

En figure ci dessous est représentée la carte du gisement solaire Algérien de l'année 2010. L'Algérie est un pays qui possède une richesse d'ensoleillement. 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.

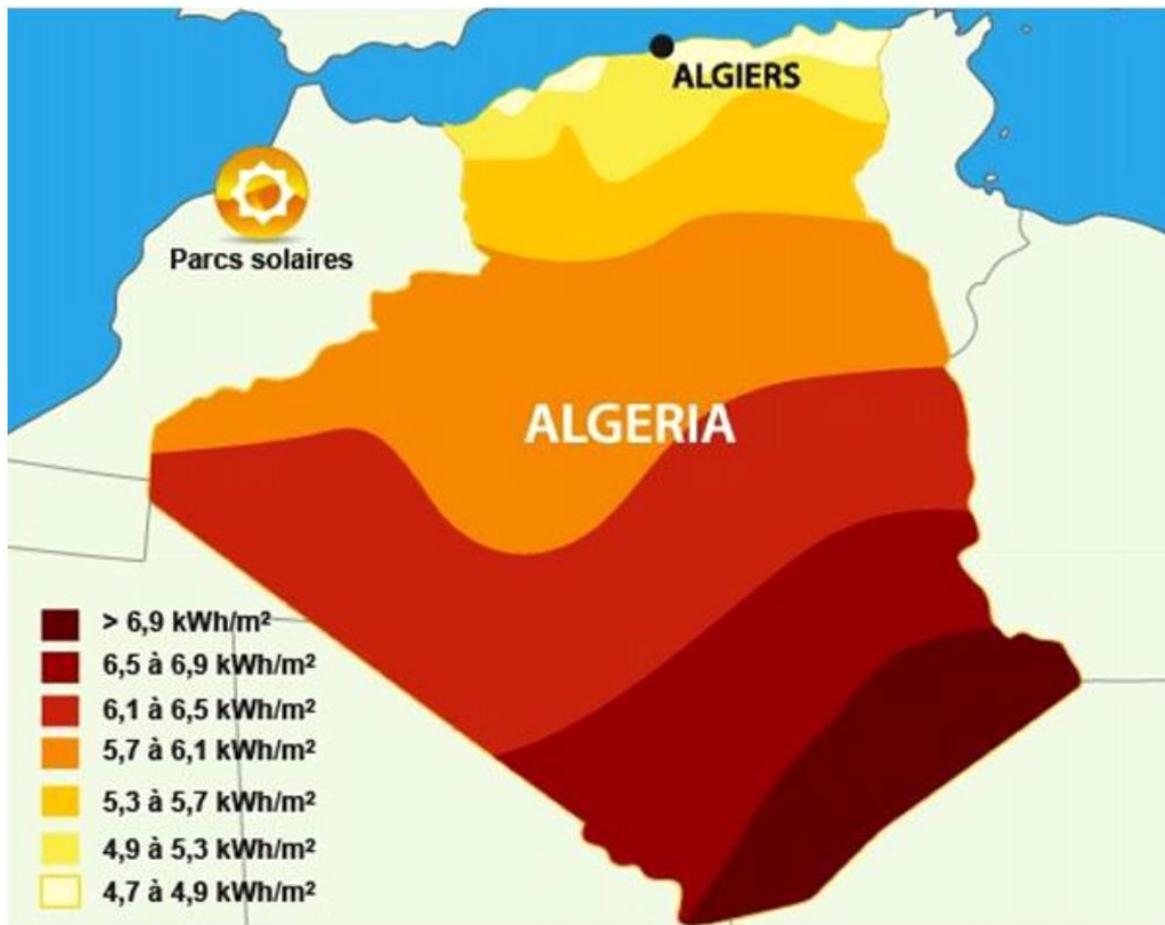


Figure (7): carte du gisement solaire de l'Algérie

L'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA (en anglais Middle East and North Africa) et l'un des plus importants au Monde.

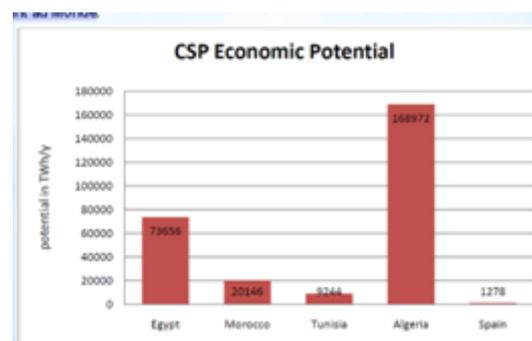


Figure (8): Potentiel à MENA

Rendement et ensoleillement

La quantité d'électricité qu'un panneau photovoltaïque peut produire est mesurée par sa **puissance crête** (kWc ou kWp). Cela correspond à la puissance que peut délivrer une installation sous des conditions d'ensoleillement (1000W par m²) et de températures optimales (25°C).

A noter que la puissance réellement émise sera toujours inférieure au chiffre indiqué théoriquement puisque son rendement dépendra de différents critères (localisation, efficacité des cellules, mise en œuvre, orientation, maintenance, ...)

5 TECHNOLOGIE DES CELLULES SOLAIRES

Il existe plusieurs types de cellules solaires. Le rendement utilisé est celui de conversion entrevu. On citera :

- **Cellule en silicium mono cristallin**

Le rendement de ce matériau photovoltaïque (15 % à 17 %) est légèrement supérieur à celui du silicium polycristallin. En revanche, sa fabrication est plus délicate donc plus coûteuse.

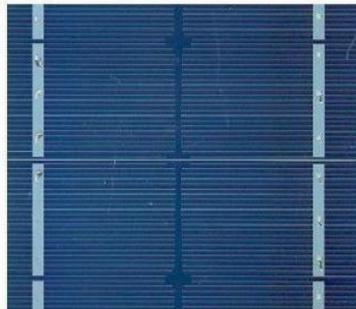


Figure (9): Cellule au Silicium mono cristallin.

- **Cellule en silicium polycristallin**

Il s'agit du matériau photovoltaïque le plus utilisé (à lui seul plus de 50% du marché mondial). Il offre un bon rendement (de 12% à 14 %).



Figure (10): Cellule en silicium polycristallin.

- **Cellule en silicium amorphe**

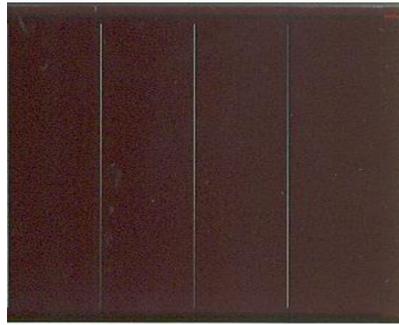


Figure (11): Cellule en silicium amorphe

La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites << solaires >>. Le rendement de ce matériau photovoltaïque est bien inférieur (6%). Son coût est faible.

- **Cellule tandem**

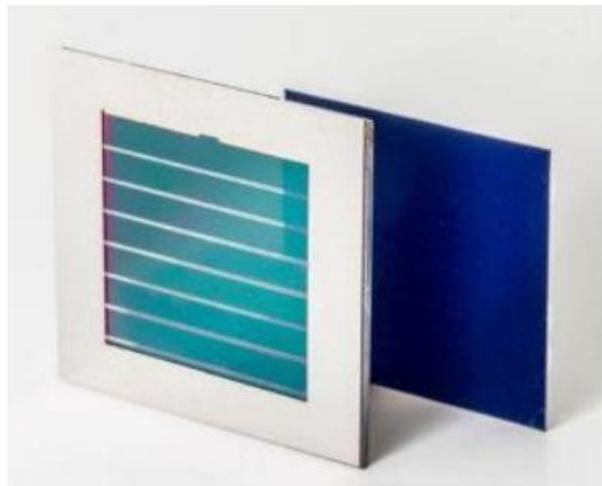


Figure (12): Cellule tandem

C'est l'empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux connexes, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

Par ces avantages, elle a un rendement de 12% et une sensibilité élevée sur une large plage de longueurs d'onde.

- **Cellule CIGS**

La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium sur un support. Le rendement s'établit respectivement à 15 et 17%.

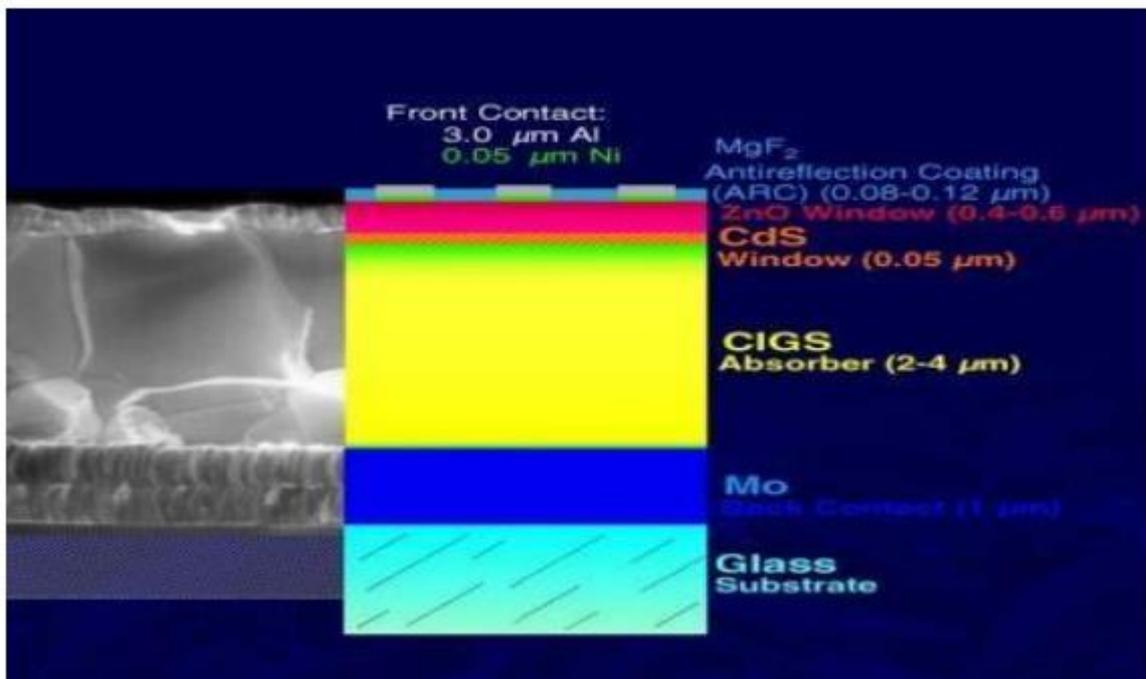


Figure (13): Cellule CIGS

- **Cellule organique**

Les cellules photovoltaïques organiques sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques. Elle a un rendement minimum de 15% .

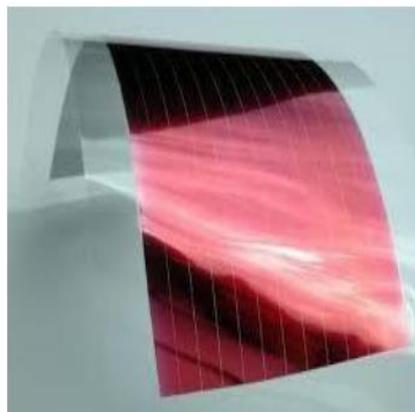


Figure (14): Cellule organique.

- **Cellule multi-jonction**

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. C'est l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé. Ça génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire. Le rendement est de 32 % à 39 % . Elles sont caractérisées par un coût très élevé.



Figure (15): Cellule multijonction

Le tableau ci-dessous résume la plupart des filières technologiques de la cellule solaire.

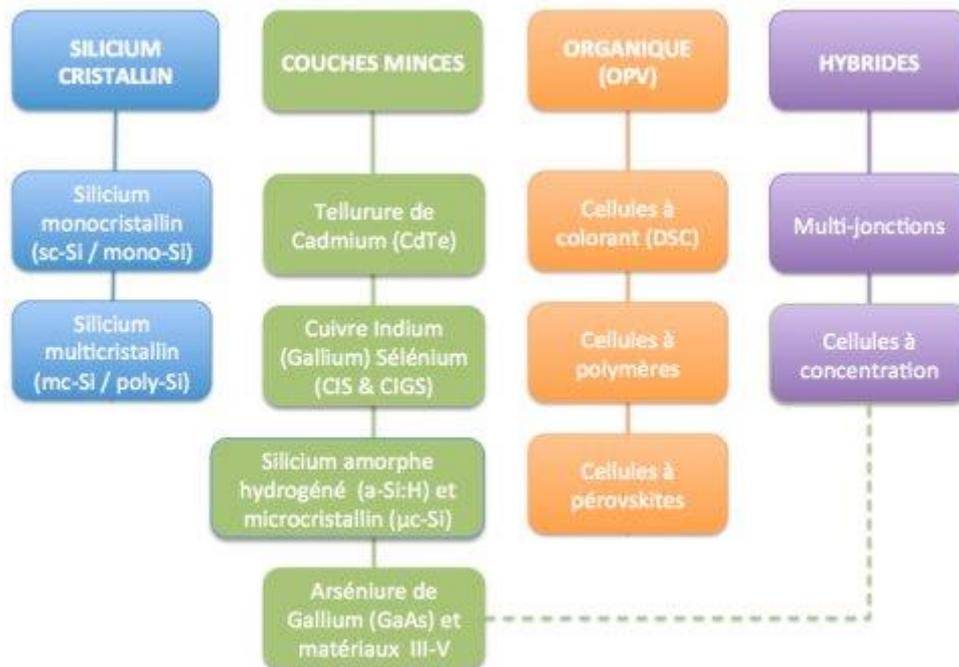


Figure (16): Classification des principales technologies de cellules solaires PV

6 CARACTERISTIQUES DE L'ENERGIE PV

La technologie photovoltaïque présente un nombre d'avantages et d'inconvénients.

- Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages. D'abord, une haute fiabilité. Elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. Ensuite, le caractère modulaire des cellules photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances variables.

Les entretiens sont réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Cette énergie est gratuite.

Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%). Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

Il y'a le problème d'intermittence et le caractère aléatoire.

7 ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque (PV), ne produit qu'une très faible puissance électrique. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. On le définit comme étant le regroupement de plusieurs cellules solaires en série, fournissant de la sorte des grandeurs de sortie appréciables (tensions).

Les connexions en série de plusieurs modules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module et au nombre de modules connectés en parallèle. En associant les modules PV en série (*somme des tensions de chaque cellule*) et/ou en parallèle (*somme des intensités de chaque cellule*), on peut constituer un générateur ou champ PV, selon les besoins des applications visées.

On appellera N_s , le nombre de modules photovoltaïques connectés en série formant une branche. On appellera N_p le nombre de branches mises en parallèle. Le produit :

$$N_t = N_p \cdot N_s \quad (3)$$

donnera le nombre total de modules utilisés.

Pour notre cas, le générateur photovoltaïque GPV est composé de plusieurs modules ou panneaux connectés soit en série, soit en parallèle, soit en configuration mixte (série et parallèle). Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque(GPV), des équipements et de la charge.

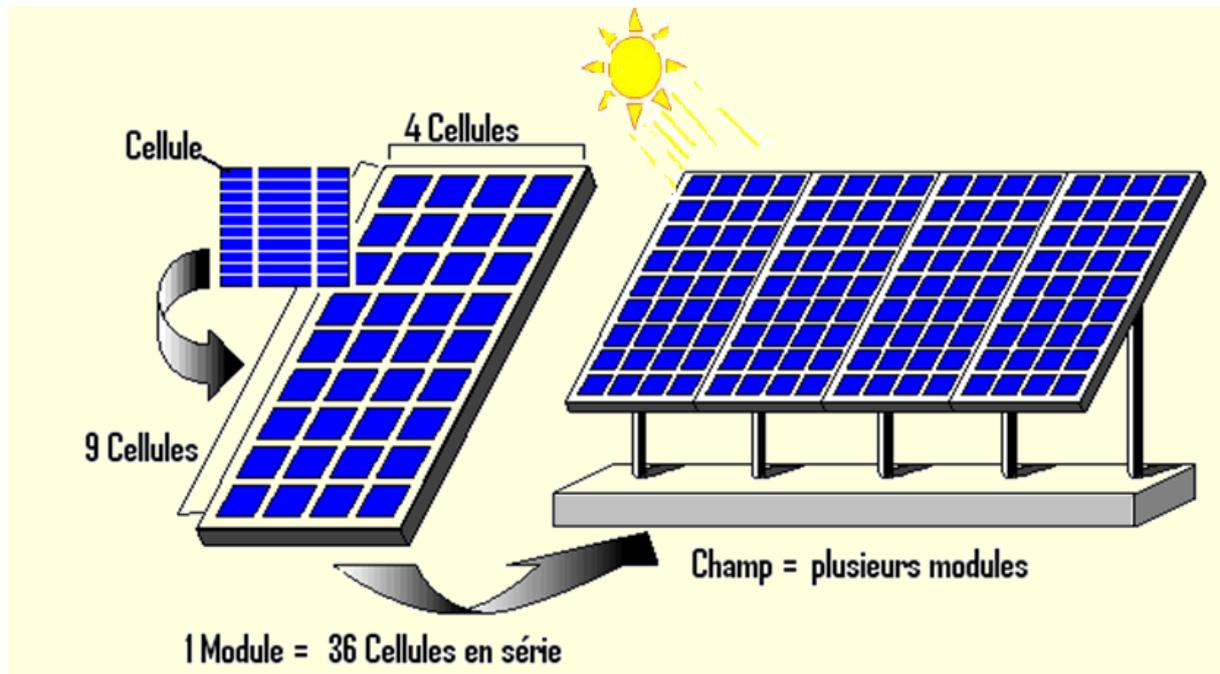


Figure (17) : Notion de module PV, de générateur PV

8 LE MPPT : maximum power point tracker

Lors de la conception des systèmes photovoltaïques, on essaie souvent d'obtenir le maximum d'énergie solaire afin de répondre aux besoins énergétiques des divers récepteurs utilisés. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension.

Les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et la charge un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale. Pour intégrer les modules au niveau système, le champ PV peut être associé à un organe MPPT (Maximum Power Point Tracking). Il permet d'ajuster, en chaque instant, la puissance électrique fournie par le champ à sa valeur maximale (dans les conditions d'ensoleillement et de température de l'instant considéré) en déplaçant le point de fonctionnement du module sur sa courbe caractéristique.

Deux types de convertisseurs électriques peuvent être utilisés pour la connexion du GPV au système dans lequel il est intégré.

Des convertisseurs DC/DC ainsi que les systèmes de poursuite du point de puissance maximum (MPPT) sont utilisés pour éviter les pertes en puissance. Le convertisseur DC/DC, pour notre cas permet le suivi et le maintien du point maximum de puissance de module photovoltaïque indépendamment de la température, de l'irradiance et de la charge reliée. Ceci pourrait être une bonne pratique d'amélioration du rendement global du système énergétique vert photovoltaïque.

Cette qualité d'adaptation détermine le degré d'exploitation des cellules solaires.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale.

Le fonctionnement du générateur dépend fortement des caractéristiques de la charge avec laquelle il est associé. En effet, pour différentes valeurs de charges, l'adaptation optimale se produit pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximale (*MPP*). Celui-ci correspond à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe courant-tension *I-V* donnée. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe *source-charge*, le rendement de l'ensemble est alors optimal lorsque le système fonctionne à son *MPP*.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge. Ainsi, le générateur est alors susceptible de délivrer sa puissance maximale.

Or, les changements brutaux d'ensoleillement et de charge peuvent survenir. Ainsi, le générateur peut à tout instant avoir sa courbe de puissance modifiée ainsi que son *MPP*. Le MPPT doit suivre ces changements.

Le MPPT est un système qui fera la recherche du *MPP* du GPV. Ce système est intercalé entre le GPV et la charge. Il fournit un degré de liberté noté ' α ' qui nous permettra d'agir sur la caractéristique électrique de la charge vue par le GPV à n'importe quel moment. En exploitant ce degré de liberté, on pourra assurer le transfert de la puissance maximale du GPV vers la charge.

Le MPPT est un convertisseur transformant les grandeurs de l'entrée en des grandeurs de sortie tel montré en Figure 9:

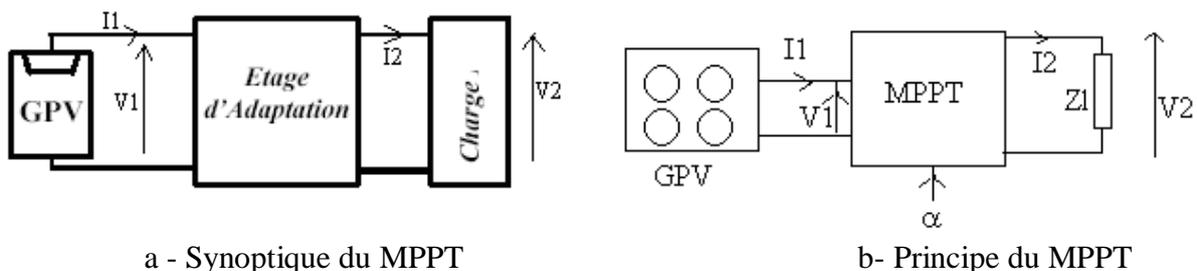


Figure (18) : LE MPPT

Donc, un MPPT (maximum power point tracker) est un convertisseur (CS) statique dont le principe de fonctionnement s'apparente à celui d'un transformateur. Il convertit les grandeurs d'entrée courant et tension I_1, V_1 en des grandeurs de sortie respectivement I_2 et V_2 de même nature selon les équations suivantes:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

HACHEUR

Pour un hacheur dévolteur (ou série), la tension moyenne de sortie V_s est inférieure à celle de l'entrée E du GPV [32].

$$V_s = \alpha.E \quad (4)$$

$$0 \leq \alpha \leq 1 \quad (5)$$

Pour un hacheur survolteur (ou parallèle), la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à la tension d'entrée.

$$V_s = \frac{E}{1-\alpha} \quad (6)$$

$$\alpha > 1$$

La tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée E du GPV.

En supposant que le MPPT est un dévolteur idéal, on a :

$$V_2 = \alpha.V_1 \quad (7)$$

$$I_2 = \frac{I_1}{\alpha} \quad (8)$$

Z_l étant la charge à approvisionner par voie solaire, on a :

$$Z_e = \frac{Z_l}{\alpha^2} \quad (9)$$

Z_e est la transformée de Z_l par le *Maximum Power Point Tracker* (MPPT).

Pour $\alpha = \alpha_{opt}$, on a

$$V_1 = V_{opt} \ \& \ I_1 = I_{opt} \quad (10)$$

9 CONNECTIQUE PHOTOVOLTAÏQUE

La connectique regroupe toutes les techniques liées aux connexions physiques des liaisons électriques.

Les modules photovoltaïques d'une installation sont reliés électriquement par des fils électriques. Sur la face arrière des modules se trouve un boîtier duquel s'échappent deux câbles unipolaires.



Figure (19) : Câbles unipolaires du module PV

Le branchement en série de deux modules s'effectue simplement en branchant le pôle positif de l'un sur le pôle négatif de l'autre. Aujourd'hui, la très grande majorité des fabricants de modules intègrent avec leur produit des connecteurs mâles et femelles afin de faciliter le câblage.

Pour les connecteurs, il y'a les :

- Connecteurs MC3
- Connecteurs MC4
- Connecteurs TYCO

MC signifie Multi-Contact. Multi-Contact AG est une société qui fabrique et commercialise des connecteurs et des systèmes de connexions électriques. Pour la connexion des modules photovoltaïques entre eux, Multi-Contact AG propose une gamme de connecteurs, nommé MC3, permettant de connecter rapidement et sûrement les modules, ainsi qu'illustré sur la photo ci-dessous.



Figure (20) : Connecteurs MC3

Multi-Contact AG propose aussi des connecteurs encore plus sûr, nommé MC4. Les connecteurs MC4 sont une évolution des connecteurs MC3. Ils disposent en effet d'une fonction de verrouillage dit "Snap-In". Les connecteurs mâles et femelles restent ancrés l'un dans l'autre et ne peuvent être déconnectés qu'en actionnant un processus de déverrouillage mécanique.



Figure (21) : Connecteurs MC4

Une autre société se démarque dans la conception et la fabrication de connecteurs : Tyco Electronics.



Figure (22) : Connecteurs Tyco

10 ONDULEUR

Dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau, l'onduleur occupe une place centrale. Il va transformer le courant et la tension continus, délivrés par le champ photovoltaïque, en un courant et une tension alternatifs compatibles avec le réseau. On distinguera donc toujours la partie continue notée CC (Courant Continu), en amont de l'onduleur, et la partie alternative notée CA (Courant Alternatif), en aval de l'onduleur.

Un onduleur possède un rendement supérieur à 94 %. Son remplacement est à prévoir tous les 10 ans environ.

Un onduleur photovoltaïque doit remplir plusieurs fonctions essentielles dans une installation photovoltaïque raccordées au réseau :

- La conversion du courant et de la tension continus en courant et tension alternatifs compatibles avec le réseau
- La recherche du point de puissance maximum du champ photovoltaïque
- La protection de découplage
- Le contrôle de l'isolement de la partie CC de l'installation photovoltaïque

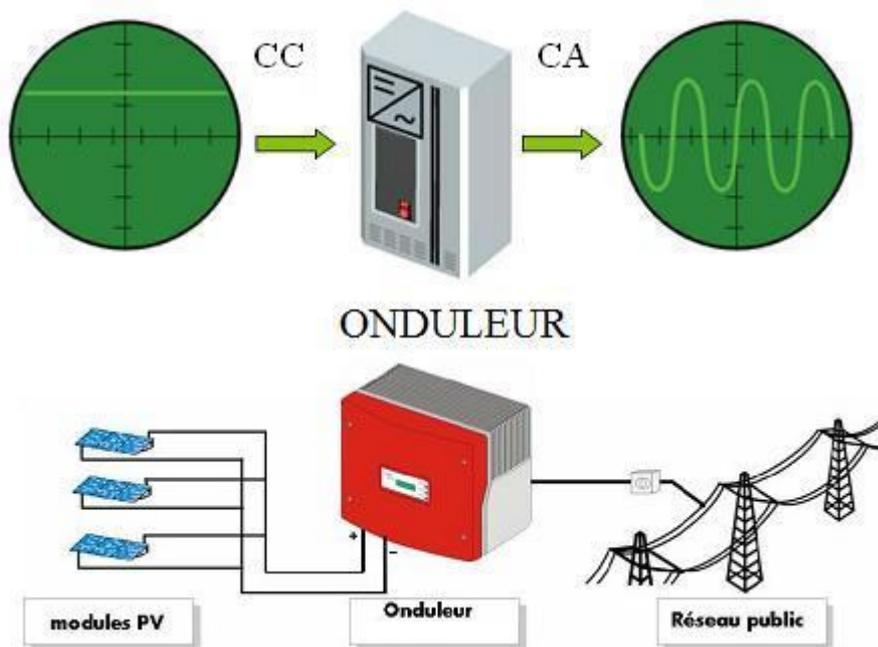


Figure (23) : Onduleur

L'onduleur peut être utilisé pour la recherche du point de puissance maximum (charge de type AC).

Il est à noter que le point de fonctionnement d'un générateur dépend de la charge à ses bornes.

Ses critères de choix sont:

En entrée :

- la puissance maximale,
- la tension maximale,
- la plage de tension d'entrée,
- le nombre maximal de string raccordables.

En sortie :

- la puissance maximale et la puissance nominale,
- la tension nominale et la fréquence nominale
- le rendement.

11 NORMES

La figure ci-dessous résume celles ci:

Modules PV NF EN 61215 : Qualification et homologation NF hEN 61730-1 et -2 : Sûreté de fonctionnement NF EN 61701 et NF EN 62716 : corrosion au brouillard salin et à l'ammoniac (NF EN 50548), NF EN 62790 : Boîtes de jonction CEI TS 62804-1 : PID NF EN 50380 : Plaques constructeur NF EN 62759-1 : Transport
Câbles PV NF hEN 50618, UTE C32-502
Connecteurs PV (NF EN 50521), NF EN 62852
Fusibles PV NF hEN 60269-6
Parafoudres PV NF EN 50539-11
Onduleurs PV NF hEN 62109-1 et -2 : Sécurité électrique DIN VDE 0126-1-1 : Découplage NF EN 50530 : Efficacité NF EN 61557-8 : Contrôleur d'isolement NF EN 50524 : Fiche technique et plaque d'identification

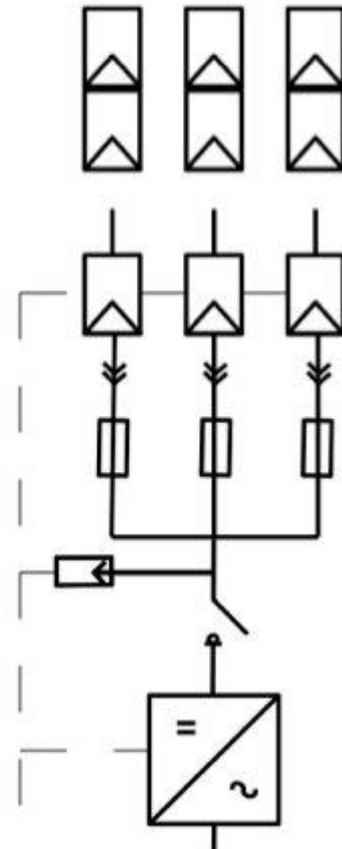


Figure (24) : Normes (exemple)

12 EXEMPLE D'UNE INSTALLATION PV

La pile à combustible est un convertisseur fonctionnant selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau.

L'hydrogène est le principal combustible envisagé qui peut être produit à partir de sources énergétiques diverses.

On passe directement de l'électricité à l'hydrogène et inversement, par la réaction réversible en Figure 25, au moyen de procédés électrochimiques propres et efficaces, impliquant respectivement des électrolyseurs ou des piles à combustibles.

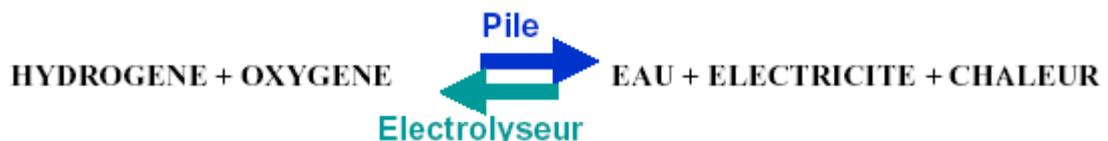


Figure (25) : Complémentarité électricité – hydrogène

L'architecture du système considéré comme exemple, en Figure 26 est composé d'un générateur solaire et d'un système de stockage d'énergie constitué d'un électrolyseur, d'une unité de stockage des gaz et d'une pile à combustible. Le champ photovoltaïque (PV) alimente directement la charge. L'excédent solaire est stocké sous forme chimique. Un électrolyseur (EL) dissocie l'eau en hydrogène et oxygène. Le gaz est stocké sans perte. Dans cette architecture, l'électrolyseur est alimenté directement du générateur photovoltaïque. Les

produits de l'électrolyseur (H_2 et O_2) seront utilisables pour une pile à combustible. Lorsque le champ solaire ne peut pas fournir la totalité de la demande d'électricité, la pile à combustible est connectée. Elle régénère l'électricité stockée en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène. La pile à combustible produit de l'eau pure qui est stockée pour approvisionner l'électrolyseur.

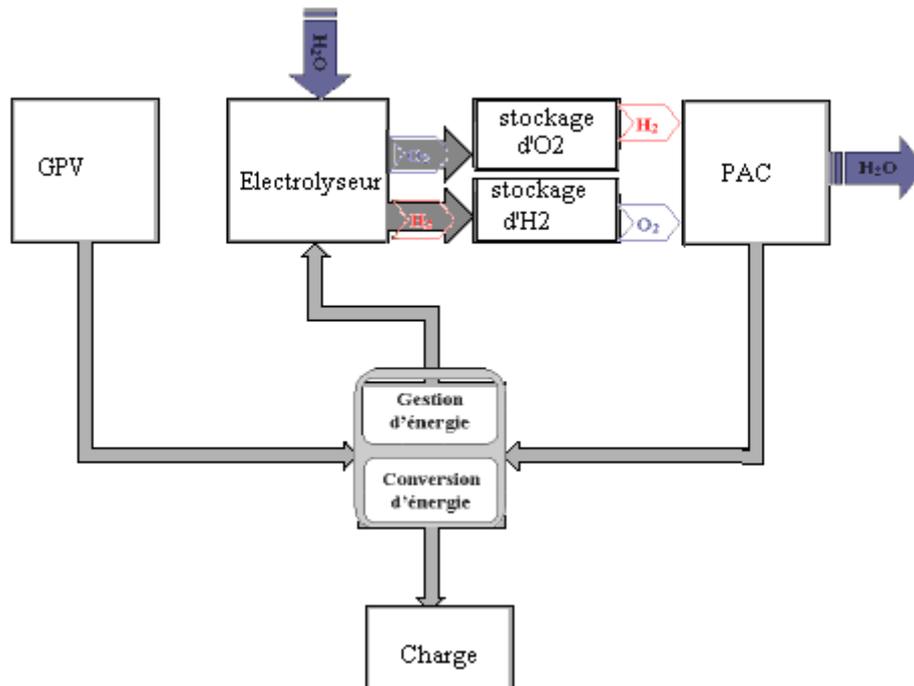


Figure (26): Exemple d'une architecture du système considéré

Les inconvénients majeurs sont le coût d'investissement de l'installation, le rendement et la complexité des composants électrochimiques.

13 EXEMPLE DE POMPAGE D'EAU PAR VOIE SOLAIRE

Monter de l'eau à la surface à l'aide d'une pompe alimentée par des panneaux solaires est assez simple et efficace, surtout dans les pays bien ensoleillés. Le pompage photovoltaïque est d'ailleurs une des applications les plus répandues dans les pays du Sud, et les premières pompes « solaires » datent des années 1970.

Ces systèmes fonctionnent « au fil du soleil ». Tant qu'il y aura du soleil, le système fonctionnera. L'eau est remontée quand il y a du soleil, et stockée dans un réservoir ou citerne placés en hauteur. On réalise un stockage en eau et non un stockage chimique. On peut

donc se passer de batteries. La figure 27 montre la structure d'une telle installation.

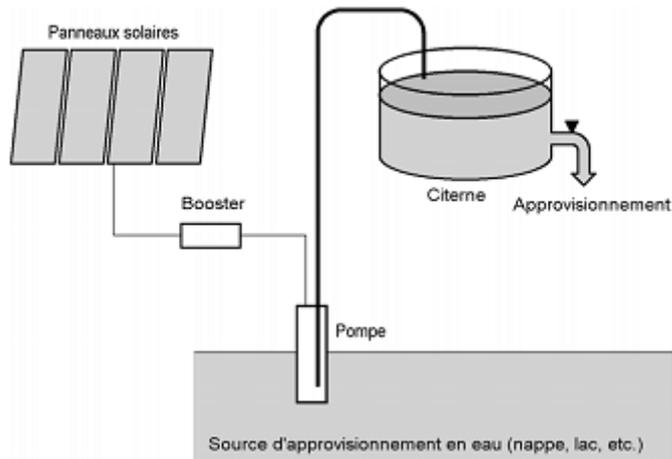


Figure (27) : Principe d'un système de pompage au fil du soleil

En finalité, le constat actuel recueille l'assentiment d'une majorité : la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître alors que les ressources énergétiques fossiles et fissiles, aisément exploitables mais épuisables, ne cessent de diminuer en conséquence. Cette consommation rapide des combustibles fossiles engendre des effets secondaires (gaz à effet de serre, déchets nocifs...) pouvant hypothéquer l'avenir de l'humanité. Ce constat couplé au souci croissant de protection de notre environnement entraîne une montée en puissance des énergies renouvelables, en particulier le photovoltaïque, justement pour la production d'électricité renouvelable. L'utilisation de cette énergie renouvelable de nature gratuite et intarissable nécessite sa maîtrise pour une meilleure gestion de l'ensemble de puissance.

Aujourd'hui, la technologie photovoltaïque est suffisamment mûre et maîtrisée pour prendre un véritable essor dans le domaine des applications de puissance. Ce créneau privilégié de l'énergie photovoltaïque concerne les zones d'accès difficile des pays et les pays en voie de développement comme l'Algérie.

L'énergie solaire paraît séduisante en raison de son abondance dans notre pays.

REFERENCES

FZ ZERHOUNI , développement et optimisation d'un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC, Doctorat ES SCIENCES en ELN, Département d'ELN, faculté du génie électrique, USTOMB, 2009.

M. ZEGRAR . MH ZERHOUNI FZ ZERHOUNI, ENERGIES RENOUVELABLES : le solaire photovoltaïque, polycopié M1 ESE, Département d'ELN, faculté du génie électrique, USTOMB, 2020.

ANNE LABOURET, PASCAL CUMUNEL, JEAN-PAUL BRAUN, BENJAMIN FARAGGI, Cellules solaires, 5ème édition, les bases de l'énergie photovoltaïque, Dunod, 2010.

http://www.photovoltaique.guidenr.fr/IV_connectique_photovoltaique.php.

[energie_solaire_photovoltaique.pdf](http://www.photovoltaique.guidenr.fr/energie_solaire_photovoltaique.pdf) (ac-poitiers.fr).

<http://www.solar-energeasy.com/be/fr/3/fonctionnement-panneaux-solaires>.

<http://energie-developpement.blogspot.com/2011/09/fonctionnement-dune-installation.html#:~:text=Le%20principe%20de%20fonctionnement%20d,ph%C3%A9nom%C3%A8ne%20physique%20appel%C3%A9%20effet%20photovolta%C3%AFque.&text=La%20puissance%20d'un%20module,est%20exprim%C3%A9%20en%20Watt%2Dcr%C3%AAté>.

http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours_photovoltaique.php.

https://www.google.com/search?q=norme+installation+photovoltaique&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=9md5nCZibQbFnM%252CRnYEd-qNlYmKpM%252C_&vet=1&usq=AI4_-kRoyfVz6v5zG6A64jF6o6fchVAMTQ&sa=X&ved=2ahUKEwiltOjfl6_vAhV1t3EKHdw6AXMQ9QF6BAgHEAE#imgsrc=9md5nCZibQbFnM.

<https://ateliersolaire.ch/comment-fonctionne-une-installation-photovoltaique/>

<http://www.photovoltaique.guidenr.fr/cours-photovoltaique-autonome/>

Sites consultés en janvier 2021.

1) INTRODUCTION

On utilise de plus en plus l'électricité. Elle devient une nécessité. Sa production actuelle pose des soucis. Les émissions de gaz à effet de serre sont synonymes de pollution.

Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, les énergies renouvelables n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes. Elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère. Les scientifiques ambitionnent une production non polluante d'une électricité dite 'verte'.

2) C'EST QUOI UNE ÉNERGIE RENOUVELABLE ?

En fonction de sa source, l'énergie peut se diviser en énergie renouvelable et non renouvelable.

On rappelle qu'une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle est produite par une source que la nature renouvelle en permanence, contrairement à une énergie dépendant de sources qui s'épuisent. Ainsi, les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est continu, assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles sont exploitables par l'homme. Elles existent en grande quantité et leur utilisation n'est pas nuisible à l'environnement. Elles sont issues du rayonnement solaire, du noyau terrestre et des interactions gravitation de la lune et du soleil avec les océans.

Une énergie non renouvelable est disponible en quantité limitée. Elle n'est pas en mesure de se renouveler. On donnera comme exemple le charbon, le gaz, le pétrole. Ce sont les énergies fossiles (hydrocarbures) ainsi que l'énergie fissile comme l'énergie nucléaire.

3) PRINCIPALES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les énergies renouvelables sont très diverses mais elles proviennent toutes de deux sources naturelles principales :

- le Soleil : il émet des rayonnements transformables en électricité ou en chaleur. Il génère des zones de températures et de pression inégales à l'origine des vents. Il engendre le cycle de l'eau. Il permet la croissance des plantes et la génération de la biomasse.
- la Terre, dont la chaleur interne peut être récupérée à la surface.

On a les énergies renouvelables d'origine éolienne, solaire, hydraulique, géothermique et provenant de la biomasse...

- **L'énergie hydraulique** des grands barrages est aujourd'hui la première des énergies renouvelables. La Chine, le Brésil, le Canada, les États-Unis, sont les leaders du secteur. À l'image des moulins à eau d'autrefois, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du 19^{ème} siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau. L'énergie hydraulique représente 19% à peu près de la production totale d'électricité dans le monde. C'est la source d'énergie renouvelable la plus utilisée. Cependant, tout le potentiel hydroélectrique mondial n'est pas encore exploité.

- **L'énergie solaire** est produite sous deux formes : le solaire photovoltaïque qui transforme le rayonnement lumineux du soleil en électricité grâce à des panneaux formés de

cellules de semi-conducteurs et le solaire thermique qui capte la chaleur du soleil, qu'on utilise comme telle ou bien qu'on transforme en énergie mécanique, puis en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (W_c) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles, en série.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles on est.

L'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires.

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être ensuite utilisée directement (eau chaude sanitaire, chauffage, etc.).

Les capteurs solaires thermiques et les chauffe-eau solaires connaissent une croissance spectaculaire en France. Crédit d'impôt et aides des collectivités locales sont particulièrement incitatives.

Le solaire thermodynamique ou CSP (Concentrated Solar Power) désigne l'ensemble des techniques visant à transformer l'énergie du rayonnement solaire en chaleur pour la convertir en énergie électrique, au moyen d'un cycle thermodynamique moteur couplé à une génératrice électrique (une turbine et un générateur, par exemple). Le solaire thermodynamique est principalement destiné aux pays à fort ensoleillement et permet, contrairement aux centrales photovoltaïques, de lisser plus facilement la production grâce à un stockage thermique tampon moins onéreux que les systèmes de batterie.

Une centrale solaire thermodynamique est constituée des éléments suivants :

- un dispositif optique de concentration du rayonnement solaire ;
- un système de production de chaleur composé d'un récepteur, d'un fluide caloporteur et, éventuellement, d'un moyen de stockage ;
- un sous-système de conversion de la chaleur en électricité.

- **L'éolien : énergie du vent** : Comme les moulins à vent du passé, les éoliennes génèrent des forces mécaniques ou électriques.

Avec une puissance mondiale installée de 200 GW en 2011, l'énergie éolienne est devenue un producteur majeur d'énergies renouvelables électriques. L'énergie éolienne est produite par des aérogénérateurs qui captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles mêmes un générateur produit de l'électricité d'origine renouvelable. Les plus hautes éoliennes atteignent 170 mètres, avec des rotors d'un diamètre de plus de 150 mètres.

- **Les différents types d'énergies marines** qu'on utilise proviennent de la force des vagues, des courants et des marées, des différences de température des océans et de certaines caractéristiques du couple eau salée/eau douce (énergie osmotique). Elles sont encore à un stade précoce de développement.

- **La biomasse** est constituée de toutes les matières organiques d'origine végétale (micro-algues incluses), animale, bactérienne ou fongique (champignons). Le bois a pendant des siècles été, via sa combustion, la principale source d'énergie avant d'être détrôné par le charbon puis le pétrole et le gaz. Mais il y a d'autres formes d'utilisation de la biomasse. La méthanisation produit du biogaz à partir de nos déchets ménagers ou agricoles. Le raffinage de la biomasse végétale permet la production de biocarburants.

On peut donc conclure qu'il y'a trois familles : Les bois énergie ou biomasse solide, le biogaz , les biocarburants

Ce sont tous des matériaux d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants de façon générale.

- **La géothermie** : La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. Elle utilise la chaleur des aquifères du sous-sol, voire des roches sèches, captée à plus ou moins grande profondeur, pour alimenter des quartiers urbains, des bâtiments ou des usines, ou encore produire de l'électricité via des centrales. Certains pays dont les conditions géologiques sont favorables l'utilisent, comme l'Islande ou les Philippines, deux pays volcaniques. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. Le critère est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de : « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C).

4) LES DIFFÉRENTES ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE MONDE

On définit la tonne d'équivalent pétrole (symbole tep) comme une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions : 41,868 GJ parfois arrondi à 42 GJ

Les stocks accumulés dans le monde en (combustibles fossiles et énergie nucléaire) estimés en 2018, à 1 120 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (tep), soit 91 ans de production à l'allure actuelle. On a 50 ans pour le pétrole, 51 ans pour le gaz naturel, 132 ans pour le charbon, 90 ans pour l'uranium, avec les techniques actuelles.

La production mondiale d'énergie commercialisée est en augmentation de 18,5 % depuis 2008. On a 32,3 % pour le pétrole, 28,3 % pour le charbon, 24,0 % pour le gaz naturel, 4,4 % pour le nucléaire et 11,5 % pour les énergies renouvelables (hydroélectricité 6,8 %, éolien 2,1 %, biomasse et géothermie 1,0 %, solaire 0,95 %, agrocaburants 0,6 %).

Toutes les énergies renouvelables font l'objet de recherches. Elles ne sont pas au même stade de développement.

La part des énergies renouvelables dans la production d'énergie mondiale, de façon générale est de 20 % à peu près.

Pour le photovoltaïque : il y'a eu la baisse du coût de production du kWh cette dernière décennie. L'Allemagne a excellé dans ce domaine. Mais à présent, les plus fortes capacités installées le sont aujourd'hui par la Chine et les États-Unis.

Pour l'éolien le coût de l'électricité produite reste encore élevé.

Pour la géothermie, de nouvelles techniques ont vu le jour.

D'autres en sont encore au stade d'expérimentation ou de recherches, comme les biocarburants de troisième génération fabriqués à partir des micro-algues ou les applications de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique.

L'énergie hydraulique, produite depuis longtemps assure la production de quantités importantes d'électricité.

Les énergies renouvelables représentent aujourd'hui une très faible part du mix électrique mondial. Leur progression est forte mais il faudra encore beaucoup de temps pour qu'elles rivalisent en quantité avec les énergies traditionnelles, notamment fossiles.

Le tableau ci-dessous présente la production énergétique mondiale d'après la source d'énergie.

Production énergétique mondiale commercialisée selon la source d'énergie

Énergie	Production en 2008	Production en 2018	Variation 2018/2008	Production 2018 en Mtep	Part en 2018
Pétrole ^{b 1}	83,07 Mbbbl/j	94,72 Mbbbl/j	+14 %	4 474	32,1 %
Charbon ^{b 9}	6 951 Mt	8 013 Mt	+15,3 %	3 917	28,1 %
Gaz naturel ^{b 2}	3 030 Gm ³	3 868 Gm ³	+28 %	3 326	23,9 %
Hydraulique ^{b 10}	3 256 TWh	4 193 TWh	+29 %	949	6,8 %
Nucléaire ^{b 11}	2 738 TWh	2 701 TWh	-1 %	611	4,4 %
Éolien ^{b 6}	221 TWh	1 270 TWh	+476 %	287	2,1 %
Solaire photovoltaïque ^{b 7}	12,6 TWh	585 TWh	× 46	132	0,9 %
Géothermie, Biomasse, etc. ^{b 12}	315 TWh	626 TWh	+99 %	142	1,0 %
Biocarburants ^{b 13}	924 kbblep/j ^{n 2}	1 788 kbblep/j	+94 %	95	0,7 %
Total énergie primaire^{b 14}	11 705 Mtep	13 865 Mtep	+18,5 %	13 865	100,0 %

5) RENTABILITE

Les projets d'énergie renouvelable sont plus rentables que les projets de charbon existants. C'est ce qu'affirme le rapport Renewable Energy Production Costs in 2020 publié par l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA).

Selon le document, le coût de mise en place des énergies renouvelables diminue considérablement d'année en année. Il montre que par rapport à l'année précédente, le coût de l'énergie solaire à concentration a baissé en 2020 de 16 %, l'énergie éolienne terrestre de 13 %, l'énergie éolienne en mer de 9 % et l'énergie solaire photovoltaïque de 7 %.

Les énergies renouvelables à faible coût constituent un argument important pour l'abandon du charbon dans la quête d'une économie neutre en émission carbone. Les projets d'énergie renouvelable ajoutés en 2020 réduiront les coûts du secteur de l'électricité d'au moins 6 milliards \$ par an dans les économies émergentes.

Les deux tiers de ces économies proviendront de l'éolien terrestre, de l'hydroélectricité et du solaire photovoltaïque. En outre, en l'espace de dix ans, le coût de l'électricité produite par le solaire photovoltaïque à l'échelle industrielle a baissé de 85 %, l'énergie solaire concentrée de 68 %, l'éolien terrestre de 56 % et l'éolien offshore de 48 %.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Sites consultés en avril 2020

https://fr.wikipedia.org/wiki/Ressources_et_consommation_%C3%A9nerg%C3%A9tiques_mondiales
https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/lenergie_sous_toutes_ses_formes_-_definitions.pdf
<https://quelfutur.org/Un-monde-100-energies-renouvelables>
<https://www.mediaterre.org/actu,20190625125916,1.html>
<https://www.mediaterre.org/actu,20200407161838,1.html>
<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/introduction.asp>
<https://quelfutur.org/Classification-des-energies>
<https://quelfutur.org/Un-monde-100-energies-renouvelables>
<https://quelfutur.org/+Croissance-des-energies-renouvelables+>
<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-energies-renouvelables>
<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/Fr/sommaire.asp#chapitre3>
<http://www.energies-renouvelables.org/>
<https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/produire-lelectricite/solaire-thermodynamique>
https://pm22100.net/01_PDF_THEMES/99_THEMES/02_NRJ/S_NRJ_02_WIKI_ressources_mondiales.pdf
<https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/les-differentes-formes-d-energie>

<https://www.agenceecofin.com/energies-renouvelables/2506-89509-le-renouvelable-de-plus-en-plus-rentable-par-rapport-au-fossile-selon-l-irena> site consulté en septembre 2021

Marek Wróbel, Marcin Jewiarz, Andrzej Szlęk, Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2018, Série: Springer Proceedings in Energy, Springer International Publishing, 2020.

Anthony N. Penna, The History of Energy Flows: From Human Labor to Renewable Power, Routledge, 2020.

Anne Labouret, Pascal Cumunel, Jean-Paul Braun, Benjamin Faraggi, Cellules solaires 5ème édition, Les bases de l'énergie photovoltaïque, Dunod 2010.

FZ ZERHOUNI M. ZEGRAR MH.ZERHOUNI, polycopié de cours M1 ESE, Energies renouvelables : le solaire PV, département d'ELN, USTOMB, 2020-2021.