

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
D'ORAN MOHAMED BOUDIAF



جامعة العلوم والتكنولوجيا بوهران محمد
بوضيف

FACULTÉ DE GÉNIE ELECTRIQUE

كلية الهندسة الكهربائية

DÉPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

قسم الإلكترونيك

Cours

Systèmes Energétiques Autonomes

2^{ème} année Master Electronique des systèmes
embarqués

Cours préparé par :

Mme MAZOUZ Nacéra

Maître de conférences A

2020-2021

Table des matières

Chapitre 1 : Dispositifs de production d'énergie électrique	9
1.1 Notions sur les transformations d'énergie	
1.2 les modes de production de l'énergie électrique	
1.3 Les sources d'énergies non renouvelables	
1.4 Les sources d'énergies renouvelables.	
Chapitre 2 : Energie éolienne	16
2.1 Historique	
2.2 Principe et structure	
2.3 Caractéristiques et dimensionnement	
2.4 Carte du gisement éolien en Algérie	
2.5 Parcs éoliens et puissance	
2.6 Normes	
2.7 Avantages et inconvénients	
2.8 Exemple d'une installation éolienne	
Chapitre 3 : Systèmes hybrides	29
3.1 Systèmes Hybrides	
3.2 Hydrolienne	
3.3 Principe de fonctionnement de l'hydrolienne	
3.4 Les différents types d'hydroliennes et les exploitants	
Chapitre 4 : Energie solaire photovoltaïque	36
4.1 Principe d'une installation photovoltaïque	
4.2 Le gisement solaire en Algérie	
4.3 Technologies des cellules photovoltaïques	
4.4 Les modules photovoltaïques	
4.5 MPPT	
4.6 Caractéristiques et connectique photovoltaïque	
4.7 L'onduleur	
4.7.1 Rôle	
4.7.2 Principe	
4.7.3 Caractéristiques et rendement	
4.8 Exemple d'une installation photovoltaïque	

Chapitre 5: Autres sources d'énergies renouvelables

62

5.1 Les familles d'énergie renouvelables

5.1.1 Énergie solaire

5.1.2 Énergie éolienne

5.1.3 Énergie hydraulique

5.1.4 Biomasse

5.1.5 Géothermie

5.2 Les différentes énergies renouvelables dans le monde

5.3 Rentabilité

Introduction Générale

Introduction générale

Le changement climatique est l'un des plus grands défis de notre temps. Il est, toutefois, tout aussi important d'assurer l'accès à l'énergie pour promouvoir la qualité de vie et le développement économique. Il est donc essentiel de traiter cette question dans le cadre du programme de développement durable. Les progrès actuels dans le développement de nouvelles technologies ont donné l'assurance et l'espoir que les objectifs seront atteints dans le domaine de l'énergie. Les réductions drastiques des coûts et les avancées technologiques des éoliennes et des systèmes photovoltaïques solaires ont montré que les ressources en énergies renouvelables peuvent jouer un rôle important dans les systèmes d'électricité mondiaux et que les percées longtemps attendues que connaissent les technologies de stockage devraient changer le bouquet énergétique de manière considérable. [2]

Ces développements ont conduit à la supposition que nous en « avons fini » avec les combustibles fossiles dans le système énergétique, qu'il n'était plus nécessaire de développer de nouvelles ressources et que nous devions arrêter de les utiliser le plus rapidement possible. Cette supposition a aussi donné l'impression qu'il y avait, d'un côté, les « bonnes » technologies, fondées sur les énergies renouvelables et, de l'autre, les « mauvaises » technologies, fondées sur les combustibles fossiles. En fait, ce débat est beaucoup plus nuancé et exige un examen approfondi. Les techniques de séquestration et de stockage du carbone (CCS) et la gestion des émissions de méthane tout au long de la chaîne de valeur des énergies fossiles peuvent permettre d'atteindre les objectifs ambitieux de réduction des émissions de CO₂ alors que les combustibles fossiles continuent de faire partie du système énergétique. Par ce biais, les combustibles fossiles feraient « partie de la solution » plutôt que « du problème ». Toutes les technologies ont un rôle à jouer dans un système énergétique guidé par la recherche d'économies. [2]

De nos jours, la production mondiale d'énergie est réalisée à 74 % à partir de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz), à 20 % par les énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, solaire, éolien) et à 6 % par le nucléaire. De nombreuses études sur l'appauvrissement des ressources fossiles convergent vers le résultat suivant : la quantité d'énergie fossile disponible diminuera à l'horizon 2010-2020 et sera épuisée avant la fin de ce siècle. Notre avenir énergétique doit se baser sur les énergies nucléaires et renouvelables.

La production nucléaire actuelle montre des performances de densité de puissance très importantes et des avantages environnementaux par rapport à l'émission de CO₂. Cependant, cette énergie présente de nombreux inconvénients : le retraitement difficile des déchets et des bâtiments, son impact sur l'environnement, les problèmes de sécurité et le fait que son combustible ne soit pas renouvelable (épuisement évalué à la fin du siècle pour l'uranium 235). Malgré des recherches très importantes menées afin de résoudre les problèmes des déchets et de développer de nouvelles générations de surgénérateurs dont la réserve en combustible est plus importante, le niveau moyen de sécurité ainsi que les conséquences humaines et écologiques d'un accident nucléaire restent les inconvénients majeurs de cette technologie. Bien qu'il soit difficilement concevable d'éliminer cette solution énergétique, il est préférable de la limiter à son plus bas niveau de nécessité. [1]

En d'autres termes, si la tendance actuelle se poursuit, si la part actuelle des combustibles fossiles reste inchangée et si la demande énergétique double d'ici à 2050, les émissions dépasseront de loin la quantité de carbone qui peut être émise si nous voulons limiter la hausse des températures moyennes à 2 °C. Ce niveau d'émissions aura des conséquences désastreuses sur le climat de la planète. Nous avons la possibilité de réduire les émissions dans le secteur énergétique, notamment en réduisant la consommation énergétique ainsi que l'intensité carbone nette du secteur énergétique en changeant de combustible et en contrôlant les émissions de CO₂. [2]

Réduire les émissions ne signifie pas exclure l'utilisation des combustibles fossiles, mais un changement significatif est impératif; continuer à faire comme si de rien n'était ne permettra pas de les réduire. L'efficacité énergétique et les énergies renouvelables sont souvent considérées comme les seules solutions nécessaires à la réalisation des objectifs climatiques dans le système énergétique, mais cela ne suffit pas. L'augmentation du recours aux techniques de CSS sera essentielle, ce qui devrait permettre une réduction annuelle de 16 % d'ici à 2050. Cette affirmation s'appuie sur le cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat qui estime que limiter les émissions du secteur énergétique sans les techniques de CSS augmenterait de 138 % les coûts relatifs à l'atténuation des effets liés au changement climatique. [2]

Les énergies renouvelables ne peuvent pas être uniformément utilisées dans le système énergétique pour remplacer l'utilisation des combustibles fossiles, en particulier en raison des différences dans la capacité des sous-secteurs énergétiques à passer des combustibles fossiles aux énergies renouvelables. Par exemple, dans certaines applications industrielles comme la production de ciment et d'acier, les émissions viennent à la fois de l'utilisation de l'énergie et des procédés de production. Les technologies alternatives susceptibles de remplacer les techniques de production actuelles n'étant pas encore disponibles à l'échelle voulue, ces technologies devraient continuer à être utilisées à court et à moyen termes. Dans certains cas, les techniques de CSS peuvent apporter une solution compatible avec la demande actuelle et donner le temps nécessaire pour développer d'autres solutions. [2]

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des microturbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. [1]

Le développement des technologies hydrogène a été très important au cours des dix dernières années. Les progrès réalisés permettent d'envisager des performances élevées du « système de stockage par l'hydrogène », une unité de stockage de gaz et une pile à combustible. Or, les performances du système de stockage par l'hydrogène n'ont pas été réévaluées. De plus, l'utilisation journalière de ce stockage permettant d'augmenter la génération de chaleur n'a jamais été abordée. [1]

Le développement des réseaux énergétiques intelligents, assorti de règles d'exploitation communes, offre une excellente occasion de renforcer les liens entre les technologies, ce qui favorise la pénétration de technologies moins génératrices de carbone et d'un bon rendement économique. Que nous le souhaitions ou non, les combustibles fossiles feront partie du système énergétique pendant les décennies à venir. Ils continueront d'être à la base du développement social et économique dans le monde. [2]

Dans le premier chapitre nous déterminons tout les Dispositifs de production d'énergie électrique, les Notions sur les transformations d'énergie, ainsi Les sources d'énergies non renouvelables (fossiles et nucléaires). Les sources d'énergies renouvelables.

Dans le deuxième chapitre nous discuterons sur l'énergie éolienne, son 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.

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

Au quatrième chapitre nous entamerons les énergies solaires photovoltaïques, 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.

Et finalement au cinquième chapitre nous étudierons d'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..

Ce support de cours (polycopié) est destiné en premier lieu aux étudiants 2ème année MASTER filière **Electronique** spécialité Electronique des systèmes embarqués dont l'objectif est: 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.

Nous avons essayé de se basé à différents ouvrages de base tel qu'il est mentionné à la page de référence. Nous espérons que les étudiants trouveront les notions de base et le fondement de la matière d'électronique.

Chapitre 1: Dispositifs de production d'énergie électrique

- 1.1 Notions sur les transformations d'énergie
- 1.2 les modes de production de l'énergie électrique
- 1.3 Les sources d'énergies non renouvelables
- 1.4 Les sources d'énergies renouvelables.

1.1 Notions sur les transformations d'énergie [3]

Lorsque l'on veut utiliser de l'énergie, on ne peut pas le faire sous sa forme primaire
Cas particuliers : séchage et chauffage au soleil. Il faut la transformer, La transformation nécessite l'utilisation de procédés et technologies plus ou moins sophistiqués

Une simple allumette pour brûler du bois
Une centrale thermique pour produire de l'électricité
Un moteur pour produire de l'énergie mécanique ...

1.1 Les formes d'utilisation finale de l'énergie [3]

Les formes d'utilisation finale de l'énergie sont :

L'Energie Thermique

Plus la température à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie de transformation sont complexes et le prix élevé.

Basse température (30 à 120°C) : Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines à absorption, ...

Moyenne température (100 à 500°C) : Séchage, cuisson, stérilisation, distillation, ...

Haute température (500 à 1800°C) : Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques,

L'Energie Lumineuse

Elle est obtenue à partir de la chaleur. Plus le niveau d'éclairage n'est élevé, plus le procédé et la technologie sont complexes et coûteux.

L'Energie Mécanique

Dans les transports, plus la vitesse à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie sont complexes et chers, et plus la consommation d'énergie n'est élevée. Les moteurs thermiques (automobiles, motoboyelles, motos, cars, bus, trains, avions, bateaux, tracteurs, Machines à vapeur, moteurs à combustion interne (diesel, à explosion), turbines, ...

Les moteurs électriques (voitures, tramways, trains, électroménagers, automatisme, industrie, ...)

L'Energie Informationnelle

Elle est actuellement en pleine expansion.

Elle est obtenue généralement à partir de l'électricité grâce à différentes technologies :

Télévision, Fax, Téléphone et télécommunications, Informatique.

1.2 Classification de l'énergie

Les sources d'énergie sont essentiellement d'origine fossile (pétrole, gaz, charbon, ...). L'énergie chimique bloquée peut être libérée par réaction d'oxydation (combustion). L'énergie propre disponible (thermique, électrique, cinétique) est négligeable.



Figure1.1 : classification de l'énergie

Les énergies de transformation

Les trois énergies de base sont

- Thermique
- Electrique
- Mécanique

Les énergies issues de transformation (Energie solaire, Energie des vents, Energie géothermique), par opposition aux énergies naturelles (nouvelles ou renouvelables), sont créées par une ou plusieurs transformations, à partir d'une source d'énergie naturelle. (ref 3)

1.2 Les modes de production de l'énergie électrique [3]

Les conversions d'énergie peuvent se succéder avec accumulation de pertes énergétiques.

L'exemple le plus significatif et le plus classique se rapporte à la production d'énergie électrique de forte puissance (centrales thermiques ou nucléaires).

Le cycle thermodynamique comprend les éléments suivants :

- Chaudière (énergie thermique)
- Turbine (énergie mécanique)
- Condenseur

La turbine entraîne un alternateur produisant de l'énergie électrique qui, après distribution, peut être utilisée pour produire de l'énergie mécanique (ventilateur) ou thermique (chauffage).

La chaîne énergétique se schématise de la façon suivante figure (1.2, 1.3):

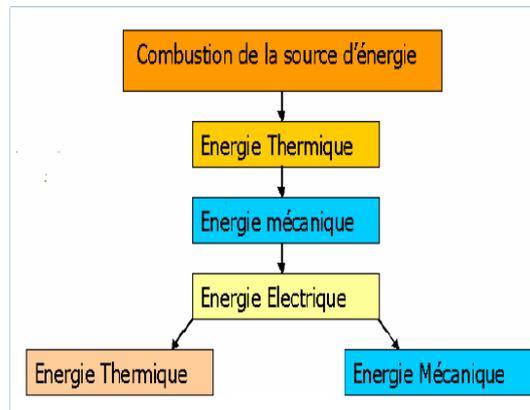


Figure1.2 : la chaine d'énergie

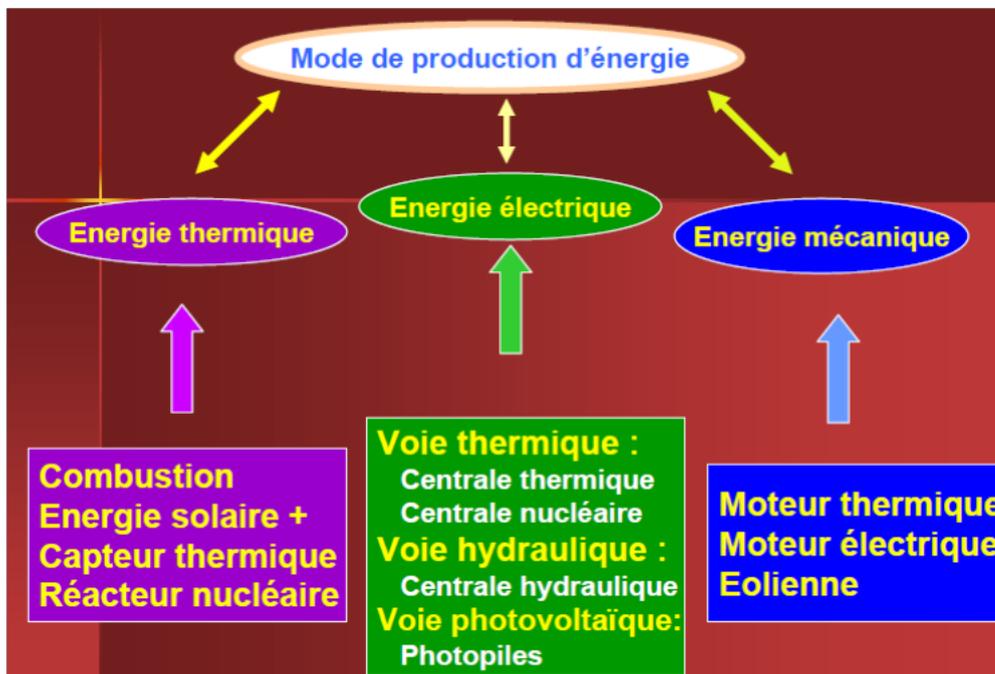


Figure1.3 : Mode de production d'énergie

1.3 Les sources d'énergies non renouvelables

1. Combustibles fossiles

Les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) sont la matière première de l'industrie chimique et la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% de l'énergie utilisée, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire...). Les besoins mondiaux en énergie ont augmenté de façon considérable au cours du vingtième siècle et le développement des pays émergents comme la Chine permet de prévoir une augmentation encore plus rapide dans les prochaines décennies. L'Agence Internationale de l'Énergie prévoit que la demande des vingt-cinq prochaines années nécessitera une production égale à celle des cent cinquante années d'exploitation

des combustibles fossiles. Mais les ressources ne sont pas inépuisables : ces produits sont formés par une succession de mécanismes biologiques et géologiques qui mettent des millions d'années à s'accomplir, ces ressources ne sont donc pas renouvelables à une échelle de temps humaine. [2]

Avantages [3]

- Utilisation pratique
- Rapidité de dégagement d'énergie
- Grande disponibilité
- Technologie de stockage maîtrisée
- Diversification des applications

Inconvénients [3]

- Réserves limitées
- Pollution atmosphérique :
- CO₂ et CH₄ : effet de serre
- Imbrûlés HC, CO, CH₄ génèrent l'ozone à la surface de la terre et créent des problèmes respiratoires.
- Le soufre contenu dans le combustible est responsable de la corrosion des installations thermiques et des pluies acides.

Les additifs de l'essence à base de plomb ont des conséquences néfastes sur le système nerveux.

2. Combustibles nucléaires [5]

Le **combustible nucléaire** est le produit qui, contenant des matières fissiles (uranium, plutonium...), fournit l'énergie dans le cœur d'un réacteur nucléaire en entretenant la réaction nucléaire en chaîne de fission nucléaire.

Les termes **combustible** et **combustion** sont totalement inappropriés pour caractériser tant le produit que son action. En effet, la combustion est une réaction chimique d'oxydo-réduction (échange d'électrons) tandis que la « combustion » des matières radioactives provient de réactions nucléaires (fission de noyaux atomiques). Ces termes sont utilisés par analogie à la chaleur dégagée par une matière en feu.

Les matières fissiles sont utilisées pour la propulsion nucléaire de navires militaires (en particulier les porte-avions) et de sous-marins nucléaires, ainsi que comme combustible dans les centrales nucléaires : un réacteur à eau pressurisée de 1 300 MWe comporte environ 100 tonnes de combustible renouvelé périodiquement, par partie.

Le combustible UOX (Uranium Oxyde) est constitué par des pastilles de dioxyde d'uranium (UO₂). Ces pastilles sont empilées dans des tubes en alliage de zirconium. Ces tubes d'environ 4 mètres de longueur sont aussi appelés gaines. L'ensemble pastilles gaine constitue un crayon. Les crayons sont bouchés aux deux extrémités et sont pressurisés avec de l'hélium.

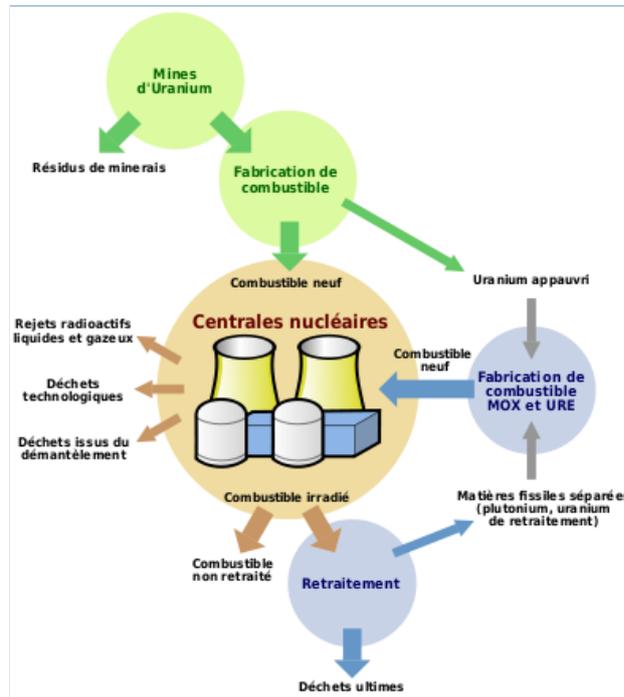


Figure1.4 : Combustibles nucléaires

Avantages [3]

- Décentralisation : les centrales nucléaires peuvent être installées là où on veut, indépendamment des gisements ou autres.
- Bon rendement : l'Uranium naturel produit une énergie de 116 000 kWh/kg

Inconvénients [3]

- Exigent la disponibilité et la maîtrise des technologies de pointe
- Les problèmes des déchets nucléaires ne sont pas encore réglés sérieusement (contamination dangereuse pour l'homme).
- Leur utilisation reste limitée, des progrès restent à faire.
- L'uranium utilisé dans les réactions de fission nucléaire est épuisable.
- Aspect redoutable de l'arme nucléaire.

1.4 Les sources d'énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la Lune (marées) et la chaleur générée par la Terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle. [4]

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont

plus correctes d'un point de vue physique. [4]

La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 %. [4]

Avantages [3]

- A l'échelle temporelle de l'être humain, le soleil, la géothermie et les vents sont des sources d'énergie inépuisables
- Les énergies nouvelles sont propres et bien réparties sur tout le globe.

Inconvénients [3]

- Leur utilisation reste encore limitée, des progrès restent à réaliser.

Afin de préserver les ressources d'énergie d'origine fossile et réduire les émissions de polluants, on doit Rationaliser l'utilisation de ces combustibles par :

- Le Contrôle et l'optimisation des installations de combustion
- La Réalisation des combustions les plus complètes possibles.
- La Diminution des consommations

Du point de vue énergétique, les énergies renouvelables par exemple doivent nous permettre de satisfaire largement nos exigences et offrir le niveau de confort des pays les plus avancés à l'ensemble de la population mondiale.

Deux conditions à satisfaire :

- Optimisation de la consommation (minimisation du gaspillage et amélioration des rendements de conversion)
- Production " propre " de l'énergie.

Caractérisation de l'énergie [3]

Deux éléments quantitatifs permettent d'effectuer des choix énergétiques :

- Le rendement théorique de production d'énergie,
- Les coûts réels de production.

Rendement théorique de production d'énergie [3]

Quel que soit le processus de production de l'énergie, le rendement théorique s'exprime par le rapport :

$$R = \frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie utilisée}} \quad (1.1)$$

Les coûts réels de production [3]

Les coûts réels de l'énergie avant sa distribution doivent tenir compte de 3

paramètres :

- le coût du combustible (nul pour une installation solaire ou hydraulique)
- l'amortissement de l'installation génératrice d'énergie.
- les frais de fonctionnement et d'entretien.

Remarque : On peut toujours définir le coût partiel qui tient compte du rendement théorique et du coût du combustible.

Le coût réel de l'énergie au niveau de l'utilisation fait intervenir non seulement le coût réel de production défini précédemment, mais aussi le coût de la distribution qui dépend de l'état du réseau et du coût de l'utilisation qui dépend de l'état des appareils utilisant l'énergie.

Conclusion [3]

Dans beaucoup de processus industriels de production ou de récupération de l'énergie, on est amené à considérer des transferts de chaleur.

La façon la plus usuelle de produire de l'énergie chaleur est la combustion, d'où l'importance que revêt, non seulement l'étude des transferts de chaleur, mais aussi la description des phénomènes de combustion et le traitement des problèmes des échangeurs thermiques.

Chapitre 2 : Energie éolienne

- 2.1 Historique
- 2.2 Principe et structure
- 2.3 Caractéristiques et dimensionnement
- 2.4 Carte du gisement éolien en Algérie
- 2.5 Parcs éoliens et puissance
- 2.6 Normes
- 2.7 Avantages et inconvénients
- 2.8 Exemple d'une installation éolienne

2.1 Historique [6]

Jusqu'au XIX siècle, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique.

La plus ancienne utilisation de l'énergie éolienne est la marine à voile : des indices permettent de penser qu'elle aurait été employée en mer Égée dès le XI millénaire av. J.-C. (voir Navigation dans l'Antiquité). Le peuplement de l'Océanie s'est vraisemblablement fait par des déplacements à la voile, pour les longues traversées de centaines ou milliers de kilomètres en pleine mer.

Vers 1600, l'Europe dispose de 600 000 à 700 000 tonneaux de navires marchands ; selon une statistique française plus précise vers 1786-87, la flotte européenne atteignait 3,4 millions de tonneaux ; son volume aurait donc quintuplé en deux siècles. La puissance éolienne dépensée dans la propulsion de ces navires peut être estimée entre 150 000 et 230 000 HP , sans tenir compte des flottes de guerre.

L'autre utilisation principale de cette énergie était le moulin à vent utilisé par le meunier pour transformer les céréales en farine ou pour écraser les olives afin d'en extraire l'huile ; on peut aussi citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande. Le moulin à vent est apparu sur le territoire de l'Afghanistan d'aujourd'hui ; il était utilisé en Perse pour l'irrigation dès l'an 600. Selon l'historien Fernand Braudel, « Le moulin à vent apparaît bien plus tard que la roue hydraulique. Hier, on le croyait originaire de Chine ; plus vraisemblablement, il est venu des hauts pays d'Iran ou du Tibet. En Iran, des moulins tournent probablement dès le VII siècle apr. J.-C., sûrement au IX siècle », animés par des voiles verticales dressées sur une roue qui, elle, se meut à l'horizontale (...) Les musulmans auraient propagé ces moulins vers la Chine et la Méditerranée. Tarragone, à la limite Nord de l'Espagne musulmane, posséderait des moulins à vent dès le X siècle

Fernand Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du XI au XIII siècle, des moulins eau et à vent : « ces « moteurs primaires » sont sans doute de modique puissance, de 2 à 5 HP pour une roue à eau, parfois 5, au plus 10 pour les ailes d'un moulin à vent. Mais, dans une économie mal fournie en énergie, ils représentent un surcroît de puissance considérable. Plus ancien, le moulin à eau a une importance bien supérieure à celle de l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais de l'eau, en gros moins capricieuse. Il est plus largement diffusé, en raison de son ancienneté, de la multiplicité des fleuves et rivières... ». « La grande aventure en Occident, à la différence de ce qu'il advint en Chine où le moulin va tourner, des siècles durant, à l'horizontale, c'est la transformation de l'éolienne en une roue redressée dans le plan vertical, à l'image de ce qui s'est passé pour les moulins à eau. Les ingénieurs disent que la modification a été géniale, la puissance fortement augmentée. C'est ce moulin nouveau modèle qui se propage en Chrétienté. Les statuts d'Arles enregistrent sa présence au XII siècle. À la même époque, il est en Angleterre et dans les Flandres. Au XIII siècle, la France entière l'a accueilli. Au XIV siècle, il est en Pologne et déjà en Moscovie, car déjà l'Allemagne le leur a transmis ».

Le moulin à vent, plus coûteux d'entretien que le moulin à eau, est plus onéreux à travail égal, notamment pour la meunerie. Mais il a d'autres emplois : le rôle majeur des *Wipmolen* aux Pays-Bas, dès le XV siècle et plus encore après 1600, est d'actionner des chaînes à godets qui retirent l'eau du sol et la rejettent dans des canaux. Ils seront ainsi l'un des outils de la reconquête patiente des sols des Pays-Bas. L'autre raison pour que la Hollande soit la patrie des moulins à vent est sa situation au centre de la grande nappe des vents permanents d'ouest, de l'Atlantique à la Baltique.

À la fin du XVIII siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était assurée par des énergies renouvelables et l'énergie éolienne avait une part importante dans le bilan énergétique, assurant l'essentiel des besoins des transports internationaux (marine à voile) et une partie des transports intérieurs (cabotage et navigation fluviale) ainsi que des besoins de l'industrie alimentaire (moulins à vent). Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à un peu plus de 1 % la part de la voile, contre plus de 50 % pour la traction animale, environ 25 % pour le bois et 10 à 15 % pour les moulins à eau ; il renonce à chiffrer la part des moulins à vent, faute de données, tout en précisant : « les éoliennes, moins nombreuses que les roues hydrauliques, ne peuvent représenter que le quart ou le tiers de la puissance des eaux disciplinées ». On peut donc évaluer la part totale de l'énergie éolienne (voile + moulins à vent) entre 3 et 5 %.

L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin de l'énergie éolienne au XIX siècle ; les moulins à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. Au milieu du XX siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders).

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi également à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique (maisons, fermes, phares, navires en mer, etc.). Des installations sans stockage de l'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. La maîtrise du stockage de l'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser hors présence du vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW² et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Les subventions accordées par des gouvernements ont permis leur développement dans un grand nombre de pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale électrique thermique. Cependant, les puissances produites, les coûts de production et les impacts sur l'environnement sont très différents.

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie

mécanique en énergie électrique est très importante.

Éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

2.2 Principe et structure

Une centrale éolienne ou un aérogénérateur produit de l'électricité grâce à la force du vent.

En haut du il y a les pales qui peut mesurer jusqu'à 120m Sont appelés aussi rotor se met a tourné sous l'effet d'un vent moins de Km/h

Le système de pale va tourné au Toure d'une moyeu, le moyeu d'un axe qui est Rentrer dans la nacelle , qui est porté su mat et ce mat est fixé à des fondations Permettent de l'éolienne a tenir debout.

La nacelle c'est l'élément principale de l'éolienne ,qui s'oriente automatiquement Face du vent grâce à des capteurs pour capté maximum de vent , quand Le système des pales fait tourné l'axé (moyeu) cette vitesse n'est pas suffisante pour Produire de l' électricité un multiplicateur qui augment cette vitesse a 1500 tr/min Et la transmet a un second axe de la génératrice , l' interactions entre électro aimant du rotor et la bobine de fils de cuivre du stator produire Un courant électrique , qu'ont va le distribuer après sur le réseau .

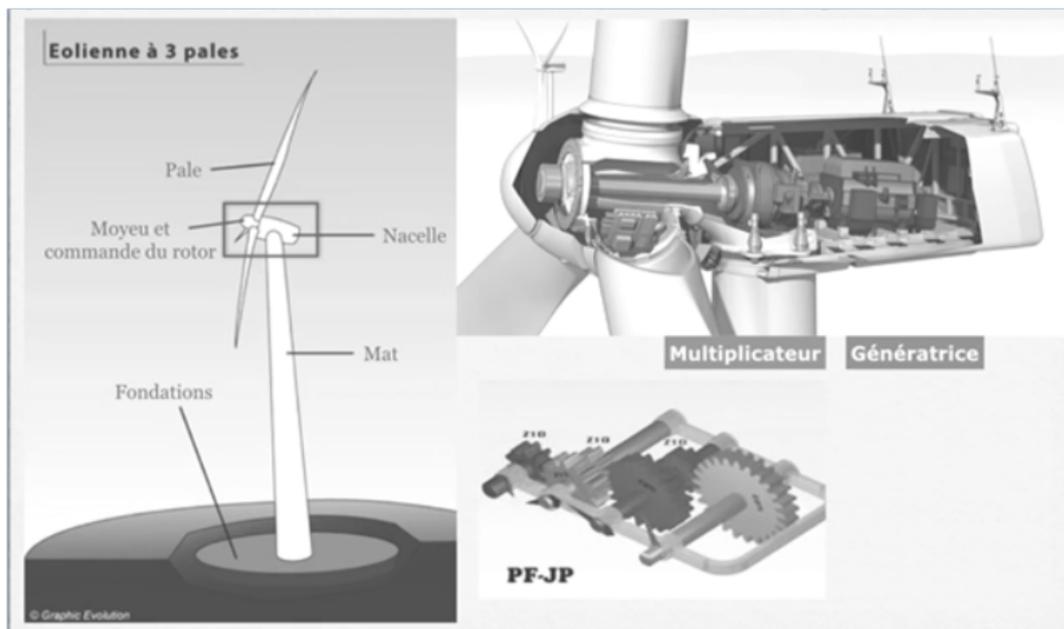


Figure 2.1 : Description d'une éolienne

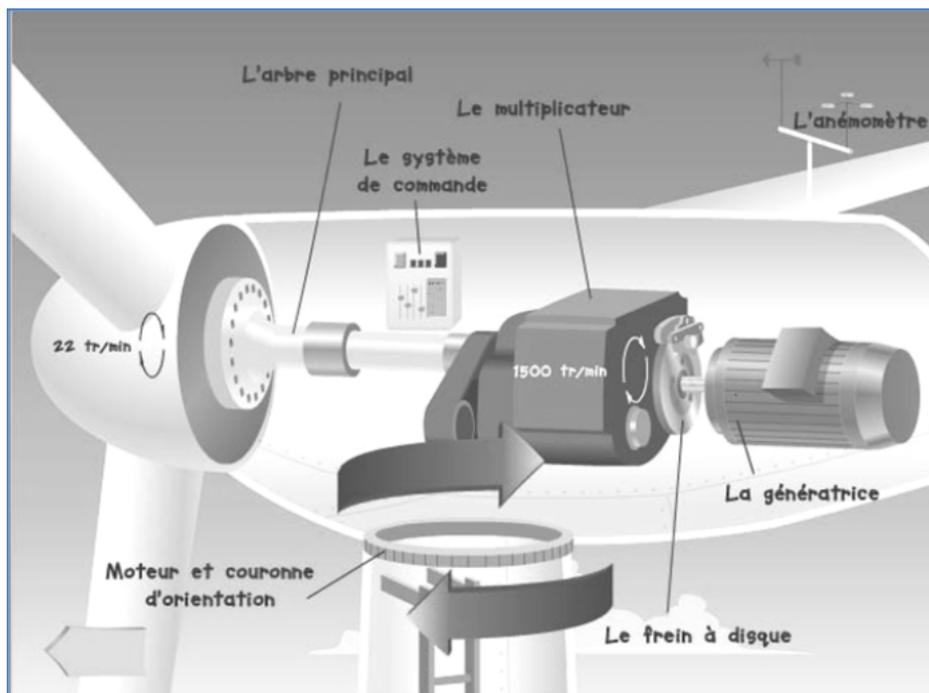


Figure 2.2 : Principe de fonctionnement d'une éolienne

2.3 Caractéristiques et dimensionnement

Le rendement énergétique et la puissance développée des éoliennes sont fonction de la vitesse du vent. Pour les éoliennes tri-pales, en début de plage de fonctionnement (de 3 à 10 m/s), la puissance est approximativement proportionnelle au cube de cette vitesse, jusqu'à un plafond de vitesse de 10 à 25 m/s lié à la capacité du générateur. Les éoliennes tri-pales fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 11 et 90 km/h (3 à 25 m/s). Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure. Les éoliennes actuellement commercialisées sont conçues pour fonctionner dans la plage de 11 à 90 km/h (3 à 25 m/s), que ce soit celles d'Enercon, celles d'Areva pour l'éolien en mer, ou celles d'Alstom, pour les éoliennes terrestres⁵ comme en mer. [6]

Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, l'utilisation massive d'éolien nécessite soit une source d'énergie d'appoint pour les périodes moins ventées, soit des moyens de stockage de l'énergie produite (batteries, stockage hydraulique ou plus récemment, hydrogène, méthanation ou air comprimé). [6]

Les différents types d'éoliennes

En tout, il y a 11 types d'éoliennes, on vous en présente 6 d'entre elles:

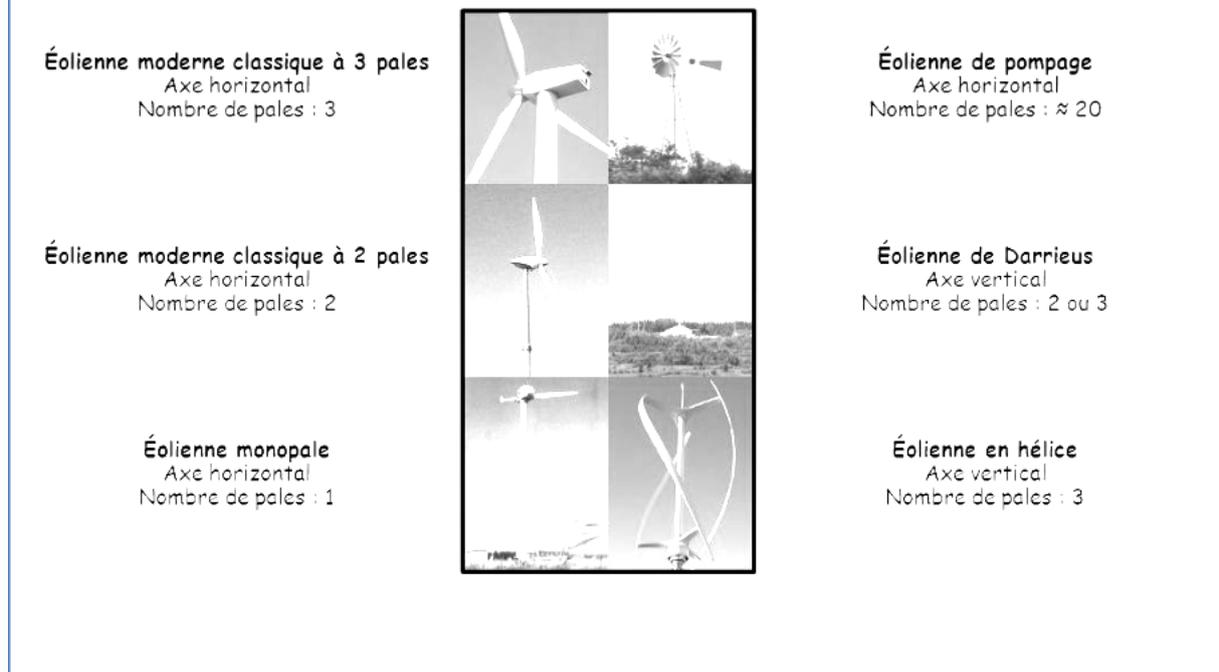


Figure 2.3 : Les types d'éoliennes

La technologie actuellement la plus utilisée pour capter l'énergie éolienne utilise une hélice sur un axe horizontal. Certains prototypes utilisent un axe de rotation vertical : une nouvelle technologie à axe vertical est celle du *Kite wind generator* (inspirée du kitesurf) qui, pour capter un vent le plus fort possible, utilise des câbles et des ailes qui peuvent arriver à 800/1 000 m de hauteur. (ref 6)

La technologie à axe horizontal présente certains inconvénients :

- l'encombrement spatial est important, il correspond à une sphère d'un diamètre égal à celui de l'hélice, reposant sur un cylindre de même diamètre. Un mât de hauteur importante est nécessaire pour capter un vent le plus fort possible ;
- le vent doit être le plus régulier possible, et donc interdit des implantations en milieu urbain ou dans un relief très accidenté ;
- la vitesse de l'extrémité d'une pale croît rapidement avec sa taille, au risque de causer défauts de fonctionnement et bruits pour le voisinage. Dans la pratique, les pales des grandes éoliennes ne dépassent jamais une vitesse de l'ordre de 100 m/s à leur extrémité. En fait, plus l'éolienne est grande, et moins le rotor tourne vite (moins de 10 tours par minute pour les grandes éoliennes en mer).

Les nouvelles éoliennes en cours de développement visent à aboutir à une technologie qui s'affranchit du bruit, de l'encombrement et de la fragilité des éoliennes à pales, tout en étant capables d'utiliser le vent quelle que soit sa direction et sa force. De nombreuses variantes sont étudiées par des essais réels en grandeur nature. Certaines éoliennes sont de petite taille (3 à 8 m de large, 1 à 2 m de haut), avec pour objectif de pouvoir les installer sur les toitures terrasses des immeubles d'habitation dans les villes, ou sur les toitures des immeubles industriels et commerciaux, dans des gammes de puissances allant de quelques kilowatts à quelques dizaines de kilowatts de puissance moyenne. Leur vitesse de rotation est faible et indépendante de la vitesse du vent. Leur puissance varie avec le cube de la vitesse du vent (la vitesse du vent élevée à la puissance 3) : quand la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8. La vitesse du vent peut varier de 5 km/h à plus de 200 km/h sans nécessiter la « mise en drapeau » des pales. [6]

2.4 Carte du gisement éolien en Afrique [6]

La puissance éolienne installée en Afrique a progressé de 16,5 % en 2019, passant de 5 728 MW fin 2018 à 6 673 MW fin 2019, dont 2 085 MW en Afrique du Sud et 1 452 MW en Égypte. Les ajouts de 2019 ont été de 944 MW, dont 262 MW en Égypte.

La puissance éolienne installée en Afrique a progressé de 20 % en 2018, passant de 4 758 MW fin 2017 à 5 720 MW fin 2018, dont 2 085 MW en Afrique du Sud et 1 190 MW en Égypte. Les ajouts de 2018 ont été de 962 MW, dont 380 MW en Égypte et 310 MW au Kenya.

Elle a progressé de 16 % en 2017 (12 % en 2016, 30 % en 2015, 58 % en 2014), passant de 1 612 MW fin 2013 à 2 536 MW fin 2014, 3 488 MW fin 2015, 3 917 MW fin 2016 et 4 538 MW fin 2017 ; plus de la moitié du bond en avant de 934 MW en 2014 s'est produit en Afrique du Sud : +560 MW et près d'un tiers au Maroc : +300 MW ; en 2015, l'Afrique du Sud a contribué pour 64 % à la progression du parc africain avec +483 MW, suivie par l'Éthiopie : +153 MW ; en 2016, la totalité des mises en service ont été effectuées en Afrique du Sud : +418 MW ; de même en 2017 : +621 MW.

L'Afrique du Sud se place au 1^{er} rang avec 2 085 MW installés fin 2018, soit 36 % du total africain, contre 1 473 MW fin 2016, 1 053 MW fin 2015, 570 MW fin 2014 et 10 MW fin 2013⁹⁵ ; après avoir mis une décennie pour installer ces premiers 10 MW d'éoliennes, elle était en 2013 en train de développer 3 000 MW à 5 000 MW de projets éoliens, dont 636 MW en construction et 562 MW proches de leur bouclage financier ; le plan directeur énergétique (*Power Sector Integrated Resource Plan 2010-2030*) prévoit 9 000 MW éoliens d'ici 2030.

Le projet le plus avancé est le parc éolien de Sere, construit par la compagnie électrique nationale Eskom sur la côte ouest à 300 km au nord de la ville du Cap ; sa puissance de 106 MW (46 turbines Siemens de 2,3 MW) lui permettra de produire 240 à 300 GWh/an (facteur de charge : 26 à 32 %).

Production de l'énergie en Afrique [8]

On remarque que l'énergie éolienne qui depuis 2010 est devenue la deuxième source d'énergie renouvelable après le solaire.

Tableau 2.1 : Production de l'énergie en Afrique

Source	1990	%	2000	%	2010	%	2011	2012	2013	2014	% 2014	var. 2014/1990
Charbon	100,2	87,5	126,9	87,2	143,9	87,8	142,7	146,0	145,0	147,5	87,6	+47 %
Pétrole	0		0,9	0,6	0,5	0,3	0,5	0,3	0,2	0,2	0,14	ns
Gaz naturel	1,5	1,3	1,4	1,0	1,3	0,8	1,1	0,96	1,02	0,87	0,5	-42 %
Total fossiles	101,7	88,8	129,3	88,8	145,7	88,9	144,3	147,2	146,3		88,3	+44 %
Nucléaire	2,2	1,9	3,4	2,3	3,2	1,9	3,5	3,1	3,7	3,6	2,1	+63 %
Hydraulique	0,09	0,08	0,1	0,07	0,18	0,11	0,18	0,10	0,10	0,08	0,05	-3 %
Biomasse-déchets	10,6	9,2	12,9	8,8	14,9	9,1	15,1	15,3	15,6	15,8	9,4	+49 %
Solaire, éolien, géoth.	0		0		0,07	0,04	0,07	0,08	0,11	0,29	0,17	ns
Total EnR	10,7	9,3	13,0	8,9	15,1	9,2	15,3	15,5	15,8	16,2	9,6	+52 %
Total	114,5	100	145,6	100	164,0	100	163,2	165,8	165,72	168,3	100	+47 %

Taux de croissance : [8]

On remarque que la croissance de la filière l'éolienne est également très important (+26,1% en moyen par an).

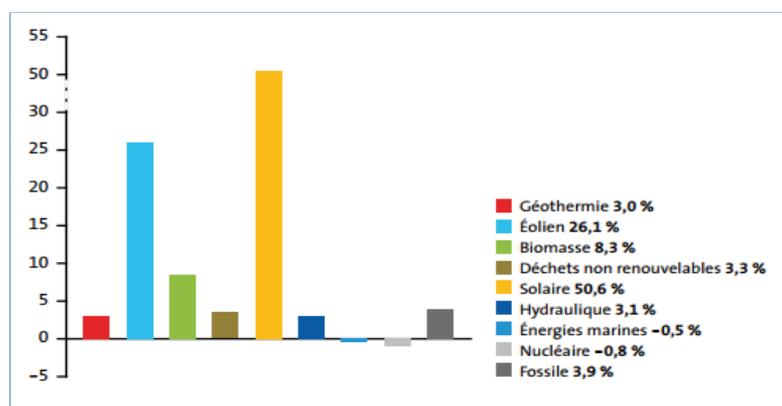


Figure 2.4 : Taux de croissance.

Carte du gisement éolien en Algérie [8]

L'Algérie affiche de grandes ambitions pour les énergies renouvelables. Outre l'installation de plusieurs fermes éoliennes dans les Hauts Plateaux et le Sud, des projets de parcs éoliens parmi ses parcs :

L'Algérie vient d'inaugurer, le 3 juillet 2014, son premier parc éolien, situé à Kabertene dans le centre du pays, au nord de la ville d'Adrar. Doté de douze éoliennes, fournies par le groupe espagnol, il dispose d'une capacité de 10 MW. Financement total : 280 milliards.

21 zones offrant une vitesse adéquate pour l'implantation des fermes éoliennes ont été répertoriées en prévision de l'implantation des futures fermes qui devrait s'effectuer en 2017.

2.5 Parcs éoliens et puissance [7]

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 empreinte 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).

Un parc éolien de 12 MW, composé de quatre à six éoliennes, avec un facteur de charge de 23% (soit une production moyenne de 24 000 MWh/an), peut couvrir les besoins en consommation d'électricité de près de 12 000 personnes (consommation moyenne de 2 000 kWh/an par personne), chauffage inclus.

Le plus grand parc éolien offshore du monde est le London Array, composé de **173 turbines** permettant une capacité de **630 MW**.

Plus grand parc éolien onshore mondial construit est le parc éolien de Roscoe au Etats-Unis (Texas), il est composé de **627 éoliennes** (781,5 MW) et s'étend sur plus de 400km². Exploitant : E.ON Climat et Energies renouvelables.

Il existe deux parcs:

- Les parcs Terrestres (fermes éoliennes).
- Les parcs implémentés en mer. a plusieurs large du quotte (Les installations en mer sont intéressantes car elles profitent de vents forts et réguliers.)

- On peut également installer des modèles plus petits dans les jardins [8]

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés..), terrain approprié, etc. [8]

Un bon site éolien doit présenter les qualités suivantes :

- site venté
- peu de turbulences
- une bonne facilité d'accès
- proche du réseau électrique [7]

Plage de puissance : [8]

Ces plages de puissances sont déterminées en partie par la forme et le nombre de pales :

- Pour produire de l'énergie le vent doit avoir une vitesse minimum (souvent 3 m/s, soit 10 km/h) ;
- Par sécurité si le vent est trop fort l'éolienne est déconnectée (souvent à partir de 90 km/h) ;

Les éoliennes ont différentes formes et nombres de pales. Celles-ci ont donc une portance et une traînée différentes ce qui explique qu'elles aient des plages de fonctionnement optimum différents.

Ainsi par exemple : Les rotors verticaux démarrent et s'arrêtent très vite, de même que les éoliennes aux nombreuses pales (utilisées souvent en éoliennes de pompage).

2.6 Normes [9]

Il existe plusieurs certifications portant sur l'énergie éolienne en Europe, d'origine danoise, hollandaise et allemande. Ceci est dû à l'antériorité de leur marché éolien. En France, il n'existe pas de certification propre à l'éolien (ISO, AFNOR ...). Cependant, il existe **la norme EN 50 308** : "Aérogénérateur, Mesures de Protection Exigences pour la Conception, le Fonctionnement et la Maintenance".

Cette norme a été prescrite par le **Comité Européen de Normalisation Electrotechnique** (CENELEC) sur mandat de la Commission Européenne après avis du Comité "Normes et règles techniques" en tant que norme "harmonisée" au titre de la directive "machines" qui s'apparente à la **norme internationale CEI 61 400-1**. 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 : principes généraux), qui deviennent ainsi indirectement "harmonisées".

2.7 Avantages et inconvénients [9]

Les avantages sont nombreux. L'énergie éolienne est une énergie propre, renouvelable, qui ne produit aucun déchet et ne pollue pas. On peut obtenir une production d'énergie régulière et continue si le parc éolien est situé dans un lieu adéquat et suffisamment exposé aux vents.

La durée de vie des éoliennes est d'environ 25 ans mais, à la différence des centrales géothermiques, elles se démontent et sont recyclées plus facilement.

Autre **avantage de l'énergie éolienne** : la matière première (le vent) est gratuite. Néanmoins, il y a aussi des inconvénients non négligeables qu'il convient de citer : le coût des pales étant élevé, une longue période est donc nécessaire pour assurer le retour sur l'investissement.

Notons aussi que la présence des éoliennes sur les zones côtières (généralement les plus exposées au vent) entraîne un impact peu esthétique sur le paysage et que le bruit qu'elles produisent peut se révéler gênant. Ces **inconvénients** peuvent néanmoins être minimisés en installant les éoliennes à quelques km de la côte, comme cela a été fait au Danemark, de manière à supprimer la gêne visuelle et acoustique.

2.8 Exemple d'une installation éolienne : Éolienne domestique [9]

L'installation d'une éolienne vous assure des revenus (jusqu'à 1.000 € /an) pendant 15 ans grâce à l'électricité produite. Cependant, les panneaux solaires photovoltaïques s'inscrivent comme une solution beaucoup plus rentable. Ils permettent, en effet, de générer de meilleurs revenus (jusqu'à 1.800 € /an) pendant 20 ans et ce pour un investissement 3 fois moins important.

Quelle Energie a fait le choix de ne pas proposer l'éolienne domestique comme solution d'économies d'énergie. Effectivement, pour l'instant, **il ne s'agit pas d'un système suffisamment rentable.** Le prix de l'installation est encore trop élevé pour être amorti par les revenus générés via la revente de l'électricité produite.

Une éolienne verticale ou horizontale ?

Il existe actuellement deux types d'éoliennes : **horizontale et verticale.** L'éolienne horizontale est la plus connue : elle permet de **meilleurs rendements** mais elle est également la **plus chère.** L'éolienne verticale est, quant à elle, **plus abordable.** Elle se fixe sur le toit de votre maison et a, par ailleurs, l'avantage de **fonctionner même avec des vents faibles.**

Une rentabilité incertaine

L'éolienne est une solution efficace pour produire proprement de l'électricité. Cependant, il ne s'agit pas d'un mode de production rentable pour les particuliers. En

effet, le **prix d'une éolienne domestique est encore beaucoup trop élevé**. Comptez entre **10.000 et 90.000 €**, installation comprise. Les variations de prix dépendent très largement de la puissance utilisée. A titre d'exemple, une installation d'une puissance de 5 kW représente en moyenne un investissement de 30.000 € contre 50.000 € pour une installation de 10 kW. Ce prix dépend aussi de la technologie employée par l'éolienne. Ainsi, les revenus générés par la revente de l'électricité produite, n'excédant pas 1.000 € par an, **ne permettent pas d'amortir l'investissement**.

Des solutions plus rentables

La faible rentabilité de l'éolienne domestique en fait une **solution peu intéressante**. Néanmoins, d'autres systèmes, produisant de l'électricité à partir d'énergies renouvelables, offrent une meilleure rentabilité. C'est le cas des **panneaux photovoltaïques** qui assurent des revenus conséquents (jusqu'à 1.800 € / an) pendant 20 ans. Cette installation, **3 fois moins chère**, est rapidement amortie en quelques années et garantit des revenus réguliers.

Pour compléter votre installation de production, optimisez votre consommation d'électricité à l'aide d'un système d'éclairage LED. Quelle Énergie vous recommande **l'ampoule LED** car elle consomme 6 fois moins qu'une ampoule classique. Elle est une solution performante d'éclairage rentable, économique, durable et écologique.

Installer une éolienne domestique sur le toit de votre maison

Pour installer un petit éolien, il n'est pas obligatoire d'habiter près d'une zone de développement de l'éolien terrestre. Il suffit de disposer d'un terrain exposé à des vents forts, réguliers et fréquents. Il est ensuite relié à un onduleur, lui-même relié au réseau. Notez, tout de même, qu'un **permis de construire et l'accord du voisinage** sont nécessaires à l'installation d'une éolienne domestique.

L'**éolienne domestique** est une **éolienne de petite taille** optimisée pour fournir de l'électricité à une seule habitation. Ce type d'éolienne affiche une puissance généralement comprise entre 100 W et 20 kW. Installée sur un mât de 10 à 35 mètres,

Pour installer une éolienne domestique, il n'est pas obligatoire d'habiter près d'une zone de développement de l'éolien terrestre. Il suffit de disposer d'un terrain exposé à des vents forts, réguliers et fréquents.

L'installation prend quelques jours

Avant l'installation, l'artisan devra choisir l'**endroit optimal** pour votre future éolienne et choisir un dimensionnement au plus près de vos besoins. Une fois cette étape réalisée, le professionnel pourra vous installer votre éolienne domestique. La pose correspond à la mise en place d'un **socle en béton** sur lequel l'éolienne est ancrée. L'éolienne est ensuite assemblée sur le sol et levée à l'aide d'un vérin hydraulique. Enfin, l'installateur pose l'**onduleur** et effectue le **raccordement au réseau**, avec un compteur pour mesurer la quantité d'électricité consommée ou revendue au réseau.

Conclusion [8]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, non polluante avec un grand potentiel de développement. En effet, les éoliennes ne rejettent aucun gaz ou substance dangereuse dans l'environnement et n'entraînent pas de production de déchets.

Chapitre 3 : Systemes hybrides

- 3.1 Systemes Hybrides
- 3.2 Hydrolienne
- 3.3 Principe de fonctionnement de l'hydrolienne
- 3.4 Les differents types d'hydroliennes et les exploitants

3.1 Systemes Hybrides [8]

Le fait de marier dans un même système deux sources d'énergie ou plus apporte de la stabilité, surtout si ces sources sont complémentaires.

Un bon système hybride profite des avantages combinés de ses deux formes d'énergie. Les énergies flux permettent de produire la plus grande part d'énergie, pour un prix très faible, tandis que les énergies stock sont utilisées à la demande, en appoint, pour répondre à un besoin exceptionnel en énergie ou pour faire face à un creux de production des énergies flux.

Historique

La récupération de l'énergie hydraulique sous sa forme gravitationnelle existe depuis longtemps. C'est le principe actionnant les machines ou les ouvrages tels que les moulins à eau, moulin à marée, les barrages hydrauliques ou les usines marémotrices. Par contre, la récupération de l'énergie cinétique des courants fluviaux ou marins reste rares avant le XXI^e.

Au début des années 2000, la nécessité de développer les énergies renouvelables met un coup de projecteur sur les énergies marines et en particulier sur l'énergie hydrolienne. À partir des années 2005-2010 la maturité technique du secteur permet le démarrage simultané d'études techniques et environnementales à travers le monde.

L'hydrolienne bénéficie alors d'énormes efforts techniques et financier à l'instar du développement de l'éolien quelques années plus tôt. À cette époque, on prévoit un déploiement rapide de la filière industrielle, en particulier pour le gros hydrolienne (machine de 1 MW et plus).

Le développement de nouveaux matériaux (composites, béton composite, alliage métallique, etc.) conforte l'idée que des solutions techniques pertinentes et adaptées au milieu marin pourraient s'imposer. Les années 2010 voient la réalisation de démonstrateurs et de prototypes testés un peu partout dans le monde. En parallèle, démarre le mini-hydrolienne plus adapté au fleuve et à la rivière, de maintenance plus aisée et donc de coûts d'investissements moindres.

Les difficultés techniques liées au milieu marin telles que la corrosion, les incrustations et la cherté des opérations de maintenance ou de réparation contribuent à un coût du MWh prohibitif par rapport à d'autres énergies renouvelables. Les contraintes réglementaires particulièrement lourdes freinent le développement d'un secteur qui a déjà du mal à démarrer et l'émergence d'une filière industrielle dans un avenir proche (2020-2025) pour le maxi-hydrolienne n'est pas acquise.

En juillet 2018, Naval Énergie annonce la fin de ses investissements dans l'hydrolienne et concentrera désormais ses activités sur l'éolien flottant et l'énergie thermique des mers. Cette filiale de Naval Group avait investi 250 millions d'euros dans l'hydrolienne depuis 2008 et venait juste d'inaugurer le 14 juin 2018 l'usine de Cherbourg dédiée à l'assemblage des turbines hydroliennes. Cette décision est justifiée par l'absence de perspectives commerciales et par un système de

subventions qui n'apporte pas d'aides directes aux constructeurs pendant les phases de développement. Le choix de la Grande-Bretagne de ne pas subventionner l'hydrolienne, ajouté à la sensibilité du Canada aux coûts de la technologie, a renforcé l'analyse d'un marché non rentable. Mise en liquidation judiciaire par un tribunal irlandais, OpenHydro ne devrait pas honorer les commandes de deux machines pour le Japon et le Canada.

Le principe de fonctionnement [8]

Dans la pratique, le système hybride électrique est centralisé autour des batteries qui sont le cœur du système. Toutes les sources d'énergies chargent les batteries indépendamment les unes des autres. Certains générateurs d'énergie produisent une tension continue, ou tension DC, qui recharge directement les batteries (bus DC). C'est le cas des panneaux solaires.

D'autres appareils produisent une tension alternative, ou tension AC, qui doit passer à travers le chargeur de l'onduleur/chargeur pour recharger les batteries (bus AC). C'est le cas par exemple du groupe électrogène, du réseau ou d'une turbine hydraulique.

Le démarrage du groupe électrogène peut être démarré automatiquement par un relai interne de l'onduleur/chargeur si les batteries sont trop basses, dans les périodes sans soleil ou sans vent par exemple.

Le Dimensionnement [8]

Dimensionner un système hybride est une tâche délicate qui demande une bonne connaissance des produits installés, des potentiels en énergies renouvelables du site et des besoins du client (flexibilité, sécurité, performance économique).

Exemple le régulateur solaire, le régulateur éolien et le chargeur de batteries doivent être paramétrés en atelier les uns par rapport aux autres pour que leur fonctionnement dans le système complet soit correct.

Un système hybride bien dimensionné est indéniablement le système de production d'énergie le plus fiable et économique en site isolé car il tire parti de tous les avantages des différents types d'énergie. Par exemple, la régularité de production des panneaux solaires se marie bien avec l'éolienne qui peut produire la nuit ou par temps nuageux.

3.2 Hydrolienne

Au Sénégal, malheureusement, le potentiel solaire comme le potentiel éolien sont plus faibles durant l'hivernage, il faut donc avoir recours à un générateur diesel ou essence pour palier au manque d'énergie à cette saison. Le reste de l'année, le solaire et l'éolien se complètent cependant très bien pour garder les batteries toujours chargées et le groupe électrogène éteint.

3.3 Principe de fonctionnement de l'hydrolienne [8]

Une hydrolienne est une turbine hydraulique (sous-marine ou à flots) qui utilise

l'énergie cinétique des courants marins ou fluviaux, comme une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent.



Figure 3.1 : Hydrolienne (Sabella D03)

La turbine de l'hydrolienne permet la transformation de l'énergie cinétique de l'eau en mouvement en énergie mécanique qui peut alors être convertie en énergie électrique par un alternateur. Les machines peuvent prendre les formes les plus variées allant du gros générateur de plusieurs mégawatts immergé en profondeur dans des spots à très forts courants de marée au micro-générateur flottant équipant des petits courants de rivière. L'inventivité des concepteurs semble sans limite dans ce domaine.

Puissance récupérable

L'énergie récupérable est inférieure à l'énergie cinétique du flux d'eau en amont de l'hydrolienne, puisque l'eau doit conserver une certaine vitesse résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. Un modèle élémentaire de fonctionnement des hélices, permet d'évaluer le ratio de la puissance cinétique récupérable pour une section perpendiculaire au fluide en mouvement.

C'est la limite de Betz, égale à $16/27 = 59\%$. Cette limite peut être dépassée si le courant de fluide est forcé dans une veine de section variable (effet venturi) plutôt que de circuler librement autour de l'hélice.

La puissance maximale récupérable théorique d'une hydrolienne peut s'exprimer ainsi :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 = 295 \cdot S \cdot V^3 \quad (3.1)$$

Pmax= puissance en (W) ;
S= surface balayée par les pales en (m²) ;
V= vitesse de la veine d'eau en (m/s)

Les hydroliennes tirent profit de la masse volumique de l'eau, 832 fois plus élevée que celle de l'air (environ $1,23 \text{ kg m}^{-3}$ à 15 °C). Malgré une vitesse de fluide moindre, la puissance récupérable par unité de surface d'hélice est donc beaucoup plus grande pour une hydrolienne que pour une éolienne.

D'autre part, La puissance du courant varie avec le cube de la vitesse, ainsi, l'énergie produite par un courant de 4 m/s est 8 fois plus forte que celle produite par un courant de 2 m/s . Les sites présentant les courants forts ($> 3 \text{ m/s}$) sont donc particulièrement favorables, mais malheureusement assez rares.

Déformation de la veine d'eau

L'incompressibilité de l'eau impose que le flux traversant l'hydrolienne soit identique en amont et en aval. Ainsi le produit de la vitesse par la section est constant avant et après l'hélice. Au passage de l'hydrolienne, le fluide est ralenti et la veine s'élargit.

3.4 Les différents types d'hydroliennes et les exploitants [8]

De nombreux concepts d'hydrolienne ont été développés mais aucun ne s'est vraiment imposé, chacun ayant ses avantages et ses défauts. Quelques-uns ont donné lieu à des démonstrateurs ou à des réalisations expérimentales mais peu sont rentrés dans un stade de production industriel. L'EMEC recense plus de 50 principes techniques différents mais le Centre européen de l'énergie marine reconnaît six principaux types de convertisseur d'énergie marémotrice. Ce sont des turbines à axe horizontal, des turbines à axe vertical, des hydrofoils oscillants, des venturis, des vis d'Archimède et des cerfs-volants.

La production d'électricité à partir du courant des rivières utilise des minis ou micro éoliennes, faiblement immergés, ayant un impact réduit sur la faune aquatique et des budgets d'investissement limités.

Ces hydroliennes produisent moins d'électricité que les turbines classiques, mais sont beaucoup plus légères, et demandent largement moins d'investissement. (Figure 3.2)

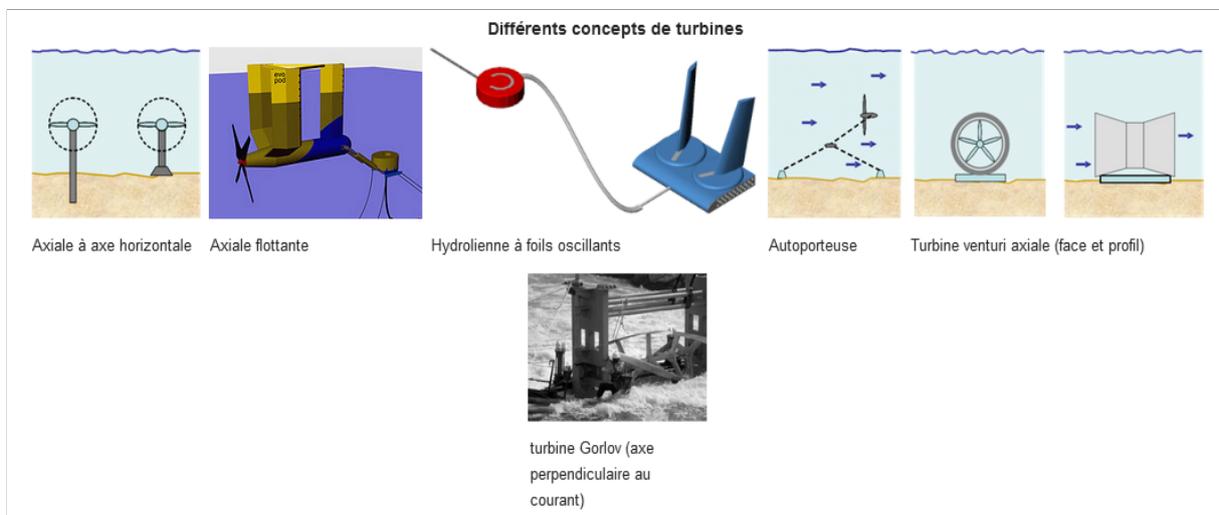


Figure 3.2 : Les différents types d'hydroliennes

Turbine axiale à axe horizontal

C'est le concept de l'éolienne, mais opérant sous la mer. De nombreux prototypes ou réalisations sont en fonctionnement à travers le monde. Les turbines sont équipées d'un rotor unique à pales fixes. La puissance de ce type de turbine varie de quelques watts à plusieurs Mégawatts. Elle comporte de deux à une petite dizaine de pales suivant la taille. Les effets de traînée en bout de pale limitent la vitesse de rotation de ces turbines. Suivant les modèles, la turbine peut-être orientée, ou non, dans le sens de la renverse de marée. Dans le cas d'une turbine fixe tirant sa production de courant réversible, le profil des pales est symétrique pour s'adapter au double sens du courant

Turbine à axe Vertical

Mal nommée puisqu'elles peuvent être disposées horizontalement ou verticalement, ces turbines ont un axe *perpendiculaire* au sens du courant. Inventés par Georges Darreius en 1923 et brevetés en 1929. Le scientifique soviétique M.Gorlov l'a perfectionné dans les années 1970. Les pales sont constituées de foils au tracé hélicoïdal (profil incurvé en forme d'aile d'avion) au nombre de 2 à 4. L'entreprise EcoCinetic, basée à La Rochelle, commercialise une micro-hydrolienne à axe vertical destinée aux cours d'eau et inspirée du rotor de Savonius.

Turbine venturi

Le flux d'eau est guidée dans une gaine ou un conduit dont la section se rétrécit en entrée du générateur ce qui produit une accélération du flux et une puissance disponible plus importante.

Hydrolienne oscillante

Un autre moyen de récupération de l'énergie se dispensant de turbine, bioinspiré est basé sur le mouvement de membrane ou de foils oscillant dans le courant. Ce type de dispositif est constitué de plans mobiles actionnant et comprimant un fluide dans système hydraulique. La pression engendrée est convertie en électricité. D'autres utilisent des membranes ondulantes.

Turbine autoporteuse

Des variantes telles que le « *Cerf-volant hydrolien* » utilise le courant marin pour maintenir en "vol sous-marin" un grand cerf-volant fixé par un câble au fond. cet engin soutient une turbine produisant de l'électricité. Le premier « *Deep Green* » (3 m de large) a été testé en Irlande (à Strangford Lough face à l'Ulster) par son concepteur (Minesto, une spin-off suédoise issue de Saab).

Les Avantages

Les hydroliennes utilisent une énergie renouvelable, ne polluent pas et ne génèrent pas de déchets (dans leur phase d'exploitation tout au moins) ;
- Du fait de la masse volumique importante de l'eau (800 fois supérieure à celle de l'air), les hydroliennes, à puissance équivalente, sont beaucoup plus petites que les éoliennes. Elles ont un impact visuel limité et ne nécessitent pas d'ouvrages de génie civil complexes contrairement aux barrages hydrauliques ;

- Les courants marins sont prévisibles, on peut donc estimer avec précision la production d'électricité à venir.
- Le potentiel des courants marins est important ;

Les Inconvénients

- Pour éviter le développement des algues et organismes encroûtant sur l'hydrolienne, il faut utiliser régulièrement un antifouling produits toxiques pour la faune et la flore marine. Réaliser l'opération sous l'eau est peu envisageable, à la fois pour des raisons techniques, mais aussi parce que le risque pour l'environnement est tel que réaliser ce type d'opération est pour un bateau à l'extérieur d'une aire de carénage spécialement aménagée. Une opération de maintenance à intervalle régulier pour démonter ou extraire l'hydrolienne de l'eau et refaire son carénage est donc indispensable ;

- Dans les eaux turbides, du fait de la présence de sable en suspension (l'érosion des pales d'hélice ou des pièces mobiles par le sable est très forte ce qui nécessite des opérations de maintenance sur les pales. Pour faciliter le remplacement, certaines hydroliennes ont une structure émergeant de l'eau, (qui peut être gênante pour la navigation) ou possède des systèmes à ballast permettant de faire plonger ou remonter les unités de production ;

- Les hydroliennes créent des zones de turbulences, qui modifient la sédimentation et le courant, avec de possibles effets sur la flore et la faune juste en aval de leur position. Ces aspects sont analysés par les études d'impacts ;

- Des poissons, mammifères marins ou des plongeurs pourraient heurter les hélices et être blessés plus ou moins gravement. Ces dernières peuvent néanmoins tourner très lentement (cela dépend de la résistance opposée par l'alternateur et donc du modèle d'hydrolienne).

Chapitre 4 : Energie solaire photovoltaïque

- 4.1 Principe d'une installation photovoltaïque
- 4.2 le gisement solaire en Algérie
- 4.3 Technologies des cellules photovoltaïques
- 4.4 Les modules photovoltaïques
- 4.5 MPPT
- 4.6 Caractéristiques et connectique photovoltaïque
- 4.7 L'onduleur
 - 4.7.1 Rôle
 - 4.7.2 Principe
 - 4.7.3 Caractéristiques et rendement
- 4.8 Exemple d'une installation photovoltaïque

4.1 Principe d'une installation photovoltaïque

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, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (Wc) 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.

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

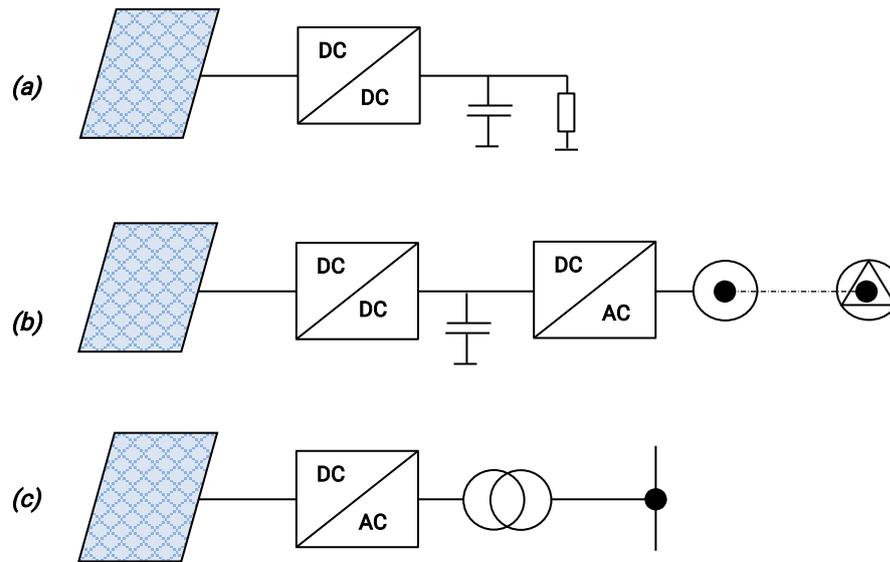
L'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés passe par son intégration sur les toits et les façades des maisons solaires.

Structure des installations photovoltaïques [10]

L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge électrique est réalisée via des convertisseurs statiques suivant les besoins particuliers. La figure 1.4 montre schématiquement trois cas :

- L'application la plus répandue est celle représentée à la figure 1.4.a Il s'agit de la charge d'accumulateurs et de l'alimentation d'utilisateurs indépendants. un variateur de courant adapte la tension variable des panneaux à la tension constante imposée par l'accumulateur. Cette conversion d'énergie est convenable pour les lieux très éloignés du réseau de distribution ainsi que pour une utilisation continue autonome. Les puissances vont de quelques 100 W à KW.
- La seconde application correspond aux utilisations du solaire photovoltaïque pour pomper l'eau souterraine. La figure 1.4.b montre un variateur de courant continu et un onduleur triphasé alimentent un moteur asynchrone, entraînant une pompe. Les puissances vont également de quelques 100 W à KW.

La figure 1.4.c est celle de la récupération de l'énergie solaire dans le réseau de distribution. Un onduleur triphasé ou monophasé convertit l'énergie continue en alternative. Même si cette application est encore trop restreinte du fait qu'elle n'est pas encore économique, elle peut devenir intéressante et donner un certain apport à l'approvisionnement en énergie électrique. Les puissances d'une telle utilisation peuvent atteindre quelques 100 KW.



- (a) Charge d'accumulateurs et alimentation d'utilisation indépendante ;
- (b) Alimentation d'un groupe moteur-pompe pour pomper l'eau souterraine ;
- (c) Récupération de l'énergie dans le réseau de distribution.

Figure 4.1: Représentation schématique de la conversion d'énergie solaire

Le mode d'intégration de l'énergie photovoltaïque dans les systèmes électriques dépend de la nature du système considéré, selon qu'il est raccordé au réseau, isolé ou hybride. Dans chaque cas, le stockage de l'électricité produite à partir du générateur photovoltaïque peut s'avérer nécessaire pour différentes raisons

4.2 Le gisement solaire en Algérie [14]

Le gisement solaire est un ensemble de données d'écrivant 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. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés

au monde comme le montre la figure 4.2.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures

annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure

partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud

du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh .

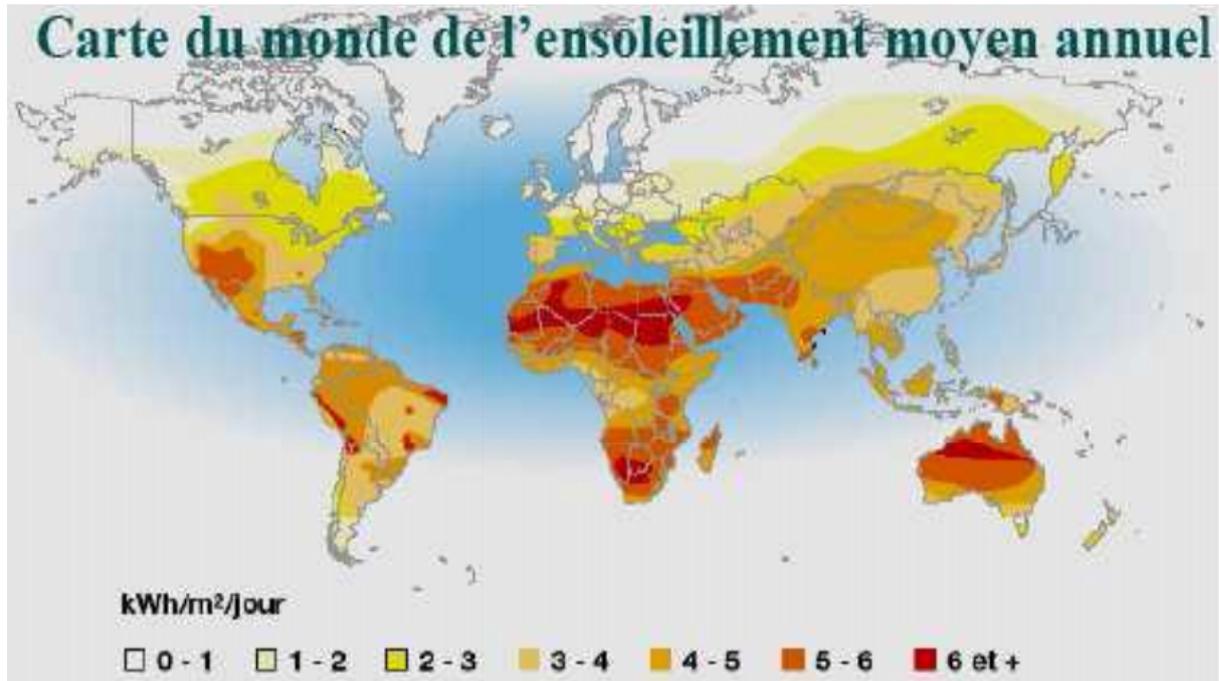


Figure 4.2: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel

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 4.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Tableau 4.1 : Potentiel solaire en Algérie

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

La durée d'insolation moyenne dans le Sud Algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, de l'ordre de 9 Heure/Jour (Voir Figures 4.3 et 4.4), on constate qu'elle est toujours supérieure à 8 Heure/Jour sur la majorité du territoire. La région du grand Sud, en particulier le Sud-Est et le Sud-Ouest présente le plus grand potentiel de tout le territoire Algérien (voir Figures 4.5 et 4.6).

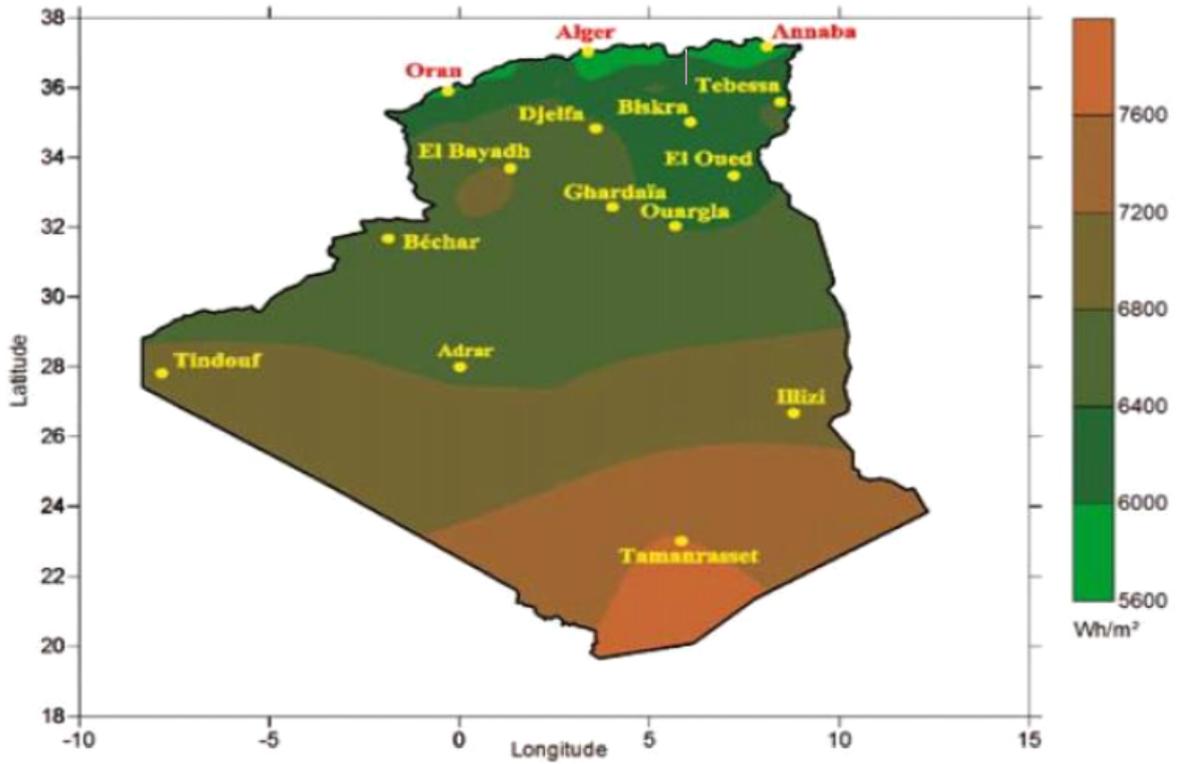


Figure 4.3 : Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale Cas d'un ciel totalement clair

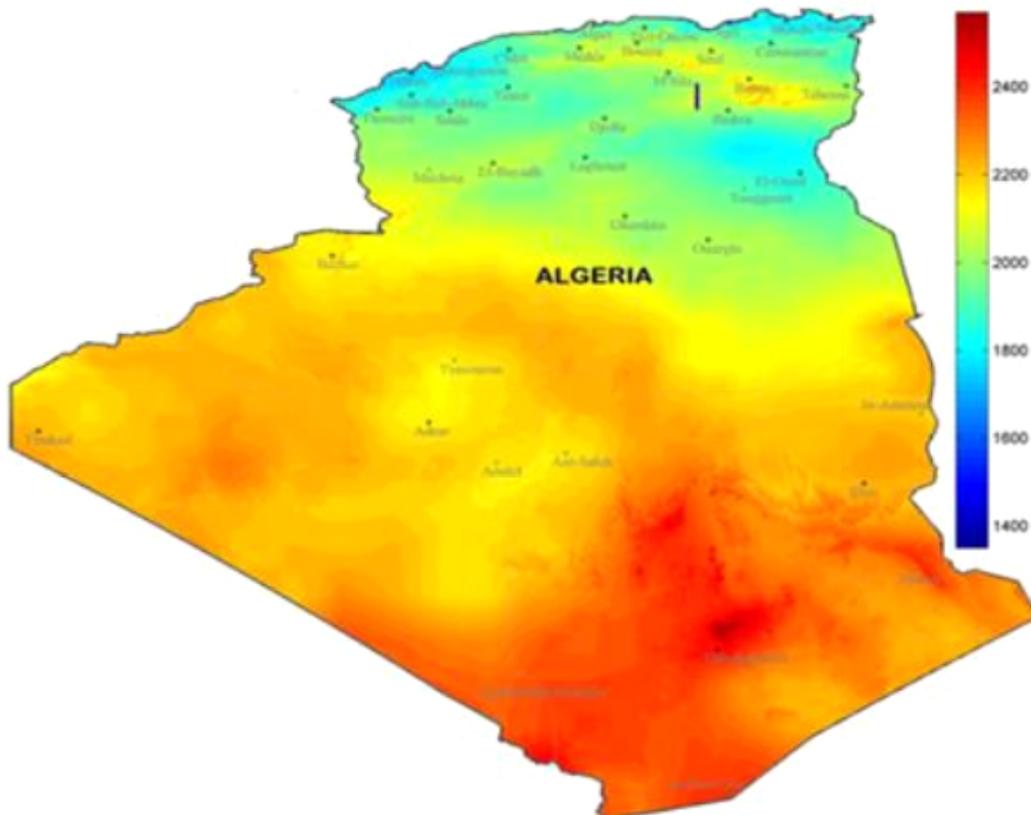


Figure 4.4 : Moyenne des sommes annuelles d'irradiation globale inclinée.

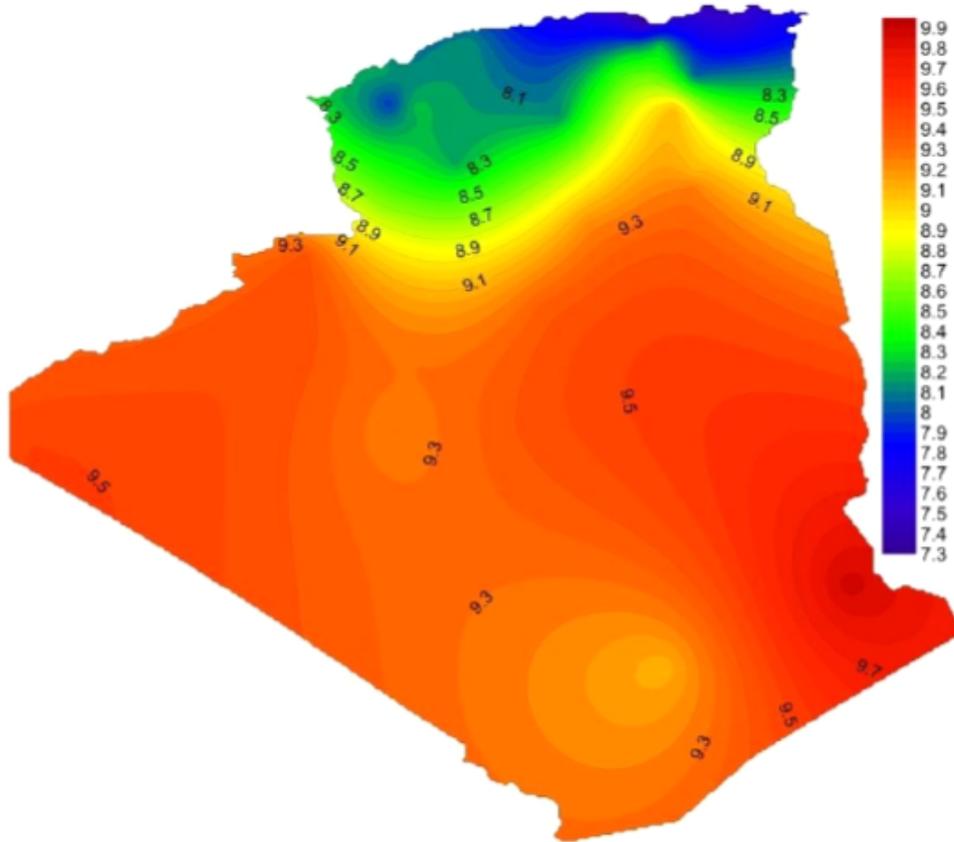


Figure 4.5 : Carte de la durée d'ensoleilment moyen annuel en Heure (1983-2012)

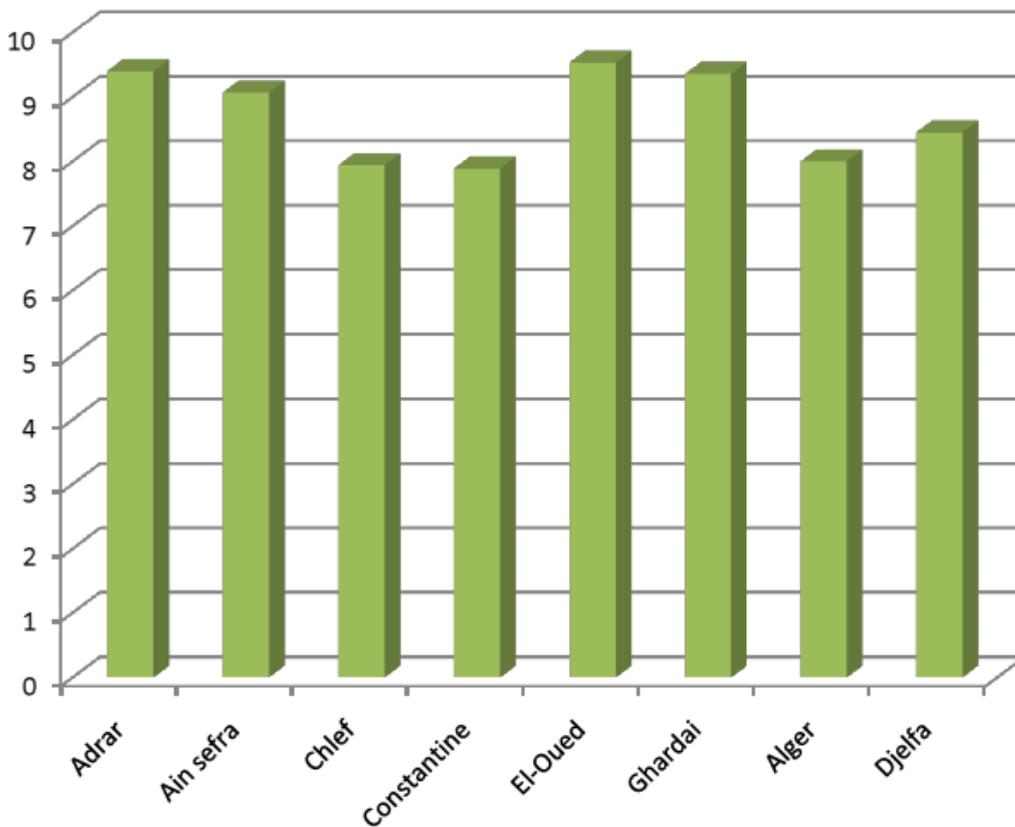


Figure 4.6 : Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesuré

4.3 Technologies des cellules photovoltaïques [13]

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique des années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Aujourd'hui, les laboratoires de recherche et les industries travaillent en collaboration pour développer de nouveaux concepts ou de nouveaux procédés susceptibles d'améliorer les performances électriques et de réduire les coûts des cellules solaires. C'est ainsi que les modules photovoltaïques modernes, composés de cellules interconnectées, ont largement prouvé leur efficacité et leur haute fiabilité. De plus, leur champ d'application ne cesse de s'élargir, du pompage à l'éclairage, en passant par toutes les applications électroniques de poche.

Les différents types de cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible: de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle:

- Les cellules monocristallines: Ce sont celles qui ont le meilleur rendement (12 - 16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), mais aussi celle qui ont le coup le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.
- Les cellules polycristallines: Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible: 11% - 13% (18% en laboratoire).
- Les cellules amorphes: Elles ont un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.
- Les cellules de 3^{ème} génération développées en ce moment en laboratoire, et qui ont un rendement plus élevé, mais qui ne sont pas encore industrialisées.

Ainsi notre recherche de la performance maximale, nous a amenés à nous procurer des cellules monocristallines, qui ont le meilleur rendement dans les conditions réelles d'utilisation.

Les performances

La tension: Une cellule photovoltaïque produit une tension quasiment constante de 0.5V. Cela correspond en effet à la tension de coupure d'une diode puisqu'une cellule solaire est, comme nous le verrons par la suite, assimilable à une jonction PN. Pour obtenir une tension supérieure, il sera donc nécessaire de mettre ces cellules en série, et former ainsi un "module". Cependant, il faut tenir compte du fait qu'une

température trop élevée peut diminuer la tension fournie par une cellule.

L'intensité: L'intensité fournie par une cellule dépend de la luminosité environnante, et de la taille du panneau solaire qui lui est rattaché. Plus le panneau sera grand, plus l'intensité fournie sera grande. On mesure généralement la puissance fournie par un panneau en "watts-crête", et ceci dans les conditions optimales de fonctionnement, c'est-à-dire au soleil, à midi, par temps froid et ciel dégagé (l'intensité maximale du soleil à ce moment là est de 1 000 W/m²).

4.4 Les modules photovoltaïques

- **l'effet photovoltaïque :**

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " :

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Le terme photovoltaïque vient du grec " phos, photos " qui désigne la lumière et de " voltaïque ", mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité.

- **La cellule photovoltaïque :** [11] [12]

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Considérons une jonction p-n et refermons ses électrodes par un court-circuit. On sait que, dans ces conditions, de part et d'autre de la jonction, sur une épaisseur petite, mais finie, règne une zone désertée dans laquelle existe un champ électrique intense produit par une différence de potentiel (ddp) de quelques dixièmes de volt. Le circuit extérieur n'est le siège d'aucun courant.

Si un photon incident engendre dans la zone désertée une paire électron-trou, sous l'effet du champ électrique ces porteurs vont se déplacer en sens inverse l'un de l'autre et rejoindre les porteurs majoritaires de même signe dans les régions P et N. Cela correspond à un courant traversant la jonction dans le sens de conduction difficile. Si P photons sont absorbés par unité de temps et compte tenu des inévitables paires produites à proximité de la zone désertée susceptibles de diffuser et de se recombiner, la densité de courant sera de la forme

$$J_p = -K[e]P \tag{4.1}$$

Avec

K : la constante de Boltzmann : $1.38 \cdot 10^{-23}$ J/°K.

e : la charge de l'électron : $1.6 \cdot 10^{-19}$ C.

Si l'on ajoute une f.e.m. dans le circuit le courant total débité sera de la forme

$$J = J_0 \left[\left(\exp \frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] - K|e|P \quad (4.2)$$

Avec

J_0 la densité du courant initiale.

T : température de la jonction en degré kelvin

En faisant varier V en grandeur et en signe on obtient la caractéristique ci-dessous. On la trace facilement en faisant glisser la caractéristique d'obscurité d'une quantité.

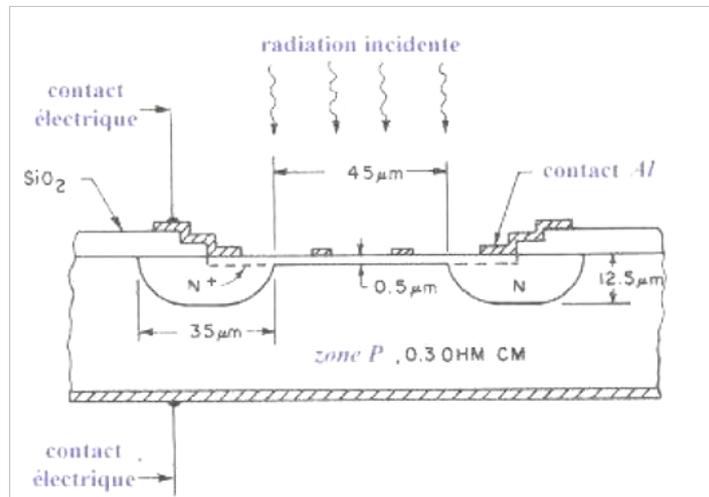


Figure 4.7 : Cellule solaire vue en coupe

Cet effet requiert donc une barrière de potentiel pour se manifester. En pratique on réalise une jonction p-n dont la caractéristique essentielle est d'être très dissymétriquement dopée et surtout d'avoir une zone n de très faible épaisseur, de telle sorte que la zone de charge d'espace se situe très près de la surface, afin d'obtenir un rendement maximum.

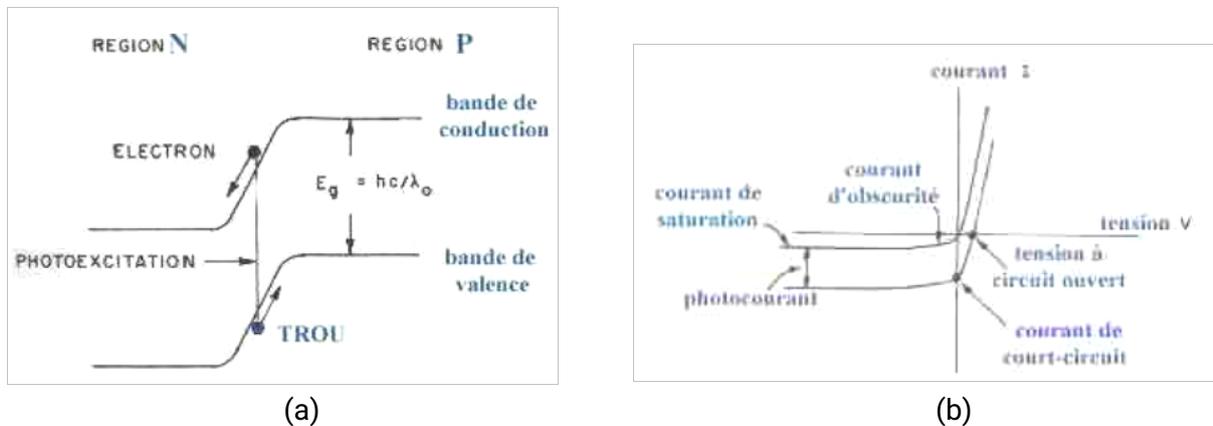


Figure 4.8 : a) Principe de la photodiode, b) Caractéristique $I=f(V)$ d'une photodiode

La relation donnant le photocourant en circuit ouvert est

$$I = h e N_1 G \quad (4.3)$$

Où

h : est l'efficacité quantique, c'est à dire le nombre de porteurs en excès produits par photon absorbé,

N_1 : le nombre de photons de longueur d'onde λ absorbés par unité de temps

G : le gain photoconductif représentant le rapport entre la durée de vie d'un porteur et le temps de transit dans la longueur de l'échantillon, mais avec ici un gain unitaire puisque tous les porteurs générés vont franchir la barrière.

En outre, eu égard au spectre solaire qui a une certaine largeur et une forte inhomogénéité, ainsi que le rappelle la figure au début du chapitre, il faudra intégrer cette relation sur l'ensemble de la plage de longueur d'onde.

Comme dans une jonction p-n le courant direct s'exprime selon la relation

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

On peut utiliser ces cellules de deux façons distinctes : soit en série avec une fem comme détecteur de rayonnement IR (photodiodes au Ge), soit comme générateur en les refermant sur une charge R.

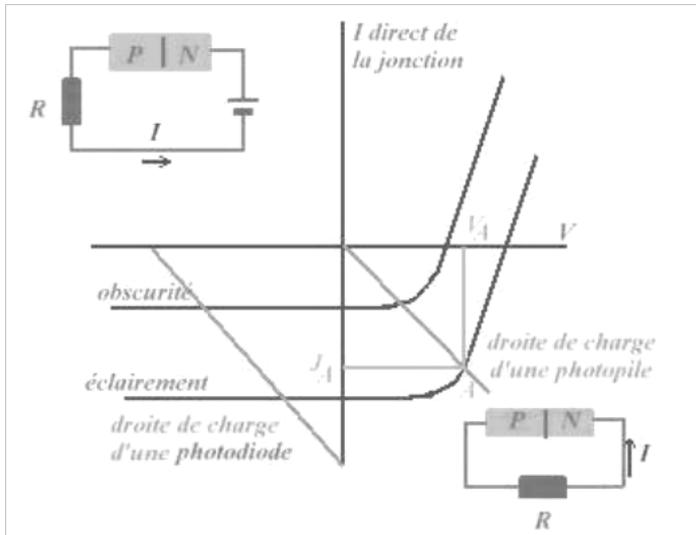


Figure 4.9 : les zones de fonctionnement d'une cellule PV

Dans cette dernière utilisation c'est toujours la lumière solaire qui est utilisée comme énergie excitatrice. En pratique il faut les faire débiter sur la charge optimale correspondant sur le graphique sensiblement au point A, c'est à dire que la résistance R devrait être telle que $R = V_A/J_A$ ce qui n'est malheureusement pas souvent le cas.

Dans tous les cas, pour obtenir les meilleurs rendements, il est nécessaire que la libération des paires électrons trou s'effectue dans la zone désertée ou à son voisinage immédiat. Cette condition ne peut jamais être parfaitement remplie. On se rapproche de l'optimum en plaçant la jonction à une distance minimale de la zone

éclairée. Il faut de plus que la résistance de la cellule (résistance interne du générateur équivalent) reste faible ce qui limite l'étendue des aires éclairées

La cellule photovoltaïque (PV) est une source de puissance non linéaire qui peut être représenté par le schéma électrique équivalent figure (4.5).

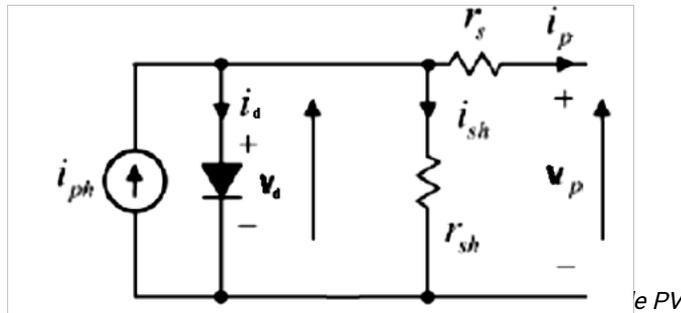


Figure 4.10 : Schéma électrique équivalent de la cellule PV

Avec:

r_{sh} : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre grille collectrice et le courant arrière des cellules.

r_s : Résistance série qui est due essentiellement à la résistance de contact des grilles collectrices avec la surface des cellules et la résistance du matériau constituant les cellules.

L'étude de la physique d'une cellule solaire nous permet d'obtenir l'équation de courant de la charge :

$$i_p = i_{ph} - i_d - i_{sh} \quad (4.5)$$

Avec :

i_p : Le courant délivré par la cellule solaire.

i_{ph} : Photo courant, crée par les photons solaires d'énergie supérieure au gap.

i_d : Courant de la diode.

i_{sh} : Le courant qui circule dans la résistance shunt.

n : Correspondant au facteur d'idéalité, il représente la déviation des caractéristiques par rapport à une diode idéale ;

Où le courant de sortie peut être exprimé par l'équation (4.7).

$$I_p = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V_p + R_s I)}{n k T} - 1 \right) - \frac{V_p + R_s I}{R_{sh}} \quad (4.6)$$

Avec V_p est la tension de sortie.

- L'influence de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV [11]

1. L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement d'une cellule PV

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure suivante représente la

caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

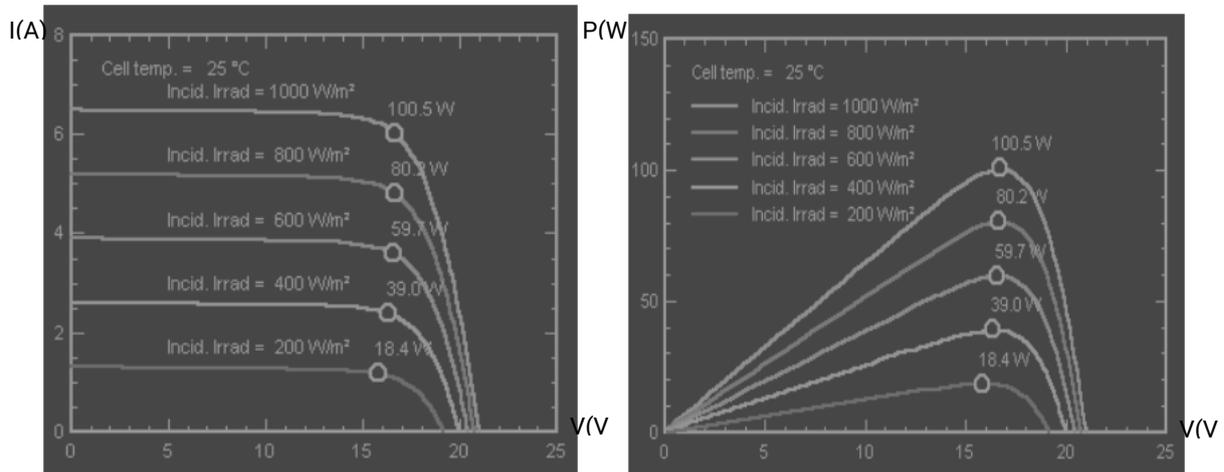


Figure 4. 11 : L'influence de l'éclairement solaire sur le fonctionnement d'un module PV

2. L'influence de la température sur le fonctionnement d'une cellule PV

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Le comportement de la cellule PV en fonction de la température est complexe.

Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ $0,025 \text{ mA} / \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$. La baisse globale de puissance est d'environ de $0,4 \% / ^\circ\text{C}$. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante

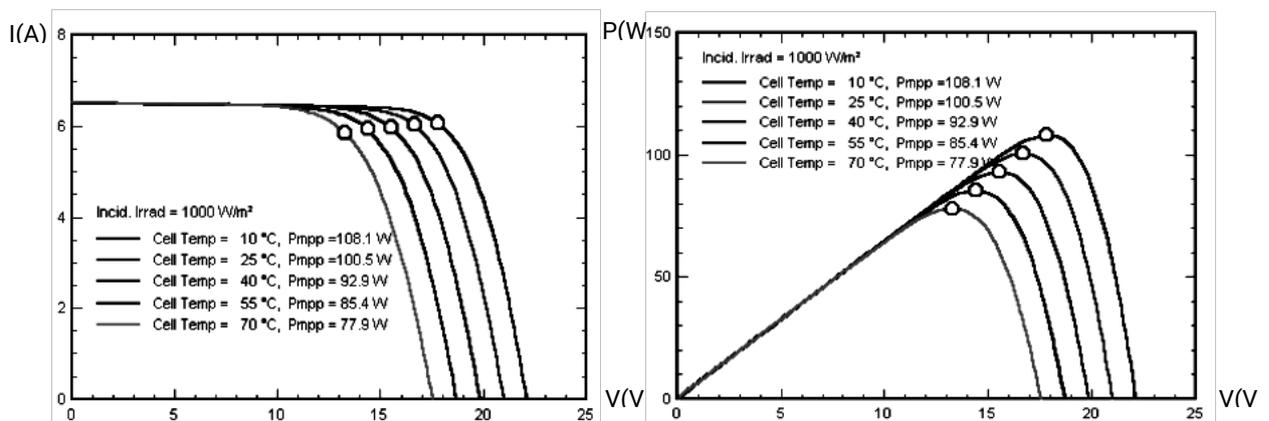


Figure 4. 12 : L'influence de la température sur le fonctionnement d'un module PV

- Les associations de cellules PV [11]

En fait, l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant :

- En série, leurs tensions s'ajoutent,
- En parallèle, leurs courants s'ajoutent.

Cependant, leur fonctionnement est altéré si l'une des cellules associées est occultée (ombre par exemple).

1. L'association en série de cellules PV

2. Si on assemble en série des cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égal à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

$$U = \sum_{c=1}^n U_c \tag{4.7}$$

U (V), Volt : Tension aux bornes de l'assemblage.

U_c (V), Volt : Tension aux bornes de la cellule d'indice " c ".

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes.

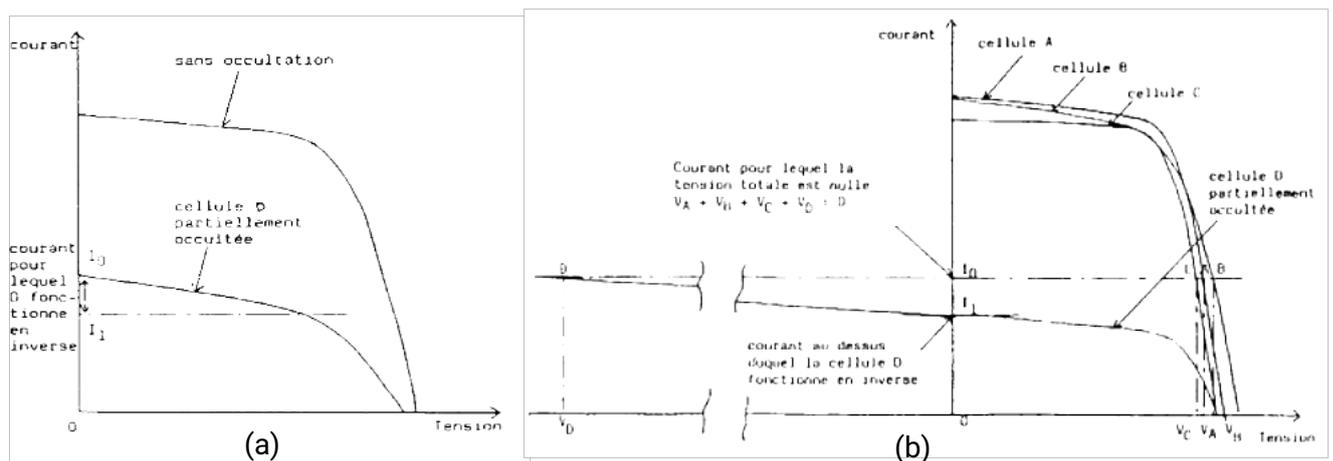


Figure 4.13 : a). Fonctionnement de cellules en série, caractéristiques I-V de l'ensemble. b). Fonctionnement de 4 cellules en série, l'une d'entre elles étant occultée partiellement

Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite en direct) par rapport aux autres cellules du module qui elles, délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et peut provoquer le claquage de la cellule.

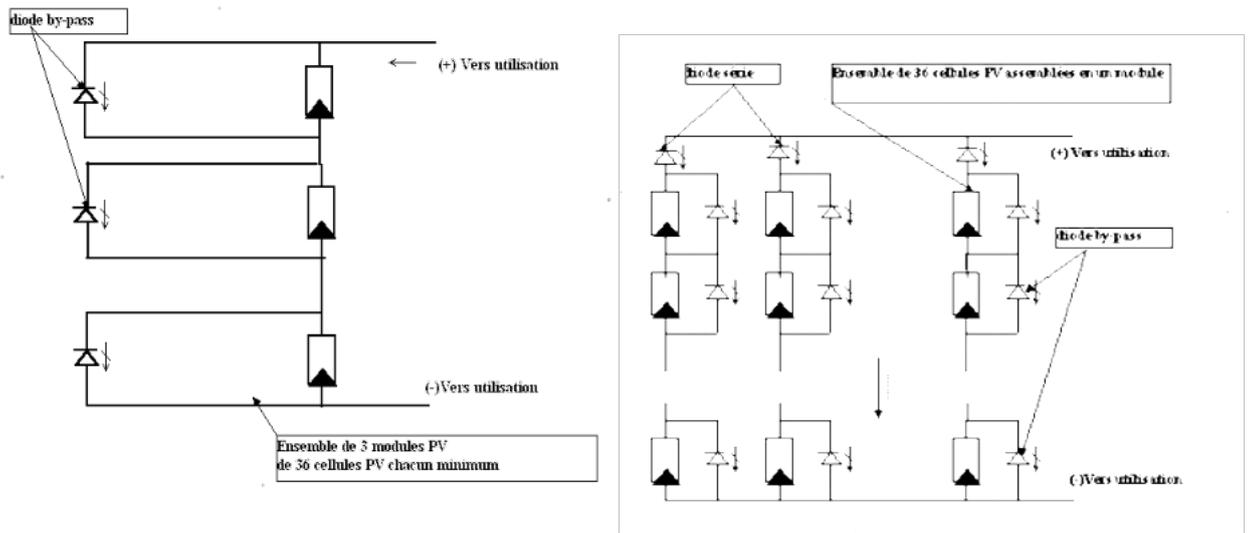


Figure 4.14 : Schéma électrique équivalent du montage série

Les recherches sur ce sujet ont montré que dans le cas de cellules PV au silicium, au-delà d'une tension inverse de 20 V, la probabilité de claquage d'une cellule (destruction de la jonction électrique) devient importante. Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes d'une cellule, **les fabricants de modules photovoltaïques placent donc une diode parallèle, appelée diode by-pass, toutes les 18 à 36 cellules (selon les applications).**

3. L'association parallèle de cellules PV

Dans le cas d'un montage en parallèle, le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$I = \sum_{c=1}^n I_c \quad (4.8)$$

I (A), Ampère : Courant circulant dans l'assemblage.

I_c (A), Ampère : Courant circulant dans chaque cellule d'indice " c ".

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents.

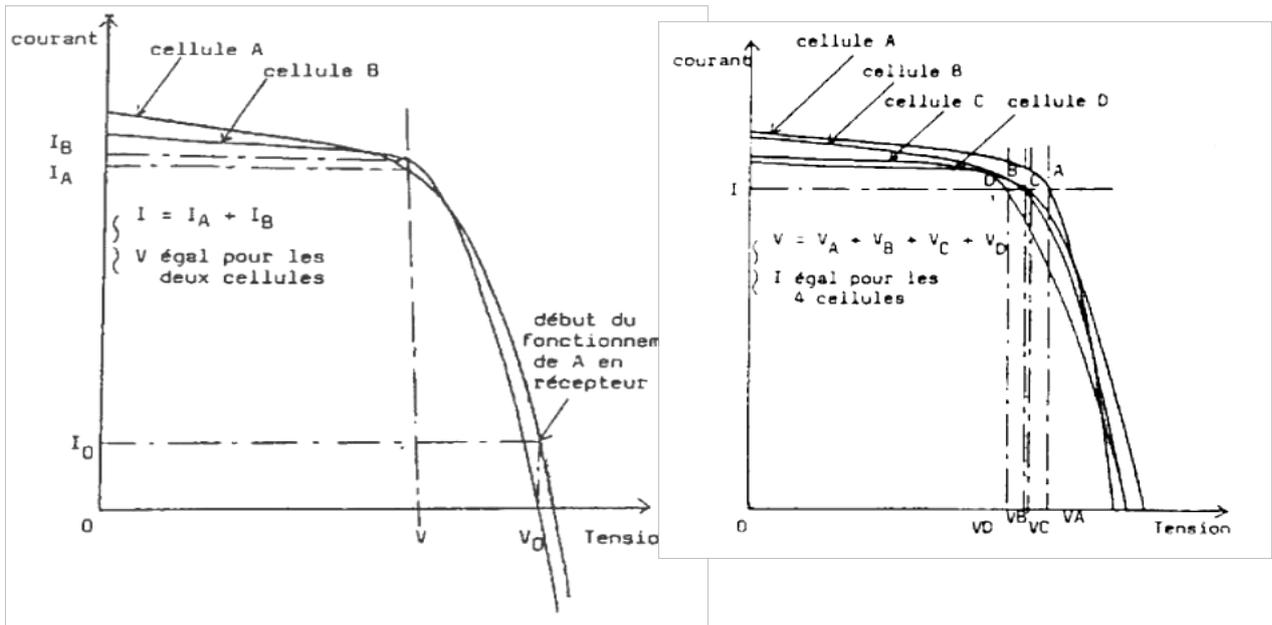


Figure 4.15 : Courbe caractéristique d'un montage parallèle

Cependant, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices car la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour, laquelle empêche également de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement. Pour limiter ces pertes et protéger les cellules, on place donc une diode en série, appelée diode série, toutes les n cellules (n étant fonction des caractéristiques du montage).

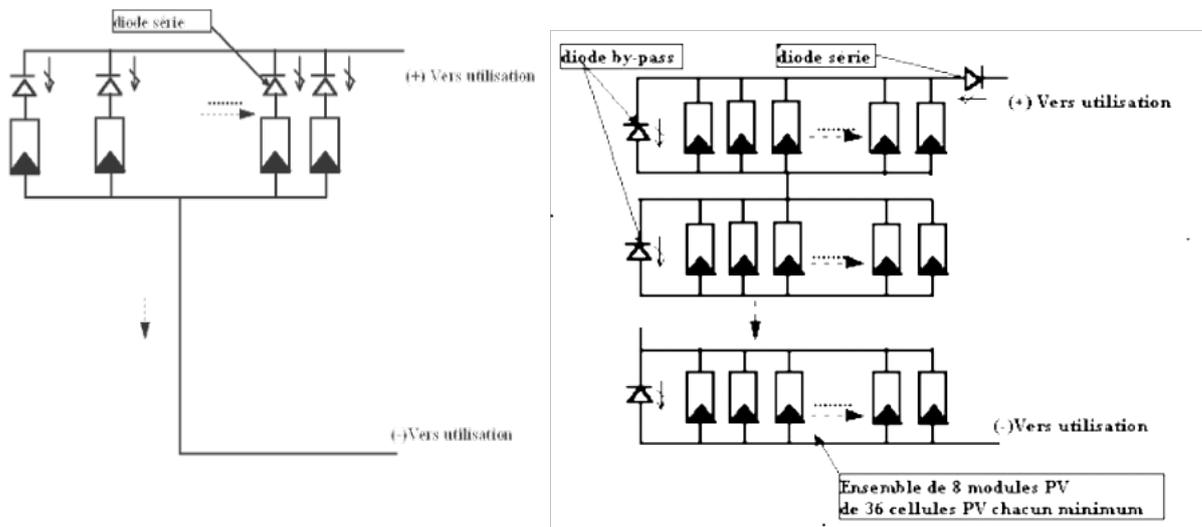


Figure 4.16 : Schéma électrique équivalent du montage parallèle

Afin de limiter les pertes de puissance au niveau de ces diodes, les fabricants emploient généralement des diodes de type Schottky (par exemple les séries 1 N 5817, 18 et 19 pour des courants de l'ordre de 1 A, et SD 51 ou MBR 340 M pour les courants de 20 A ou plus) dont les chutes de tensions en fonctionnement direct sont souvent inférieures à 0,4 V (11).

- **Utilisation des diodes by-pass et séries [11]**

Les diodes by-pass de protection d'association de cellules en série sont montées :

- ▶ Par les fabricants lors de l'association des cellules en série (pour protéger les cellules). Elles seront insérées dans les boîtes de connexion des cellules sur chaque module lors de leurs fabrications.
- ▶ Par les installateurs lors de l'association de modules en série dans les boîtes de jonction. Les diodes séries de protection d'association en parallèle :
- ▶ Ne sont pas montées par les fabricants lors de l'association des cellules en parallèle (il n'est pas nécessaire de protéger une cellule occultée dans un module compte tenu des faibles courants mis en jeu)
- ▶ Sont montées par les installateurs lors de l'association de modules en parallèle dans les boîtes de jonction pour les modules occultés dans un ensemble de modules.

4.5 MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Il existe environ une vingtaine de méthodes de recherche du point de puissance maximale d'un champ de modules (Maximum Power Point Tracking), dont l'efficacité et la rapidité varient.

L'unité de régulation du convertisseur de puissance assure un fonctionnement du générateur PV au point de fonctionnement optimal (point de puissance maximale ou MPP*) pour garantir une production de puissance électrique maximale.

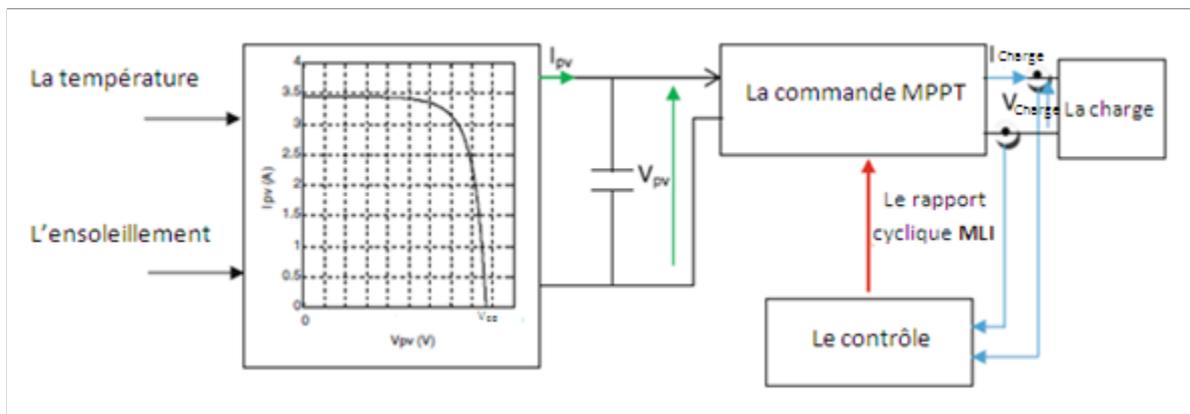


Figure 4. 17 : le contrôle des paramètres de sorties par MPPT

Les deux méthodes les plus couramment rencontrées sont celles dites du Hill-Climbing et du P&O (Perturb and Observe). Ces deux méthodes fonctionnent sur le même principe qui consiste à perturber le fonctionnement du système et à analyser

ensuite comment le système réagit à cette perturbation : modification du rapport cyclique de hachage pour la méthode de Hill-Climbing, modification de la tension aux bornes du champ de modules photovoltaïques pour la méthode P&O. Le fait de modifier le rendement de conversion de l'onduleur perturbe le courant continu issu des modules et par conséquent la tension à leurs bornes et la puissance instantanée délivrée.

Ces deux méthodes sont donc basées sur le contrôle de la puissance instantanée délivrée par le champ de modules PV en fonction de variations de la tension continue aux bornes du champ PV (organigramme1 et figures 4.18).

Organigramme 1 : Principe de l'algorithme des méthodes de Hill-Climbing et P&O

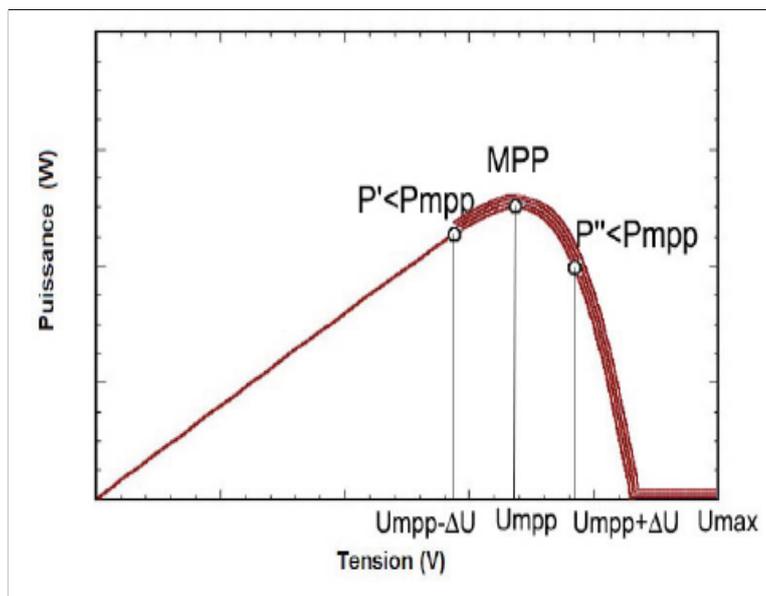
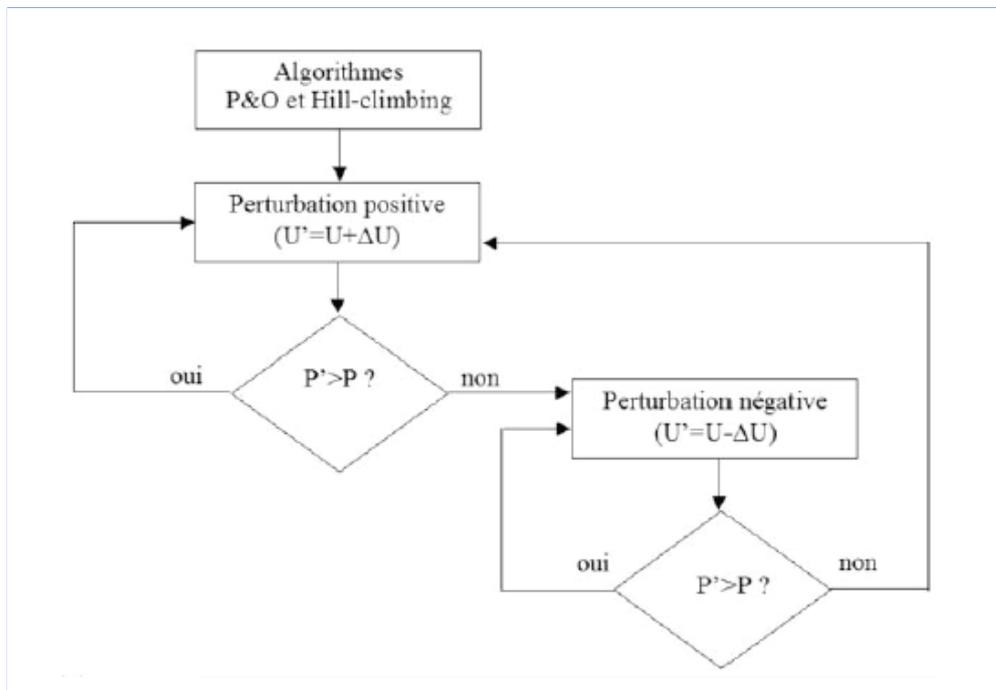


Figure 4.18 : Illustration de l'algorithme des méthodes de Hill-Climbing et P&O

Nous pouvons décomposer la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones Figure (4.) :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'irradiation. d'admittance interne pouvant être modélisée par: $(1 / R_{sh})$ (Zone 1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{CO} d'impédance interne équivalente à R_s (Zone 2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{SH} (Zone 3).

C'est dans la (Zone 3) que situe le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{mpp}, V_{mpp}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées d'où la notion du TRACKING DE LA PUISSANCE OPTIMALE DU PANEAU SOLAIRE

4.7 L'onduleur [13]

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an. Cette croissance exceptionnelle, due principalement aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de distribution d'électricité, se traduit bien évidemment par des innovations technologiques et une baisse de coûts des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance.

En effet, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des modules photovoltaïques systèmes au réseau de distribution d'électricité, sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

4.7.1 Rôle

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

Ex : C'est le cas des onduleurs servant à alimenter des moteurs à courant alternatif devant tourner à vitesse variable par exemple (la vitesse est liée à la fréquence des courants qui traversent la machine).

- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Ex : C'est le cas en particulier des alimentations de sécurité destinées à se substituer au réseau en cas de défaillance de celui-ci par exemple. L'énergie stockée dans les batteries de secours est restituée sous forme continue, l'onduleur est alors nécessaire pour recréer la forme de tension et fréquence du réseau.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des

systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW).

4.7.2 Principe

Les onduleurs destinés aux systèmes photovoltaïques sont quelques peu différents des onduleurs classiques utilisés en électrotechnique, mais l'objectif de conversion AC/DC est le même. La principale caractéristique de l'onduleur PV est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système.

En effet, le générateur PV (ensemble de modules PV) a une courbe caractéristique IV non linéaire (figure 4.20).

Pour un éclairement et une température donnés, la tension en circuit ouvert ou à forte charge est à peu près constante (assimilable à une source de tension), tandis qu'en court-circuit ou à faible charge le courant est pratiquement constant (source de courant). Le générateur n'est alors ni vraiment une source de tension ni vraiment une source de courant non plus.

La tension de circuit ouvert est sensible à la température et diminue quand la température augmente. Le courant de court-circuit est quant à lui proportionnel à l'éclairement : augmente si l'éclairement augmente.

Le meilleur point de fonctionnement du système correspond au point de cette courbe où la puissance, produit de la tension et du courant, est maximisée. Il se situe au milieu de la caractéristique. (Figure 4.20)

En régime permanent établi, la tension et le courant du capteur sont considérés comme constants. L'utilisation d'un onduleur de tension plutôt qu'un onduleur de courant est alors essentiellement motivée par des raisons technologiques.

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI ou PWM en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau.

On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux : d'un point de vue formel elle transforme l'onduleur de tension en onduleur de courant. (Figure 4.21)

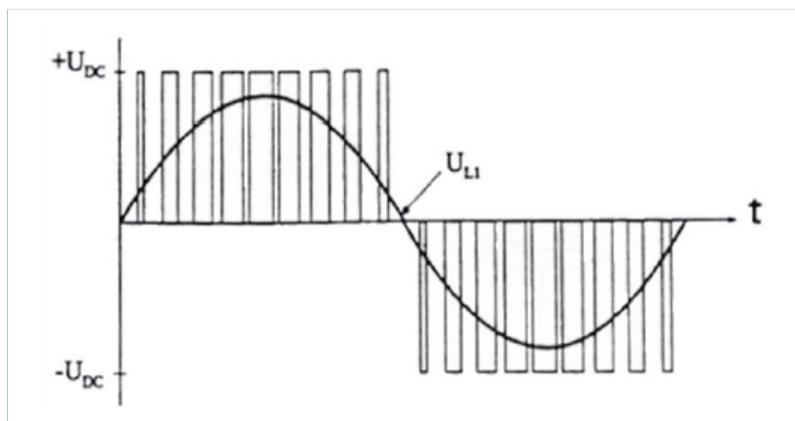


Figure 4.20 : Filtrage de la tension par l'inductance de sortie

UDC correspond à la tension aux bornes du condensateur d'entrée d'un montage simple (figure 4.20) et UL1 à la tension injectée au réseau donc de fréquence 50 Hz.

Principaux types d'onduleurs rencontrés

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance). Dans le cas standard, par un jeu de commutation commandée de manière appropriée, le plus souvent par MLI, l'énergie électrique continue fournie est modulée afin d'obtenir un signal alternatif à la fréquence du réseau.

Il existe de nombreux circuits électroniques qui permettent de réaliser conversion d'énergie électrique :

Le montage le plus simple est composé de thyristors. Cette technologie était utilisée dans les premiers onduleurs PV (et est encore disponible en monophasé et triphasé) Peu cher, il présente cependant un courant de sortie plus ou moins rectangulaire induisant de la puissance réactive et des harmoniques qui affectent le rendement de l'onduleur et peuvent perturber le réseau.

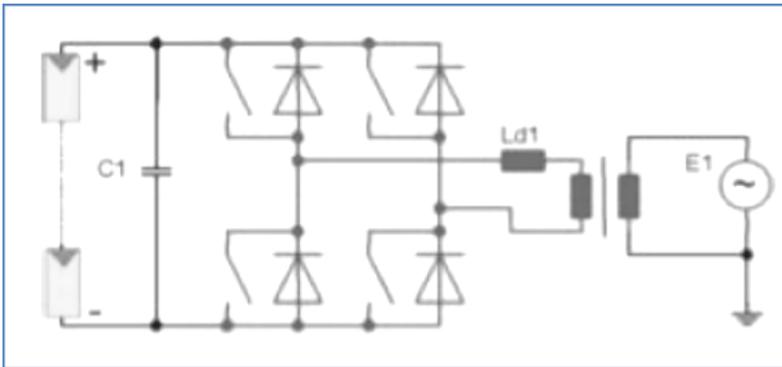


Figure 4. 21: Circuit utilisant des thyristors

La figure 4.22 présente un exemple de circuit simple composé d'un pont de transistors commandé par PWM. Le signal alternatif obtenu est ensuite filtré par l'inductance Ld située avant le transformateur (ou Lac sur les autres schémas) afin d'obtenir un signal alternatif sinusoïdal à la fréquence du réseau.

Ce dernier signal est ensuite ajusté à la tension du réseau par un transformateur 50Hz qui apporte en même temps une isolation galvanique au montage.

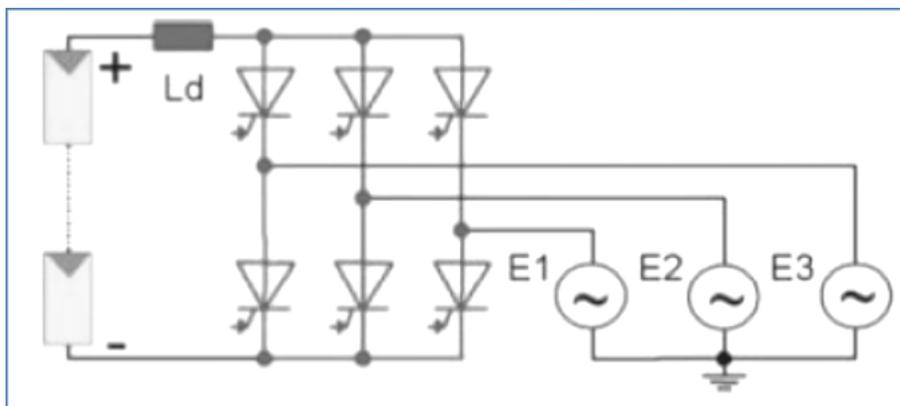


Figure 4.22 : Circuit simple utilisant un pont de transistors

Pour travailler sur une gamme de tensions d'entrée plus large, un convertisseur élévateur (boost) peut être rajouté en entrée du pont.

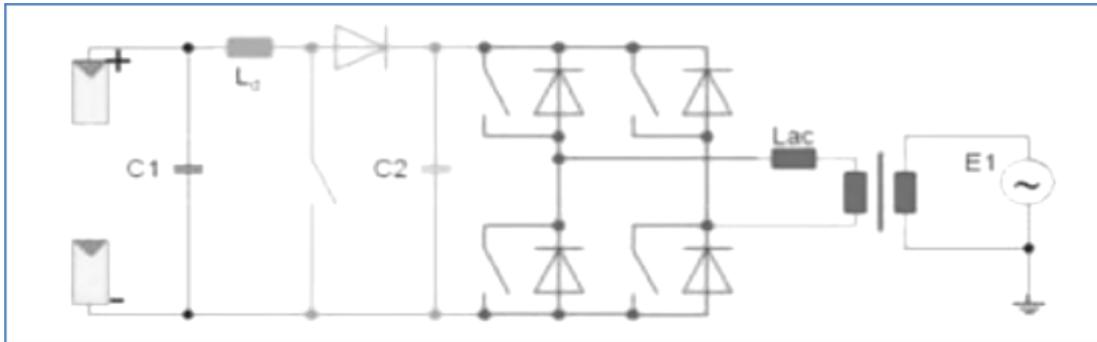


Figure 4.23 : Circuit à pont de transistors avec convertisseur élévateur

Le montage de la figure 4.24 comprend 3 étages différents. Il est composé d'un transformateur haute fréquence qui adapte la tension d'entrée tout en réduisant le poids de l'onduleur. À sa sortie, le signal est alternatif. Un redresseur permet alors de le convertir en continu. Le pont de sortie permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

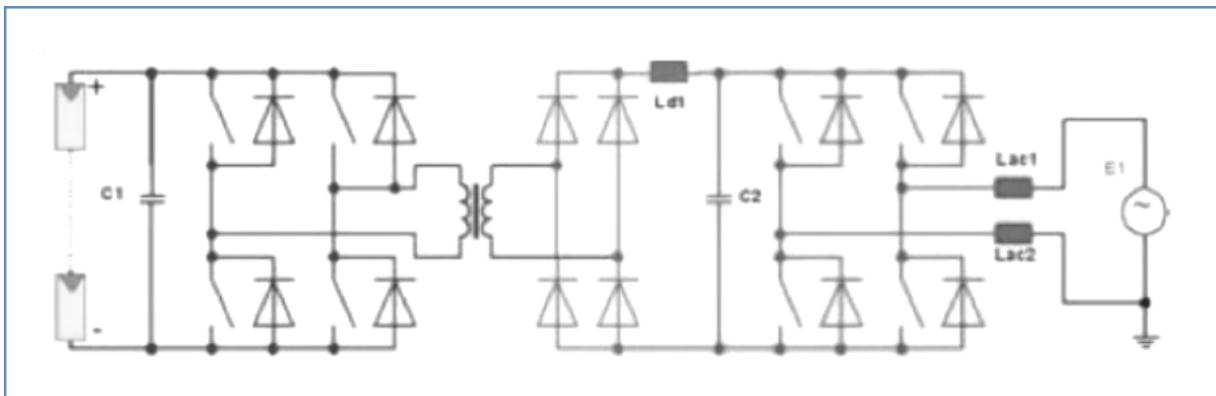


Figure 4.24 : Circuit à 3 étages avec transformateur* haute fréquence

Le montage de la figure 4.25 est constitué de 4 étages. Ce circuit nécessite le contrôle de 7 interrupteurs contre 8 pour celui de la figure 6. Il est composé d'un convertisseur abaisseur de tension, d'un montage dit « pushpull » suivi d'un redresseur, et d'un pont de sortie.

La partie « convertisseur abaisseur + transformateur push pull » permet d'adapter la tension d'entrée. Elle permet à l'onduleur d'avoir une plus large gamme de tensions d'entrée possible donc une plus grande flexibilité d'association avec les modules PV. Le redresseur « redresse » la tension en sortie du push pull, et le pont de sortie permet par modulation d'amplitude de transformer ce signal continu en un signal alternatif sinusoïdal adapté à la fréquence du réseau.

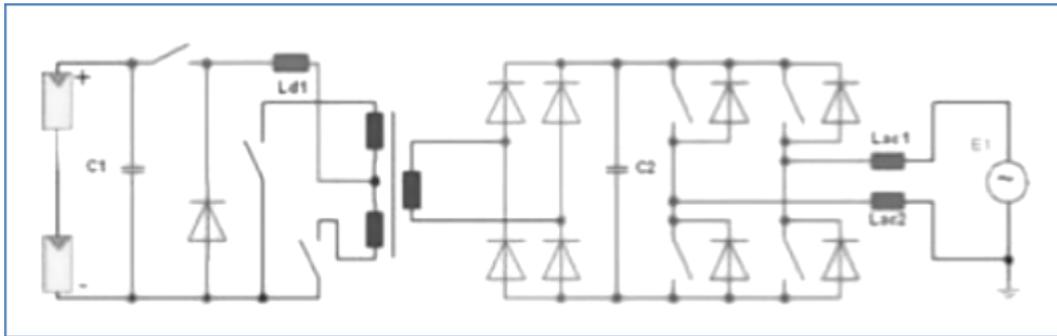


Figure 4.25 : Circuit à 4 étages avec montage push pull

Enfin, le montage de la figure 4.26 représente un exemple simple de la technologie des onduleurs sans transformateur. En éliminant le transformateur, générateur de pertes importantes dans le circuit lors de la conversion de puissance, on peut augmenter le rendement.

Il faut cependant prendre en compte les problèmes de compatibilité électromagnétique que le transformateur permettait d'éliminer par isolation galvanique.

Dans ce circuit, S1 (pour les courants positifs et négatifs) et S2 (pour les courants positifs) sont commandés en haute fréquence et les autres interrupteurs en 50Hz (fréquence du réseau). Pour des tensions d'entrée plus grandes, S1 peut être contrôlé seul en haute fréquence et les 4 autres en 50Hz pour former un convertisseur abaisseur et un convertisseur push pull.

Dans les 2 cas, le désavantage de ce montage est la très forte tension appliquée aux bornes des interrupteurs.

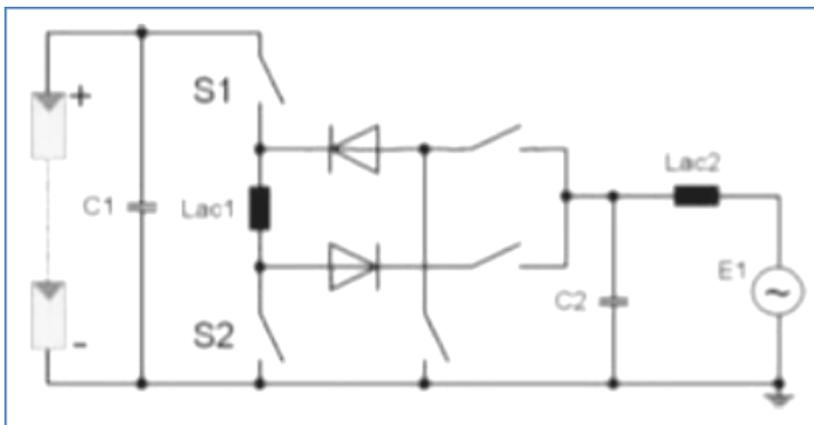


Figure 4.26 : Circuit Onduleur sans transformateur* dit « à Topologie de Karschny »

Rôle du condensateur d'entrée

Tous les circuits présentés disposent en entrée d'un condensateur référencé C1 de forte capacité, qui a un rôle très important pour les onduleurs photovoltaïques dans le maintien d'un point de fonctionnement stable.

Il a une fonction d'accumulateur d'énergie et une fonction de filtrage des fluctuations de tension dues aux commutations. Il assure ainsi un écoulement homogène du courant du générateur PV vers le réseau en maintenant la tension constante.

Les condensateurs électrolytiques (électrochimiques) aluminium sont utilisés dans

des applications en courant continu ou à très basses fréquences et sont ceux généralement rencontrés dans les systèmes PV. Ils présentent des valeurs de capacités importantes et une faible résistance série.

4.7.3 Caractéristiques et rendement

Rendement maximal :

L'efficacité des onduleurs ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années. Cette amélioration participe, bien entendu, à la constante diminution des coûts de l'électricité générée par le PV.

Il y a 15 ans, 90% était considéré comme un très bon rendement des systèmes PV. Aujourd'hui, les meilleurs onduleurs atteignent des pics de rendement de 98% et la moyenne est à 95,2%.

L'autre amélioration frappante est celle du « rendement européen», qui prend en compte l'efficacité à charge partielle de l'onduleur. À cause d'un mauvais rendement à charge partielle, la valeur du Rendement européen est plus faible que celle du rendement maximal. Il y a 15 ans, elle pouvait atteindre jusqu'à 5% de moins que le rendement maximal alors qu'aujourd'hui la différence est comprise entre 1 et 2%, pour les meilleurs modèles.

Le Rendement européen moyen des onduleurs présents sur le marché en 2007 est de 94,4 %.

D'un point de vue technique, il devrait être possible de réduire à 0,5% cet écart en optimisant l'efficacité à charge partielle.

Le rendement maximal est aussi amené à augmenter jusqu'à 99% dans les prochaines années. Une augmentation de 1% (de 98% à 99%) de l'efficacité signifie des pertes thermiques divisées par 2, ce qui est extrêmement important pour l'amélioration de la durée de vie des composants et donc des onduleurs.

Moins de pertes thermiques signifient également que les systèmes de refroidissements ne sont plus nécessaires et que les dimensions des boîtiers des onduleurs peuvent être réduites.

Cette amélioration du rendement peut être obtenue en optimisant les composants utilisés afin d'avoir le moins de pertes de chaleur possible.

Les recherches sur les premiers transistors de puissance en nanotubes continuent. Ils pourraient remplacer les transistors IGBT et diminuer considérablement les pertes, déjà faibles avec les IGBT.

Un moyen de réduire les pertes dans les transistors est d'en monter plusieurs en parallèle plutôt qu'un seul, afin de diminuer les pertes lors du fonctionnement à charge partielle.

Gamme de tensions d'entrée

Certains constructeurs ont choisi l'élargissement de la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur comme axe d'amélioration de leurs nouveaux produits.

Une large gamme d'entrée facilite le choix de l'onduleur lors du dimensionnement du système et facilite la gestion des stocks pour le constructeur.

Un module PV de plus ou de moins dans le système ne remet plus forcément en cause le choix de l'onduleur.

En revanche, il n'est pas suffisant d'avoir une tension de sortie du générateur comprise dans la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur pour avoir un rendement

maximal. Il y a la possibilité d'optimiser la relation, comme en démontre les graphiques de la figure 12.

Cependant il n'est pas possible d'affirmer qu'une grande tension est plus adaptée qu'une tension plus faible, car la réponse ne dépend que trop de la topologie du circuit de l'onduleur comme on peut le voir sur la figure 4.27.

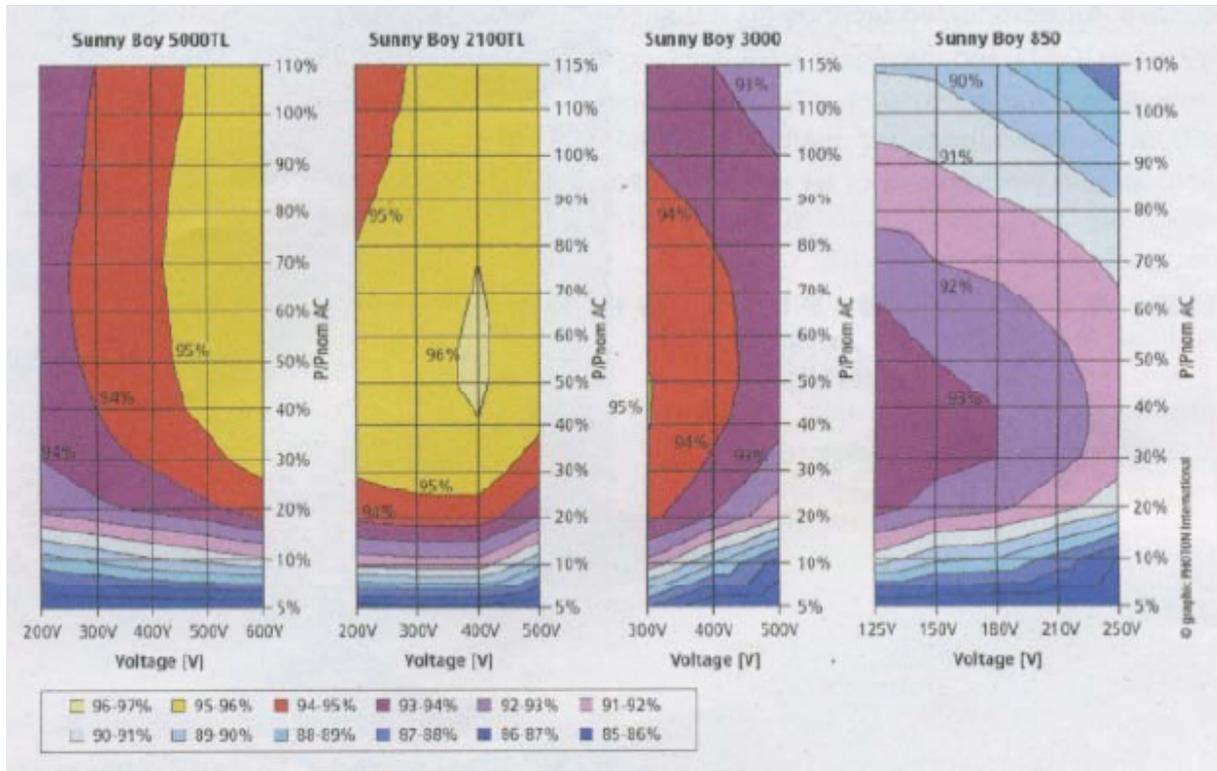


Figure 4.27 : Influence de la tension du générateur PV sur la gamme de tensions d'entrée de l'onduleur

Certains constructeurs ont choisi d'utiliser des convertisseurs élévateurs (« boost ») pour élargir cette gamme d'entrée. Ils permettent de convertir de petites tensions d'entrée avec des courants importants en grandes tensions et faibles courants. L'onduleur ne nécessite alors pas de puissant transformateur. Il est plus aisé d'améliorer l'efficacité en travaillant avec des courants faibles car les pertes sont moins importantes, même si le convertisseur lui-même provoque quelques pertes.

L'engouement des constructeurs est cependant freiné par le rendement. En effet, il apparaît que les onduleurs PV ont tendance à fonctionner avec de forts rendements dans une gamme de tensions d'entrée plutôt étroite

Ainsi le développement d'une tendance contraire serait donc probable : le développement d'onduleurs optimisés pour travailler dans une gamme de tensions d'entrée réduite mais parfaitement adaptée au système.

La durée de vie

Une garantie de 5 ans sur les produits est devenue la norme chez les constructeurs, alors qu'elle n'était que de 2 ans, il y a quelques années.

Il est possible d'étendre la garantie à 10 ans, voir à 20 ans suivant les constructeurs. Cette étendue de la durée de vie est le résultat de l'utilisation de composants de meilleure qualité, surdimensionnés ou plus résistants aux hausses de températures.

4.8 Exemple d'une installation photovoltaïque [15]

Une installation photovoltaïque en site isolé est une installation qui n'est pas reliée au réseau électrique. L'énergie qui est produite est stockée (dans des batteries) et peut ensuite être utilisée pour alimenter tout type d'appareil électrique fonctionnant en 12V, 24V ou 220V.



Figure 4.28 : Une installation photovoltaïque en site isolé

Les panneaux photovoltaïques produisent l'énergie électrique

Les modules photovoltaïques transforment l'énergie solaire (la lumière) en énergie électrique **en courant continu**.

Chaque module solaire a une tension nominale de 12 ou 24 Volts et ils seront câblés en parallèle ou en série afin d'obtenir la tension et l'intensité désirées. Le courant sort alors en **tension 12, 24 ou 48 volts**.

Le gros avantage de cette production d'énergie, est que la transformation de la lumière en électricité s'effectue sans bruit ni pollution.

Le régulateur solaire régule automatiquement la charge des batteries

Le régulateur solaire régule la charge du parc batteries afin d'éviter les surcharges ou les décharges trop profondes des batteries :

- il limite, voir stoppe, la charge de la batterie solaire par le module photovoltaïque quand la batterie est complètement chargée ;
- il ralentit la décharge par délestage de l'utilisation, voir même l'arrêt total, afin d'éviter les décharges profondes risquant d'endommager les batteries.

Le régulateur solaire indique en permanence l'état de fonctionnement du panneau photovoltaïque et l'état de charge de la batterie solaire. Cet affichage se fait soit via des LEDs, soit via un écran digital intégré ou déporté.

Le stockage de l'électricité dans les batteries solaires

Les batteries solaire, appelées aussi batteries à décharge lente, stockent l'énergie produite par les modules photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation des consommateurs en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert).

Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple.

La capacité d'une batterie s'exprime en Ah (Ampère/heure) et sa tension est de 12

Volts (le plus souvent), 6V ou parfois 2V (pour les installations photovoltaïques les plus importantes).

Le convertisseur de tension ou onduleur

Un convertisseur, ou onduleur, transforme le courant continu des batteries (12V ou 24V ou 48V) en courant alternatif 230 Volts.

Pour cela, **il suffit de raccorder les bornes situées sur le convertisseur aux cosses des batteries** en respectant la polarité des deux, soit + sur +, - sur -. Les appareils électriques que vous souhaitez alimenter sont ensuite simplement branchés sur la ou les prises 220/230 V du convertisseur (nota : la somme des puissances des appareils branchés sur le convertisseur doit être inférieure à la puissance indiquée pour le convertisseur). Souvent il est intéressant de faire alimenter par ce convertisseur un petit tableau électrique sécurisé par des fusibles (et/ou des disjoncteurs) à partir duquel plusieurs lignes électriques alimenteront les consommateurs.

Il existe deux types de convertisseurs : quasi-sinus ou pur sinus. Le signal électrique émis par un onduleur quasi sinus est moins régulier que celui d'un pur sinus. Cela implique que **l'utilisation d'un onduleur quasi sinus est recommandée avec les appareils électriques qui ne sont ni inductifs ni électroniques** : éclairage à incandescence, fer à repasser, cafetière, plaques, four, convecteur, frigo, radio, TV cathodique...

Pour les autres appareils (écrans plasma ou LCD, ordinateurs, matériel de mesure, ...) nous recommandons fortement l'utilisation de convertisseurs pur sinus.

Il est préconisé de **minimiser autant que possible la distance du câble Régulateur - Batterie et Batterie - Onduleur** (inférieur à 6m) afin d'éviter les déperditions d'électricité. La grande majorité des fabricants propose des appareils précâblés sur 1 à 2m.

Chapitre 5: Autres sources d'énergies renouvelables

5.1 Les familles d'énergie renouvelables

5.1.1 Énergie solaire

5.1.2 Énergie éolienne

5.1.3 Énergie hydraulique

5.1.4 Biomasse

5.1.5 Géothermie

5.2 Les différentes énergies renouvelables dans le monde

5.3 Rentabilité

5.1 Les familles d'énergie renouvelables [8]

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, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales, génèrent des emplois

Le solaire (solaire photovoltaïque, solaire thermique), l'hydroélectricité, l'éolien, la biomasse, la géothermie sont des énergies flux inépuisables par rapport aux « énergies stock » tirées des gisements de combustibles fossiles en voie de raréfaction : pétrole, charbon, lignite, gaz naturel. Entrez dans l'univers des énergies renouvelables : Quelles sources d'énergies ? Pour quels besoins ? Comment les capter, les transformer ? Sous quelle forme les utiliser ?

- L'énergie solaire
 - L'énergie solaire photovoltaïque
 - Le Solaire thermique basse température
 - Le solaire thermique haute température
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique - Hydroélectricité
 - La grande hydraulique
 - La petite hydraulique
 - Les énergies marines
- La biomasse
 - Bois énergie
 - Le biogaz
 - Les biocarburants
- La Géothermie
- Architecture bioclimatique

5.1.1 Énergie solaire

➤ Energie solaire thermique basse température

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus. Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct".

Tous les dispositifs qui agissent comme capteurs solaires thermiques sont de plus en plus intégrés dans les projets d'architecture bioclimatique (maisons solaires, serres, murs capteurs, murs Trombe...).

➤ Energie solaire thermique haute température

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 C et 1 00C.

La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'héliothermodynamie.

Trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

- Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole.
- Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.
- Troisième technologie : des capteurs cylindro-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.

Après plusieurs années de sommeil la filière solaire haute température repart de plus belle notamment dans les pays de la « sun belt ».



Figure 5.1 : Energie solaire thermique

5.1.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de stockage ou de production de remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. La production électrique éolienne peut être prévue avec une assez bonne précision. Sa part dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,8 % en 2018 et est estimée à 5,3 % en 2019. Les principaux pays producteurs sont la Chine (28,4 % du total mondial en 2019), les États-Unis (21,2 %) et l'Allemagne (8,8 %).

5.1.3 Énergie hydraulique

À L'image des moulins à eau de jadis, l'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du XIXe siècle. L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau.

L'énergie hydraulique représente 19% 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.

► La grande hydraulique

Est l'énergie issue des barrages. Cette énergie se compose de deux filières, appelées La grande hydraulique et la petite hydraulique.

La différence entre ses deux appellations, est d'une part relative à la puissance électrique, et d'autre part dépendant du seuil fixé par la commission européenne.

Ainsi, L'hydroélectricité ou production d'électricité par captage de l'eau est apparue au milieu du XIXe siècle.

L'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique qui injecte les Kilowattheures sur le réseau.

L'énergie hydraulique est utilisée depuis des siècles pour produire de l'énergie mécanique. L'hydroélectricité commence à se développer dans les années 1880 (invention en France de la turbine en 1827).

Les turbines électriques ont quasi complètement remplacé les usages mécaniques à la fin du XIXe siècle en Europe. Le développement des réseaux et la recherche d'économies d'échelle aboutissent au développement de la grande hydraulique dès les années 30 au détriment des petites installations.



Figure 5.2 : Energie grande hydraulique

► La petite hydraulique

Si toutes les installations de petite puissance sont regroupées sous le terme de petite centrale hydraulique (PCH), on distingue la pico-centrale : inférieure à 20 kW, la microcentrale : de 20 kW à 500 kW, la mini-centrale : de 500 kW à 2 MW, et la petite centrale : de 2 à 10 MW.

Construite au fil de l'eau, la petite hydroélectricité ne demande ni retenue ni vidanges ponctuelles susceptibles de perturber l'hydrologie, la biologie ou la qualité de l'eau.

Les microcentrales hydroélectriques fonctionnent comme les grandes centrales des barrages qui exploitent l'énergie des fleuves. Le potentiel français de création de PCH est estimé à au moins 1 000 MW.

Énergie décentralisée, la petite hydroélectricité maintient ou crée une activité économique dans les zones rurales.



Figure 5.3 : Energie petite hydraulique

► Les énergies marines

La filière des énergies marines appelées aussi énergie des océans ou thalasso-énergies, comprend le développement des technologies et la maîtrise et l'exploitation des flux d'énergies naturelles fournies par les mers et les océans. On recense : la houle, l'énergie des vagues, l'énergie des courants, l'énergie des marées et l'énergie thermique des mers (ETM) qui travaille sur le gradient thermique entre les couches d'eau de surface et celle des profondeurs.

L'hydroélectricité marine fait appel à des techniques connues : usine marémotrice de la Rance (barrage marémoteur) ou en pleine expérimentation : houlogénérateurs (systèmes à colonne d'eau oscillante, systèmes à déferlement), hydroliennes (hélices sous-marines ou éoliennes sous-marines), ailes planes battantes ou oscillantes, roues à aubes flottantes...



Figure 5.4 : Energie marines

5.1.4 Biomasse

Elle Comprend trois familles principales :

- 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.

- **Les bois énergie ou biomasse solide**

Le bois est une énergie renouvelable. C'est la principale ressource ligneuse, mais il faut également prendre en compte d'autres matières organiques telles que la paille, les résidus solides des récoltes, les grappes de maïs, la bagasse de la canne à sucre, les grignons d'olives.

En France, comme dans la plupart des pays européens, le prélèvement forestier reste inférieur à l'accroissement naturel de la forêt le bilan carbone est donc positif.

Il existe aujourd'hui des appareils à combustible bois innovants et efficaces à disposition des particuliers comme des collectivités ou des industries. Les chaudières à biomasse brûlent différents biocombustibles : granulés de bois, bûches, plaquettes forestières, sciures ou copeaux.



Figure 5.5 : la biomasse solide

- **Le biogaz**

Ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). On l'appelle aussi « gaz naturel renouvelable » ou encore « gaz de marais », par opposition au gaz d'origine fossile.

Mélange de méthane et de gaz carbonique additionné de quelques autres composants, le biogaz est un gaz combustible.

Il sert à la production de chaleur, d'électricité ou de biocarburant.

Le biogaz peut être directement capté dans les centres d'enfouissement des déchets ou produit dans des unités de méthanisation.

Sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, boues des stations d'épurations, lisiers, animaux ou déchets agricoles peuvent être méthanisés dans des unités industrielles.



Figure 5.6 : le biogaz

- Les biocarburants

Les biocarburants, parfois appelés agro carburants, sont issus de la biomasse. Il existe principalement deux filières industrielles : l'éthanol et le biodiesel. Ils peuvent être utilisés purs comme au Brésil (éthanol) ou en Allemagne (biodiesel), ou comme additifs aux carburants classiques.

L'éthanol est produit en France à 70 % à partir de la betterave, et à 30 % à partir de céréales. Le biodiesel est issu des graines oléagineuses (colza, tournesol).

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples.



Figure 5.7 : le biocarburant

5.1.5 Géothermie

Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière 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).

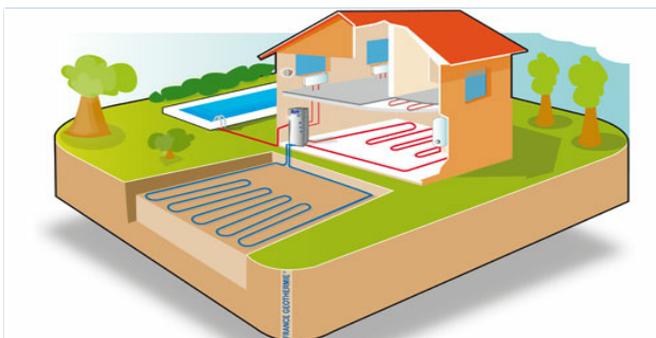


Figure 5.8 : la géothermie

Architecture bioclimatique

Architecture passive, maison solaire, bâtiment à énergie positive, haute qualité environnementale, haute performance énergétique ... sont autant de noms pour parler de l'architecture bioclimatique.

Ce mode de conception architectural consiste à trouver le meilleur équilibre entre le bâtiment, le climat environnant et le confort de l'habitant.

L'architecture bioclimatique tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air pour réduire les besoins énergétiques, maintenir des températures agréables, contrôler l'humidité et favoriser l'éclairage naturel.



Figure 5.9 : Architecture bioclimatique

5.2 Les différentes énergies renouvelables dans le monde

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. De plus, la production peut être centralisée ou décentralisée. En revanche, elle se caractérise par un rendement relativement faible, un coût important et une intermittence de la ressource. Des systèmes utilisant l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde. Ils deviennent de plus en plus efficaces et rentables.

Mais l'utilisation des ressources renouvelables, en dehors des grands hydrauliques, reste généralement limitée aux sites isolés où le coût des systèmes renouvelables devient compétitif par rapport aux autres moyens de production d'électricité du fait de l'acheminement très coûteux de l'électricité. [1]

5.3 Rentabilité [16]

Les énergies solaire et éolienne fourniront plus du tiers de l'énergie mondiale d'ici 2040.

Mais aujourd'hui, il y a de l'espoir pour la transition vers une énergie propre. Selon un rapport de Bloomberg (la plus grande agence d'informations financières dans le monde), les énergies solaire et éolienne fourniront plus du tiers de l'énergie mondiale

d'ici 2040. Le document va plus loin et prédit **que les énergies propres seront bientôt plus rentables que le charbon ou le pétrole.**

En effet, les baisses spectaculaires des coûts de production de l'énergie solaire laissent croire que dans cinq ans, les énergies alternatives seront moins chères que le charbon dans de nombreux pays, dont la Chine, le Royaume-Uni et l'Inde. **La France devrait également, dans une certaine mesure, suivre ce trend favorable.**

Les données de Bloomberg ajoutent que le coût de l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques a diminué de près de 75 % depuis 2009 et devrait baisser de 66 % d'ici 2040. Les coûts de production d'énergie éolienne terrestre ont diminué de 30 % depuis 2009 et la tendance devraient se maintenir d'ici 2040.

On pourra par ailleurs se faire une idée bien meilleure sur la question en se référant au rapport de la Commission de Régulation de l'énergie (CRE) sur la rentabilité des énergies renouvelables. Ce rapport révèle en effet, un net rebond de la rentabilité des nouvelles énergies. Tout ceci laisse entrevoir que **la transition énergétique va bientôt surfer sur les vagues de la rentabilité.** Investir dans les énergies renouvelables est aujourd'hui une solution d'épargne alternative viable.

Les experts de l'Irena estiment en effet que chaque fois que le parc **renouvelable** mondial double sa puissance, les coûts se réduisent de 14% pour l'éolien en mer, 21% pour l'éolien terrestre, 30% pour le solaire à concentration et de 35% pour le photovoltaïque.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Etude D'un Système Autonome De Production D'énergie Couplant Un Champ Photovoltaïque, Un Electrolyseur Et Une Pile A Combustible : Réalisation D'un Banc D'essai Et Modélisation, thèse, Docteur de l'Ecole des Mines de Paris, Déc.2003.
- [2] : <https://www.un.org/fr/chronicle/article/le-role-des-combustibles-fossiles-dans-un-systeme-energetique>
- [3] : <ftp://ftp.fsr.ac.ma/cours/physique/bargach/chap12.pdf>
- [4] : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- [5] : https://fr.wikipedia.org/wiki/Combustible_nucl%C3%A9aire
- [6] : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne
- [7] : https://eolienne.f4jr.org/parc_eolien
- [8] : Cours découverte systemes énergétiques autonomes , M2 ESE (version power point), Mme MAZOUZ-LEKHAL.N, Déc. 2017.
- [9] : <https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/eolienne-domestique/>
- [10] : N. KHORCHEF : "Etude du convertisseur Superboost appliqué aux systèmes photovoltaïque ", Faculté Génie Electrique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf USTOMB, Thèse de Magistère 2009.
- [11] : N. MAZOUZ : " développement d'un convertisseur DC/DC pour l'optimisation du rendement d'un système photovoltaïque ", Faculté Génie Electrique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf USTOMB, Thèse de Doctorat ES-Science 2014.
- [12] : N. MAZOUZ : " Contrôle flou d'un générateur photovoltaïque (GPV) alimentant un système moteur pompe ", Faculté Génie Electrique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf USTOMB, Thèse de Magistère 2005.
- [13] : www.hespul.org, Rapport rédigé par Violaine Didiersous la direction de Bruno Gaidon.
- [14] : BENATIALLAH.D : "Détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie" faculté des sciences et de la technologie, université africaine Ahmed draia Adrar, Thèse de Doctorat ES-Science 2019.
- [15] : <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/presentation-generale-d-une-installation-photovoltaique-pour-site-isole-presentation-d-une-installation->

[photovoltaïque-type-29](#)

[16] : <https://blog.tudigo.co/investir-dans-les-energies-renouvelables-un-pari-rentable/>

Annexe

UEF 2.2.1 Matière : Systemes Energétiques Autonomes

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.

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 : Systemes hybrides

Systemes 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 :

Contrôle continu : 40 % ; Examen final : 60 %.

Référence:

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)
- 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)
6. <http://www.cder.dz/spip.php?article1442>