

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Polycopié de cours UED 1.1 intitulé

◆

Energies Renouvelables

◆

Dr. KECHIDA RIDHA

Année universitaire 2020/2021

Ce cours est destiné aux étudiants en première année master électrotechnique

Table des matières

1. Introduction aux énergies renouvelables	
1.1. Introduction.....	1
1.1.1. Définition de l'énergie renouvelable.....	1
1.1.2. Les énergies renouvelables traditionnelles et nouvelles.....	1
1.1.3 L'énergie renouvelable est inépuisable et abondante.....	2
1.2. Caractéristiques de base des énergies renouvelables.....	2
1.3. Énergies renouvelables et changement climatique.....	3
1.3.1. Les raisons du changement climatique.....	3
1.3.2. Stratégies contre le changement climatique.....	4
1.4. Les énergies renouvelables et le développement durable.....	4
1.4.1. Principes d'exécution du développement durable.....	4
1.5. Les énergies renouvelables, l'emploi et la sécurité énergétique.....	5
1.5.1. Les énergies renouvelables et l'emploi.....	5
1.5.2. La sécurité énergétique.....	5
1.5.3. Les coûts externes ou coûts sociaux dans le secteur de l'énergie.....	5
1.6 Résumé.....	6
2. Energie solaire (photovoltaïque et thermique)	
2.1 Introduction.....	7
2.2 L'énergie solaire.....	7
2.3 L'énergie solaire photovoltaïque.....	8
2.4 Types de modules solaires.....	9
2.4.1 Modules fixes.....	9
2.4.2 Système avec poursuite solaire (Trackers solaires)	9
2.4.3 Modules sous concentration.....	9
2.5 Cellules Photovoltaïques.....	9
2.5.1 Historique.....	10
2.5.2 Différentes technologies.....	10

2.6 Principe de fonctionnement du panneau solaire.....	11
2.7 Avantages et inconvénients spécifiques du photovoltaïque.....	12
2.7.1 Avantages.....	12
2.7.2 Inconvénients.....	12
2.8 Différents types de systèmes photovoltaïques.....	13
2.8.1 Les systèmes autonomes.....	13
2.8.2 Les systèmes hybrides.....	14
2.8.3 Les systèmes connectés au réseau.....	14
2.9 Modélisation d'un Panneau photovoltaïque.....	15
2.10 Différents modèles électriques d'une cellule PV.....	15
2.10.1 Modèle de base.....	15
2.10.2 Modèle idéal.....	15
2.10.3 Modèle avec pertes ohmiques.....	16
2.10.4 Modèle à une diode.....	16
2.11 Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	17
2.12. Caractéristique d'une cellule photovoltaïque.....	18
2.12.1 Caractéristique courant-tension.....	18
2.12.2 Caractéristique Puissance-Tension.....	19
2.12.3 Facteur de forme FF.....	19
2.12.4 Rendement.....	19
2.13 Module photovoltaïque.....	19
2.13.1 Architecture classique d'un générateur photovoltaïque.....	21
2.13.2 Protection des cellules.....	22
3. Energie éolienne	
3.1 Introduction.	23
3.2 L'histoire de l'éolienne.....	23
3.3 Evolution mondiale de l'énergie éolienne.....	24
3.4 Description et caractéristiques.....	24
3.4.1 Fonctionnement d'une éolienne.....	24
3.5 Différents types d'éoliennes.....	26

3.5.1 L'éolienne à axe horizontal.....	26
3.5.2 L'éolienne à axe vertical.....	27
3.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne.....	28
3.6.1 Les avantage.....	28
3.6.2 Les inconvénients.....	28
3.7 Production et différentes sortes d'éoliennes.....	28
3.7.1 Production.....	28
3.7.2 Différentes sortes d'éoliennes.....	29
3.8 Aspects économiques.....	29
3.8.1 Prix des éoliennes.....	29
3.8.2 Coûts de la production d'électricité.....	30
3.9 Conclusion.....	30
3.10 Exemple : Fiche technique de l'éolienne	31
4. Autres sources renouvelables : hydraulique	
4.1. Intérêts de l'énergie hydraulique.....	32
4.2. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques.....	32
4.2.1 Puissance d'une chute d'eau.....	32
4.3. Les ouvrages nécessaires au fonctionnement de la centrale.....	33
4.4. Impact social et environnemental.....	34
4.5. Différents types de centrales.....	34
4.5.1. Les centrales de hautes chutes.....	34
4.5.2. Les centrales de moyennes chutes.....	35
4.5.3. Les centrales de basses chutes.....	36
4.6. Le coût de revient pour la production d'électricité par moyen de production...	37
4.7. Avantages et inconvénients.....	38
4.7.1 Avantages.....	38
4.7.2 Inconvénients.....	38

Bibliographie

Chapitre 1

Introduction aux énergies renouvelables

1.1. Introduction

Toutes les énergies utilisées par l'homme proviennent de l'une des sources suivantes :

- l'énergie rayonnante émise par le Soleil (énergie-solaire), principalement sous deux formes :
 1. l'énergie solaire directe,
 - 2- l'énergie solaire capturée sous la forme de combustibles biomasse ou fossiles ;
- l'énergie géothermique de l'intérieur de la Terre ;
- l'énergie des marées provenant de l'attraction de la lune ; et
- l'énergie nucléaire.

1.1.1 Définition de l'énergie renouvelable

Les énergies sont dites "renouvelables" tant qu'elles dépendent du système écologique de la Terre, de l'insolation et de l'énergie géothermique de la Terre. En pratique, les sources énergétiques renouvelables font allusion à :

- la puissance hydraulique ;
- l'énergie biomasse ;
- l'énergie solaire ;
- l'énergie éolienne ;
- l'énergie géothermique ; et
- l'énergie de la mer.

Grâce aux énergies renouvelables, nous disposons de sources d'énergie qui peuvent être utilisées sans qu'elles émettent de substances toxiques, et qui se renouvellent constamment par des processus naturels si bien que, elles seront disponibles à l'infini.

1.1.2 Les énergies renouvelables traditionnelles et nouvelles

On fait parfois une distinction entre les renouvelables 'traditionnelles' et les 'nouvelles' ou 'modernes'. Alors que le terme 'traditionnel' s'applique à l'utilisation de la biomasse, et ce principalement dans le cas de l'énergie domestique surtout dans les pays en développement, celui des énergies renouvelables 'nouvelles' regroupe les formes d'énergies renouvelables modernes et durables.

Les sources énergétiques renouvelables sont habituellement considérées comme étant un élément de réponse aux enjeux environnementaux, sociaux et économiques actuels. En 2006, les énergies renouvelables représentaient environ 18 % de la consommation d'énergie primaire dans le monde : principalement de biomasse traditionnelle. Cependant les énergies "nouvelles", c'est-à-dire le solaire, l'éolien et l'énergie marémotrice contribuaient à hauteur de seulement 0,2 % de l'utilisation énergétique primaire dans le monde (figure 1.1).

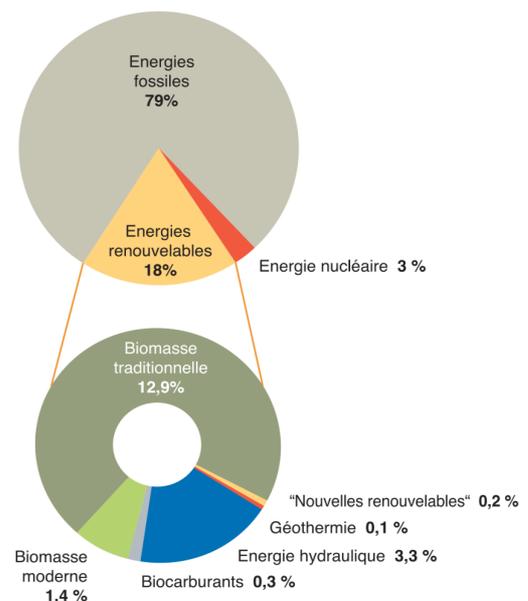


Fig. 1: Structure de la consommation mondiale d'énergie finale en 2006

La majeure partie de ces énergies renouvelables provient de la biomasse et de l'énergie hydraulique, des grandes centrales hydrauliques essentiellement (figure 1.2). En général, les sources d'énergies renouvelables sont des sources énergétiques indigènes; ainsi ont-elles le potentiel de fournir des services énergétiques avec le risque 0 ou presque 0 polluant et gaz à effet de serre.

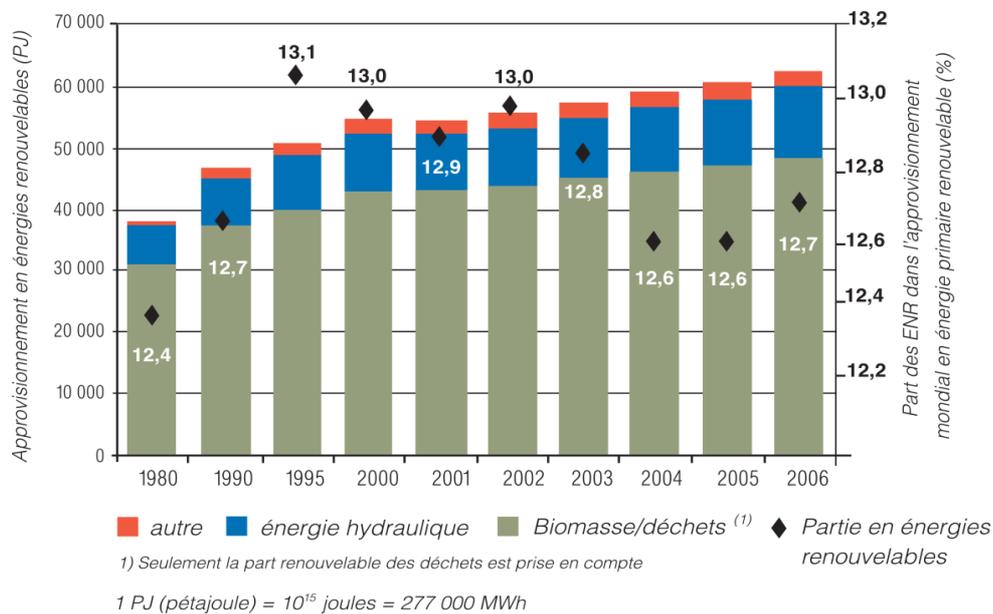


Figure 1.2: Evolution de l'approvisionnement mondial en énergie primaire renouvelable

1.1.3 L'énergie renouvelable est inépuisable et abondante

Les combustibles fossiles (ainsi que les combustibles nucléaires) ne sont pas éternels et ont démontré qu'ils sont à la source de nombreux problèmes environnementaux. Il est clair qu'un jour les énergies renouvelables devront dominer le système énergétique mondial.

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages: elles

- sont disponibles dans le monde entier;
- sont inépuisables;
- sont écologiques et contribuent à la protection de l'environnement;
- comportent peu de risques;
- réduisent la dépendance vis-à-vis des importations d'énergie;
- augmentent la création de valeur sur place et créent des emplois;
- contribuent ainsi à la réduction de la pauvreté; et
- assurent la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

1.2 Caractéristiques de base des énergies renouvelables

1. **L'énergie solaire** se manifeste sous forme de chaleur solaire à basse température, chaleur solaire à haute température, électricité éolienne et photovoltaïque. La chaleur solaire à **basse température** est produite par l'absorption de la lumière du Soleil par des surfaces assombries qui la convertissent en chaleur pour être utilisée pour chauffer de l'eau ou d'autres fluides. La chaleur solaire à **haute température**, au contraire, est obtenue en faisant concentrer la lumière du soleil et les fluides de chauffage à haute température pour générer de l'électricité.
2. **Le photovoltaïque** (appelé aussi électricité solaire) est la transformation directe du composant ultraviolet de la lumière du soleil en électricité dans des endroits appropriés.

3. **L'énergie éolienne** est générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. La plupart des parcs éoliens sont aujourd'hui constitués d'éoliennes (connectées en réseau) qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Les moulins à vent –qui ont été des applications du vent au début du siècle dernier - sont pour la plupart utilisés aujourd'hui pour le pompage de l'eau.
4. **L'énergie géothermique** se manifeste sous forme d'eau chaude ou de vapeur et peut être utilisée pour le chauffage ou pour la production d'électricité dans certaines régions spécifiques. Actuellement les technologies utilisant l'énergie géothermique favorisent la production de l'électricité et sont encore à un stade de développement embryonnaire.
5. **La puissance hydraulique** est indirectement liée au rayonnement solaire qui évapore l'eau des océans pour former avec la pluie les rivières des continents. On construit des barrages sur les rivières pour constituer des réservoirs, qui garantissent une production stable en eau pour produire de l'électricité. On différencie généralement les grandes centrales hydro-électriques de puissance électrique supérieure à 10MW et les petites centrales.
6. **La biomasse** (déchets organiques) représente une partie relativement faible de l'énergie solaire qui est transformée par la photosynthèse. Alors que le rendement énergétique-rapport entre la production (énergie produite) et le productible estimé pour la photosynthèse est moins de 0,5 %, un panneau photovoltaïque a un rendement de 10 à 15 %. Une partie de ces déchets a été enterrée depuis très longtemps (environ 290 millions d'années) par les sédiments et tremblements de terre puis transformée par l'action des bactéries en charbon, pétrole et gaz qui constituent actuellement les ressources en combustibles fossiles (qui ne sont pas renouvelables). La biomasse est considérée habituellement comme énergie renouvelable sauf si son exploitation contribue à la déforestation.

Les énergies renouvelables peuvent couvrir toute forme de besoins énergétiques. Une caractéristique très importante de la plupart des énergies renouvelables est néanmoins qu'elles sont de nature intermittente. Le Soleil ne brille que pendant la journée et l'énergie éolienne par exemple n'est pas disponible régulièrement. Cette caractéristique constitue en soi un inconvénient de la plupart des énergies renouvelables avec toutefois une exception notable pour l'énergie géothermique, et à un moindre degré la puissance hydraulique et la biomasse. Pour contourner cette nature intermittente de l'énergie renouvelable, on doit avoir recours à des appareils de stockage relativement coûteux (comme les batteries pour les systèmes photovoltaïques ou citernes de stockage d'eau pour la puissance hydraulique) ce qui augmente considérablement les coûts du système complet.

1.3 Énergies renouvelables et changement climatique

1.3.1 Les raisons du changement climatique

Le système énergétique mondial actuel est fortement dépendant de l'utilisation des combustibles fossiles. Le charbon, le pétrole et le gaz dans le monde représentent presque 80 pour cent de la consommation d'énergie primaire. Les combustibles fossiles constituent la première source d'émissions de gaz carbonique (CO₂). Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le GIEC, la concentration en gaz carbonique a atteint des volumes de 385 ppm par rapport aux 280 d'il y a deux cents ans à l'aube de la révolution industrielle.

Le réchauffement climatique est un phénomène d'augmentation de la température moyenne des océans et de l'atmosphère à l'échelle mondiale sur plusieurs décennies. Entre 1906 et 2005, la température moyenne au niveau du sol a augmenté de **0,74 °C**. La décennie entre 2000 et 2009 a montré de loin les plus hautes températures jamais mesurées.

En l'an 2000 le gaz carbonique représentait 78 % des émissions des gaz à effet de serre anthropiques, suivi du méthane (14 %).

1.3.2 Stratégies contre le changement climatique

Les trois principales stratégies pour réfréner les émissions de CO₂ sont:

- une utilisation plus efficace de l'énergie, spécialement dans le transport, la construction et le processus de production ;
- l'accroissement de la confiance dans les sources d'énergie renouvelable ;
- le développement accéléré et le déploiement de nouvelles technologies énergétiques de pointe avec zéro émission nocive (telle la technologie d'hydrogène).

La pertinence de ces différents points dépend du niveau de développement de la région ainsi que de la disponibilité des ressources naturelles et technologiques. Il y a cependant d'énormes différences dans les systèmes énergétiques des pays en développement et industrialisés (OCDE) comme indiqué dans la figure 3.

	Combustibles fossiles (%)	Energie renouvelable (%)	Nucléaire (%)	Taux d'accroissement, toutes ressources (%/an, 1971-2000)
OCDE	82,7	6,2	11,0	1,6
Pays en développements	71,7	27,6	0,7	3,9

% de la consommation

Figure 1.3: Différents systèmes énergétiques

1.4. Les énergies renouvelables et le développement durable

Les services énergétiques sont fondamentaux pour le développement social et économique – ils jouent un rôle important, p.ex. pour éradiquer la pauvreté, pour garantir la qualité de vie, pour développer des milieux ruraux et urbains et pour améliorer l'égalité des chances.

1.4.1 Principes d'exécution du développement durable

En prenant en compte les différentes technologies et options pour le secteur énergétique, un cadre global de neuf programmes d'exécution forme la condition essentielle pour un système énergétique à développement durable dans le monde :

- les services énergétiques pourraient être développés et étendus grâce à des progrès énergétiques efficaces, grâce aux renouvelables et aux technologies à faible pollution et à faibles risques, de manière à développer des ressources et à minimaliser les risques de catastrophes écologiques;
- l'exploitation des sources d'énergies renouvelables ne devrait pas excéder leur facteur de régénération;
- les dégâts écologiques dus à la consommation énergétique devraient être maintenus à des niveaux n'excédant pas les capacités de l'écosystème à se régénérer et/ou à s'adapter;
- l'utilisation des technologies énergétiques avec des potentiels à haut risque devrait être minimisée;
- les services énergétiques devraient être fournis à moindre coût en prenant en compte les coûts externes;
- la transition des systèmes énergétiques traditionnels vers ceux à développement durable devrait être mise en œuvre de façon que les effets sur l'emploi et autres aspects sociaux soient positifs. Les impacts négatifs devant être limités à des niveaux que pourraient compenser d'autres politiques;

1.5. Les énergies renouvelables, l'emploi et la sécurité énergétique

1.5.1. Les énergies renouvelables et l'emploi

Les industries des énergies renouvelables et les secteurs de services sont en croissance rapide dans de nombreux pays. Il est évident que la promotion systématique de telles technologies nouvelles offre de grandes opportunités pour :

- l'innovation ;
- le développement des marchés énergétiques locaux ou régionaux ; ainsi que
- la création de nouveaux emplois avec des exigences de qualification très différentes.

De manière générale, les énergies renouvelables sont importantes pour l'emploi local et pour la création de revenus, résultat de la production, du développement de projet, des prestations de service et – dans le cas de la biomasse – de l'emploi rural.

Habituellement, les sites où on exploite les énergies renouvelables

- sont décentralisés ;
- modulaires en taille ;
- ont des coûts d'exploitation bas et des délais courts de construction.

1.5.2. La sécurité énergétique

Il est très coûteux de maintenir la sécurité énergétique aujourd'hui dans les pays industrialisés. Ces coûts ne sont pas inclus dans le prix du combustible, mais souvent cachés et on les retrouve dans les dépenses militaires et de sécurité. Les prix volatiles du marché mondial pour les sources énergétiques conventionnelles, en particulier les produits pétroliers, font courir des risques importants à une grande partie de la stabilité mondiale économique et politique avec parfois des effets dramatiques sur les pays en développement importateurs d'énergie. Dans ce contexte, les énergies renouvelables peuvent aider à diversifier l'approvisionnement énergétique et à augmenter la sécurité énergétique.

1.5.3. Les coûts externes ou coûts sociaux dans le secteur de l'énergie

Les coûts externes des énergies renouvelables sont très bas et ils sont parfois même égalisés par les bénéfices externes comme la réduction des gaz à effet de serre due à l'utilisation des énergies "vertes". En général, l'économie classique ne prend pas en compte les coûts externes. Mais sans leur intégration, les énergies renouvelables ne peuvent pas devenir concurrentielles et des potentiels investisseurs seront dissuadés.

Dans le tableau ci-dessous, l'électricité issue de l'énergie éolienne est d'abord plus chère que l'énergie du charbon, mais quand on intègre les coûts externes, elle s'avère être moins chère.

Source d'électricité	Cents US par kWh		
	Coûts de production *	Coûts externes **	Coût total
Houille / lignite	4,3 - 4,8	2 - 15	6,3 - 19,8
Gaz naturel	3,4 - 5,0	1 - 4	4,4 - 9,0
Nucléaire	10 - 14	0,2 - 0,7	12,2 - 14,7
Biomasse	7 - 9	1 - 3	8 - 12
Hydraulique	2,4 - 7,7	0 - 1	2,4 - 8,7
Photovoltaïque	25 - 50	0,6	25,6 - 50,6
Eolien	4 - 6	0,05 - 0,25	4,05 - 6,25

* États Unis et Europe

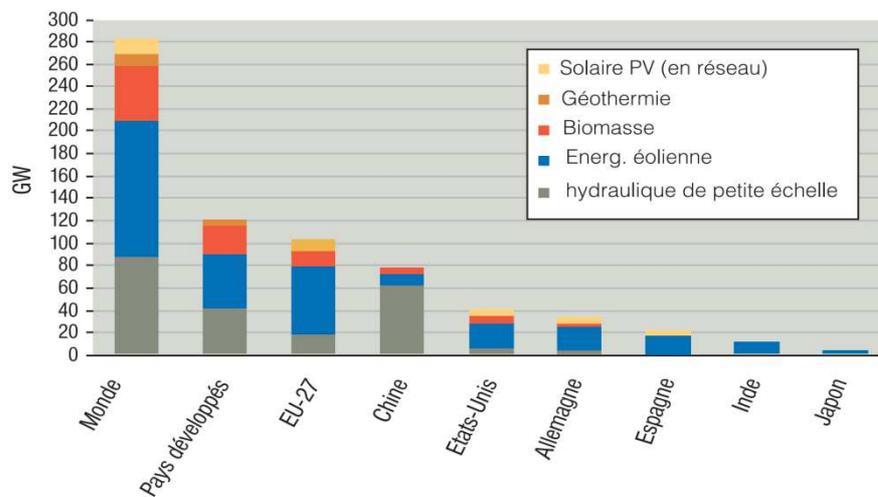
** Coûts environnementaux et de santé pour 15 pays en Europe

Figure 1.4: Les coûts d'électricité avec et sans les coûts externes, calculés en cents (US)

1.6 Résumé

Comme nous venons de voir, le plein potentiel et les avantages des énergies renouvelables ne ressortent pas pleinement aujourd'hui parce que les coûts des combustibles fossiles ne reflètent pas leur coût total. Ils sont fortement subventionnés dans de nombreuses parties du monde et leurs coûts externes, tels les coûts supplémentaires liés à leur impact sur la santé et à l'environnement, ne sont pas pris en considération.

À l'échelle mondiale, la puissance électrique installée à partir des énergies renouvelables a atteint les 280 GW en 2008, ce qui signifie une hausse de 75 pour cent par rapport au 160 GW installés en 2004. Les pays les plus importants sont la Chine (76 GW), les États-Unis (40 GW), l'Allemagne (34 GW), l'Espagne (22 GW), l'Inde (13 GW) et le Japon (8 GW). La capacité installée dans les pays en développement a également connu une hausse importante et a atteint 119 GW en 2008 .



Notes : n'inclut pas l'énergie hydraulique à grande échelle

Figure 1.5: Capacités des énergies renouvelables, pays en développement, UE et 6 premiers pays, 2008

Chapitre 2

Energie Solaire

2.1 Introduction

Le Soleil constitue une énorme source d'énergie dans laquelle nous baignons en permanence. L'homme a compris depuis longtemps l'intérêt pour lui d'exploiter une telle source de lumière et de chaleur. Actuellement, il existe deux voies d'utilisation de l'énergie solaire qui transforment directement le rayonnement en chaleur ou en électricité, respectivement le solaire thermique et le solaire photovoltaïque. Toutefois, l'exploitation de cette source énergétique est récente et se développe mais reste encore très coûteuse.

L'énergie solaire fait partie des énergies renouvelables. Par définition, les énergies dites renouvelables sont potentiellement inépuisables. La nature peut les reconstituer assez rapidement, contrairement au gaz, au charbon et au pétrole, dont les réserves, constituées après des millions d'années, sont limitées. Les énergies solaires, éolienne, hydraulique, géothermique et de biomasse en sont les formes les plus courantes. Trois facteurs militent en faveur des énergies renouvelables :

- la sauvegarde de l'environnement ;
- l'épuisement inévitable des ressources (pétrole, gaz, ..) limitées de la planète ;
- les considérations économiques (coût).

2.2 L'énergie solaire

Ce que l'on désigne par énergie solaire est le rayonnement émis dans toutes les directions par le Soleil et que la Terre reçoit à raison d'une puissance moyenne de $1,4 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, pour une surface perpendiculaire à la direction Terre-Soleil. Ce flux solaire est atténué lors de la traversée de l'atmosphère par absorption ou diffusion, suivant les conditions météorologiques et la latitude du lieu ; au niveau du sol, la puissance restante est de l'ordre de $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ sous nos latitudes. La quantité d'énergie utilisable varie entre 800 et $7 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ suivant le lieu.

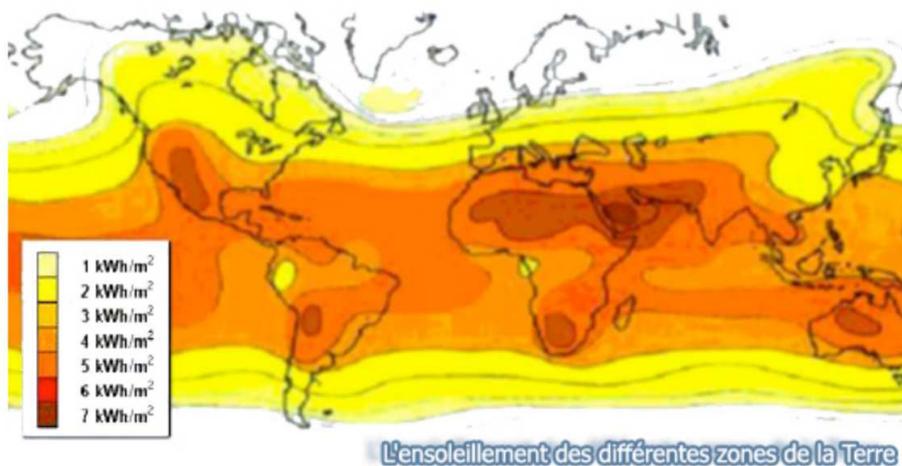


Figure 2.1: L'ensoleillement différentes zones de la terre

Le rayonnement solaire sur terre varie avec la position du soleil dans le ciel, donc avec les saisons et avec les conditions météorologiques (ciel clair, nuage, neige...). La position du soleil dans le ciel change constamment pendant la journée, position caractérisée par l'élévation ou altitude et l'azimut.

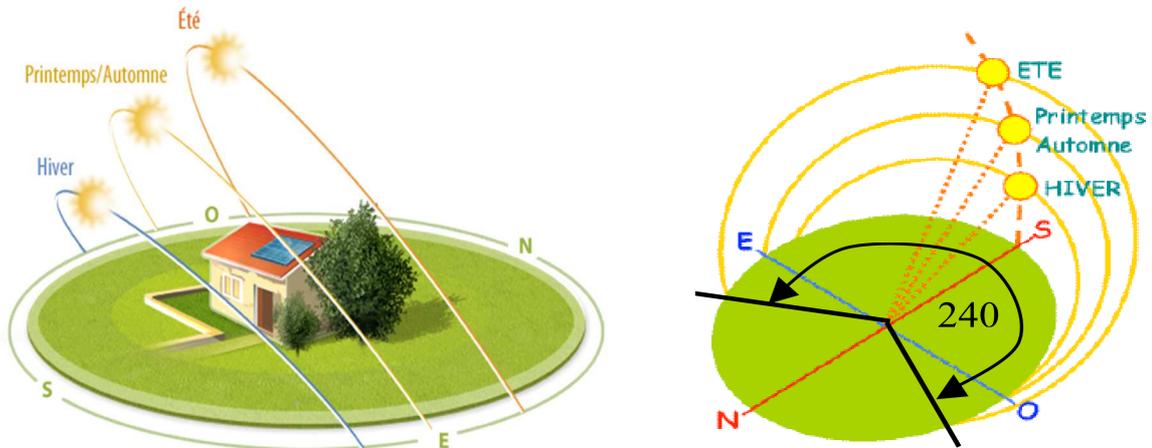


Figure 2.2: Variations horaires et saisonnières

L'énergie solaire transforme le rayonnement solaire en électricité ou en chaleur, selon les technologies.

- **L'énergie solaire photovoltaïque** produit de l'électricité via des modules photovoltaïques, électricité qui peut être ensuite injectée sur les réseaux électriques.
- **L'énergie solaire thermique** produit de la chaleur qui peut être utilisée pour le chauffage domestique ou la production d'eau chaude sanitaire.
- Enfin, **l'énergie solaire thermodynamique** produit de l'électricité via une production de chaleur.

2.3 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

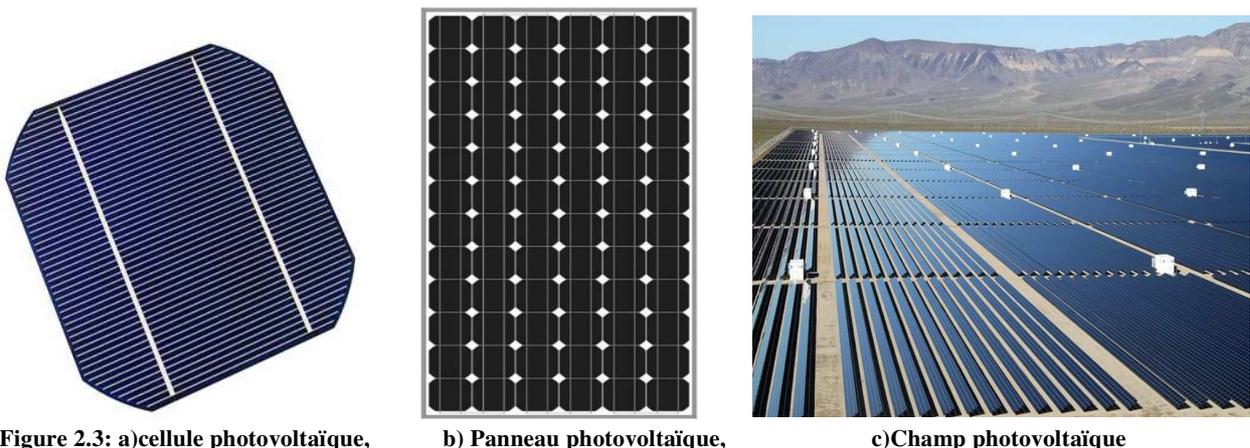


Figure 2.3: a) cellule photovoltaïque,

b) Panneau photovoltaïque,

c) Champ photovoltaïque

2.4 Types de modules solaires

2.4.1 Modules fixes

C'est la configuration la plus classique, les modules sont installés sur des supports fixes avec une position fixe elle aussi. Certains supports fixes permettent cependant un réajustement de l'angle d'orientation suivant les saisons. Les matériaux métalliques utilisés pour la fabrication des supports ne doivent pas altérer physiquement et chimiquement les modules (acier inox, alu anodisé, acier galvanisé).



Figure 2.4: Panneau photovoltaïque fixe

2.4.2 Système avec poursuite solaire (Trackers solaires)

Des systèmes de poursuite solaire un axe (d'est en ouest) ou 2 axes peuvent augmenter de façon assez significative la production d'énergie électrique de 20 à 40% suivant le lieu d'installation. Ces matériels sont surtout utilisés aux USA pour des systèmes couplés au réseau électrique local et pour le pompage solaire.

Les avantages des trackers solaires sont multiples :

- ✚ Orientation optimale en permanence sur plus de 240° d'Est en Ouest, le tracker solaire suit la course du soleil.
- ✚ Les panneaux solaires sont très bien ventilés.
- ✚ Plus de production pour moins de surface de panneaux solaires ce qui fait du tracker solaire une solution bien plus écologique.
- ✚ Faible emprise au sol, ce qui permet la culture habituelle des sols.
- ✚ Monté sur mât, le tracker solaire n'est pas soumis aux ombres basses.



Figure 2.5: Système avec poursuite solaire

2.4.3 Modules sous concentration

Dans ce cas, on utilise des systèmes optiques pour concentrer l'énergie incidente sur des cellules solaires de haut rendement. Des considérations de coût et de mise en œuvre doivent alors être établies pour le concentrateur, les cellules solaires et les systèmes à concentration de lumière doivent être accompagnés de système de poursuite solaire car dans ce cas, c'est la seule composante du rayonnement solaire, à savoir le rayonnement direct, qui peut contribuer à l'amélioration du rendement énergétique global du système. Ces systèmes sont plus particulièrement utilisés pour les applications installées aux faibles latitudes et ne sont peu ou pas utilisés en Europe; ils sont cependant plus particulièrement utilisés et testés aux USA.



Figure 2.6: Système sous concentration

2.5 Cellules Photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques (photon : grain de lumière et volt: unité de tension) convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension. Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires.



Figure 2.7: La chaîne de fabrication du photovoltaïque

2.5.1 Historique

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

1839: Découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre Edmond Becquerel. Il avait observé que certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. Il démontra qu'il s'agissait d'une conversion directe de la lumière en électricité.

1954: Trois chercheurs américains, Gerald Pearson, Daryl Chapin et Calvin Fuller, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

2.5.2 Différentes technologies

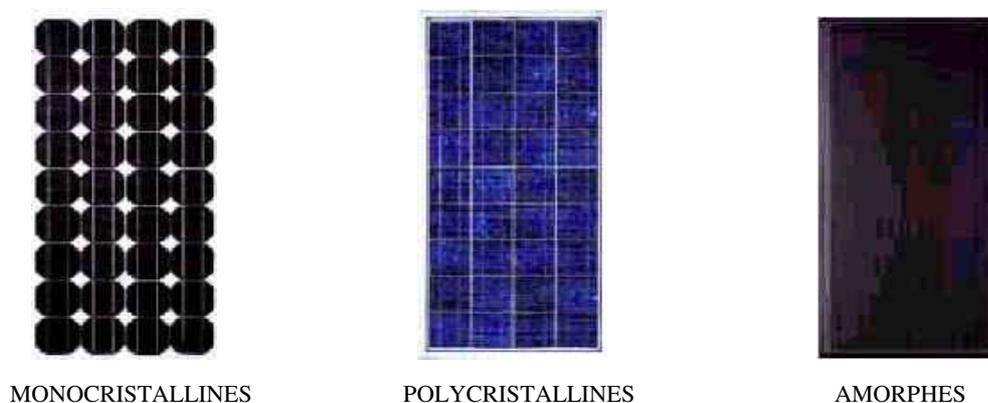


Figure 2.8: Les différents technologies du panneau photovoltaïque

Le panneau photovoltaïque est constitué de cellules, et celles-ci font l'objet de nombreuses recherches au fil du temps pour que leurs performances soient toujours de plus en plus importantes. On trouve donc sur le marché, plusieurs technologies qui se côtoient :

- **Amorphe:** ce sont les cellules les moins performantes puisqu'elles ont un rendement compris entre 5% et 7%
- **Monocristalline:** une cellule simple qui possède l'un des meilleurs rendements actuel puisque celui-ci est compris entre 15% et 18%
- **Polycristalline:** moins chère que la monocristalline, elle reste un très bon rapport qualité/prix avec un rendement compris entre 10% et 14%
- **Tandem:** il s'agit de l'empilement de deux cellules simple dans des domaines spectraux connexes. Elles permettent d'avoir un excellent rendement mais leur prix est assez élevé.

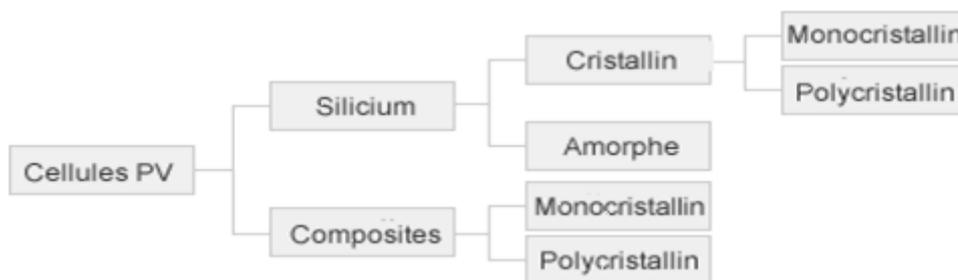


Figure 2.9: Différentes cellules du panneau photovoltaïque

2.6. Principe de fonctionnement du panneau solaire

Les panneaux solaires convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique. Ils sont composés de cellules photovoltaïques. Ces cellules sont constituées de matériaux semi-conducteurs qui peuvent libérer leurs électrons sous l'action d'une énergie (ici l'énergie lumineuse). La libération des électrons des matériaux constituant les cellules sous l'action des photons permet ainsi la production d'un courant électrique.

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photo-sensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. En effet, une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment :

- pour la couche N, apport d'électrons ;
- pour la couche P, déficit d'électrons.

Le cœur d'une cellule photovoltaïque est constitué d'une **jonction P-N** :

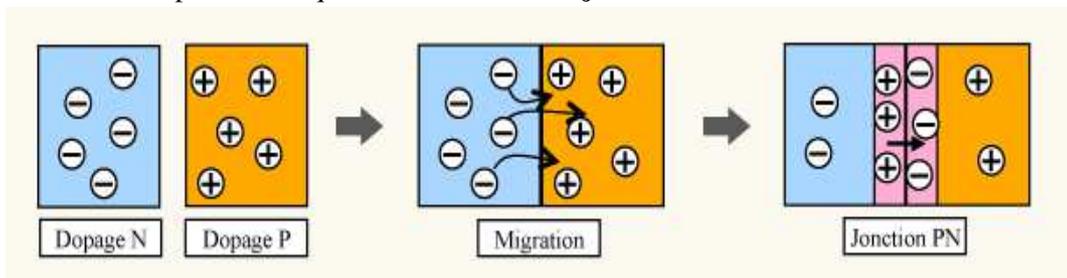


Figure 2.10 : Jonction P-N

L'effet photovoltaïque est à la source du courant produit par une cellule photovoltaïque :

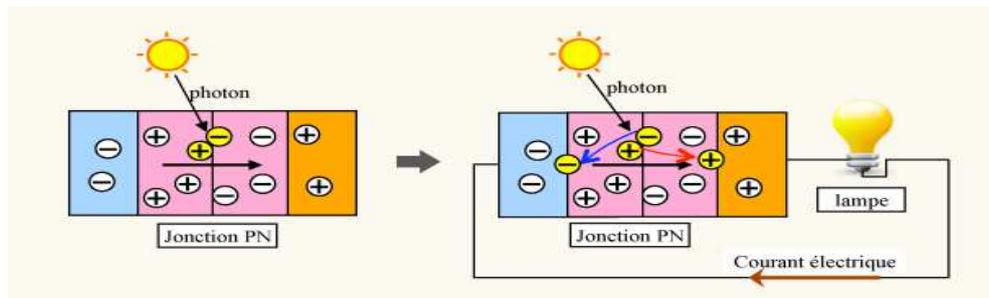


Figure 2.11: Principe de fonctionnement du panneau solaire

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée.

Sous l'action de la lumière (photons) ces cellules génèrent une tension électrique qui se mesure en volt. La tension obtenue est l'ordre de 0,5 V par cellule. Ces cellules sont ensuite assemblées série et parallèle pour former des panneaux.

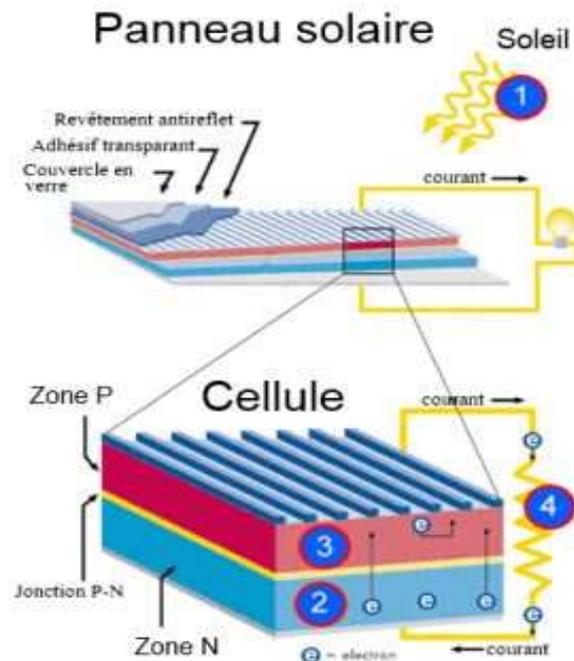


Figure 2.12: Description d'une cellule

2.7 Avantages et inconvénients spécifiques du photovoltaïque

2.7.1 Avantages

Par rapport aux autres sources renouvelables, la photovoltaïque offre des avantages particuliers:

- ✓ Elle est exploitable pratiquement par tout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- ✓ L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- ✓ Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- ✓ Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique,...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- ✓ La maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée.

2.7.2 Inconvénients :

- ✓ La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.
- ✓ Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- ✓ Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.
- ✓ Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher.

2.8 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques, **les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau**. Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

2.8.1 Les systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure 2.13, qui traduit les différentes possibilités offertes: couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

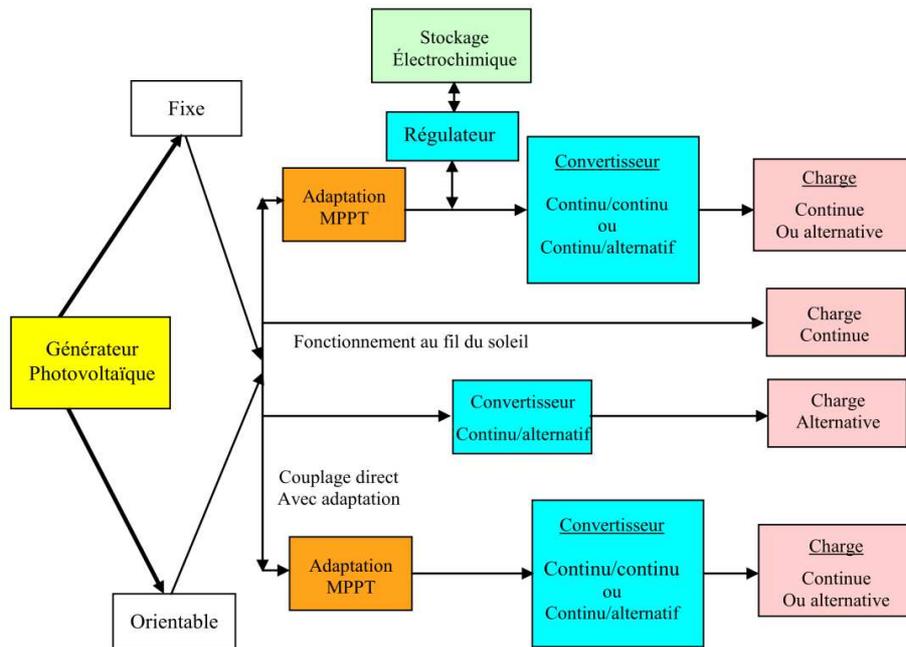


Figure 2.13 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.



Figure 2.14: Schéma d'un système de pompage au fil de soleil

2.8.2 Les systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif .

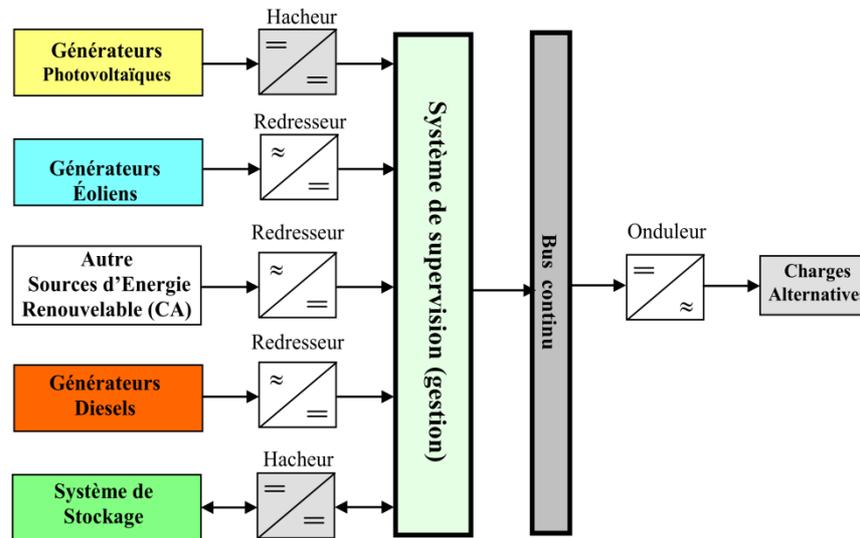


Figure 2.15 : Configuration du système hybride à bus continu.

2.8.3 Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau (Figure 2.16) sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau.

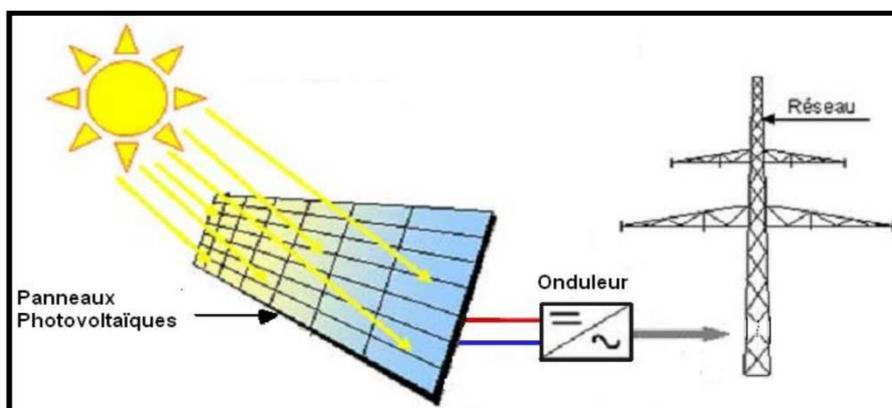


Figure 2.16 : Systèmes photovoltaïque connectés au réseau

2.9 Modélisation d'un Panneau photovoltaïque

Les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Il existe plusieurs types de sources d'énergies renouvelables parmi eux : l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque.

La modélisation et la caractérisation électriques des panneaux actuellement commercialisés sont nécessaires afin d'optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Ceci peut réduire d'une manière considérable le coût de l'installation et augmenter le rendement des générateurs PV.

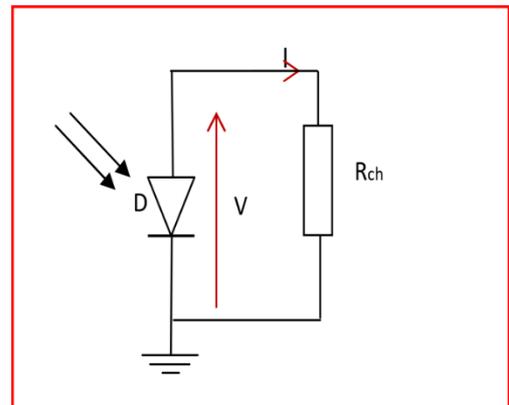
Dans ce chapitre, nous allons définir la cellule photovoltaïque, et leur paramètres, et les différents modèle électrique d'une cellule photovoltaïque, le module photovoltaïque, caractéristique d'un module photovoltaïque, l'effet de la variation de l'ensoleillement et de la température ainsi que la résistance série et parallèle, la protection et enfin le générateur photovoltaïque.

2.10 Différents modèles électriques d'une cellule PV

2.10.1 Modèle de base

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, ainsi lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant "I" traversant une charge R_{ch} , et une tension "V" au borne de cette charge.

Figure 2.17: Schéma d'application de l'effet photovoltaïque



2.10.2 Modèle idéal

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque représentée dans la figure 2.18, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source du courant produit le photon courant I_{ph} qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G.

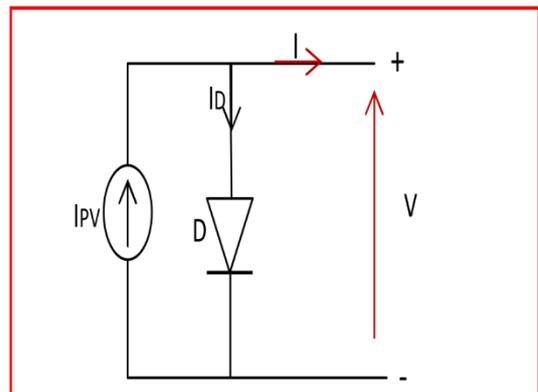


Figure 2.18: Modèle idéal de circuit équivalent d'une cellule PV

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit:

$$I = I_{PV} - I_D \quad (2.1)$$

avec:

I : courant fourni par la cellule

I_{PV} : photon-courant de la cellule proportionnel à l'éclairement (G)

$$I_D : I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\alpha V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{avec: } V_T = \frac{k.T}{q}$$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrit comme suit:

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{\alpha V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

V_T : Potentielle thermodynamique.

k: la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T: la température de la cellule en Kelvin.

q: la charge d'un électron $q=1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

α : le facteur d'idéalité de la jonction.

V : la tension aux bornes de la cellule.

2.10.3 Modèle avec pertes ohmiques

Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent.

Après analyse du circuit, l'équation courant- tension est donnée comme suit :

$$I = I_{PV} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+I R_s}{\alpha V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

avec R_s : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions

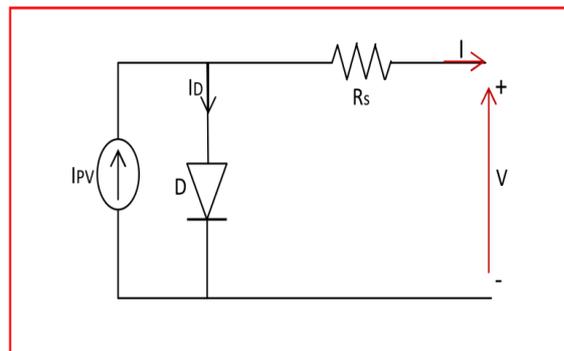


Figure 2.19: Modèle avec pertes ohmiques de circuit équivalent d'une cellule PV

2.10.4 Modèle à une diode

Ce modèle est désigné aussi par R_{sh} -Model. Ce model tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_s mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_{sh} . C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires. Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires.

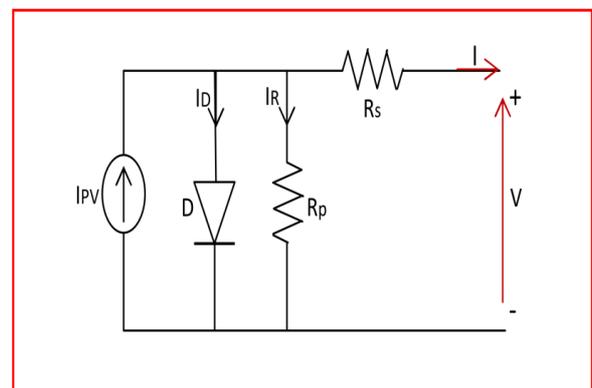


Figure 2.20: Modèle à une diode de circuit équivalent d'une cellule PV

2.11 Paramètres d'une cellule Photovoltaïques

Il existe de nombreux paramètres qui permettent caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique I(V). La figure 2.21 représente une caractéristique courant-tension I(V) dans la noire et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le trace de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètre physiques caractéristiques du composant les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension a circuit ouvert (V_{co}) et la puissance maximale.

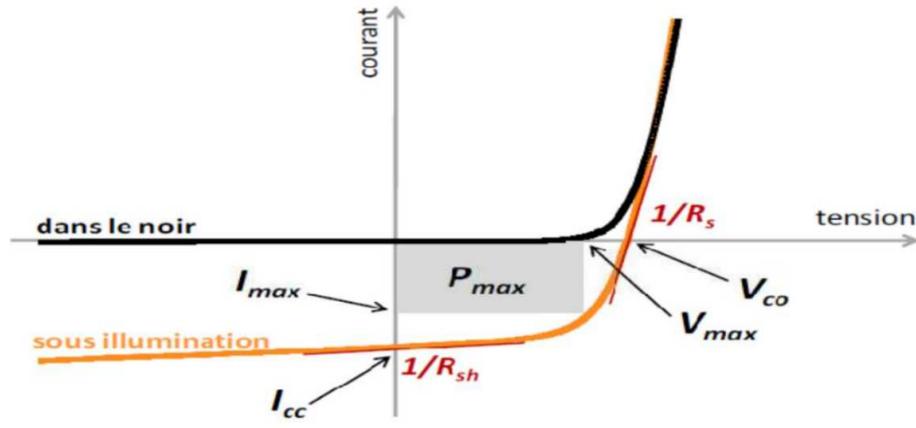


Figure 2.21: Caractéristique courant tension et paramètre physique d'une cellule PV.

➤ Le courant de court-circuit I_{cc}

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (2.3), on obtient:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{n \cdot k \cdot T_c} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (2.5)$$

Il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

➤ La tension de circuit ouvert V_{co}

C'est la tension V_{co} pour laquelle, le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \cdot \left(e^{\left(\frac{q V_{pv}}{n \cdot k \cdot T_c} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} \quad (2.6)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à

$$V_{co} = V_{th} \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (2.7)$$

$$\text{Ou: } V_{th} = \frac{n \cdot k \cdot T_c}{q}$$

➤ **Le courant optimal**

C'est le courant pour lequel la puissance est maximale noté : I_{OP}

➤ **La tension optimale**

C'est la tension pour laquelle la puissance est maximale noté : V_{OP}

➤ **Puissance maximale**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{OP} , V_{OP}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}).

➤ **La puissance maximale idéale**

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} idéale correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} :

$$P_{max\ idéal} = I_{cc} \cdot V_{co} \quad (2.8)$$

En réalité, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum V_{OP} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni I_{OP} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

2.12 Caractéristique d'une cellule Photovoltaïques

2.12.1 Caractéristique courant-tension

C'est une caractéristique fondamentale de la cellule solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairage fixe et une température constante, figure (2.22).

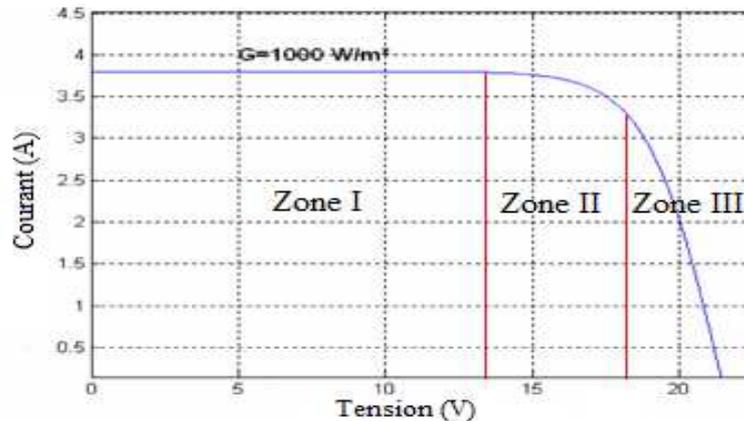


Figure 2.22: Caractéristique I(V) d'une cellule solaire, avec les différentes zones, $T=25^{\circ}\text{C}$

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement ; seule la courbe I (V) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (2.22) représente trois zones essentielles:

- **La zone(I)** : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (II)** : correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (III)** : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

2.12.2 Caractéristique Puissance-Tension

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes, figure (2.23). Le point «M» représente la puissance maximale débitée par le module.

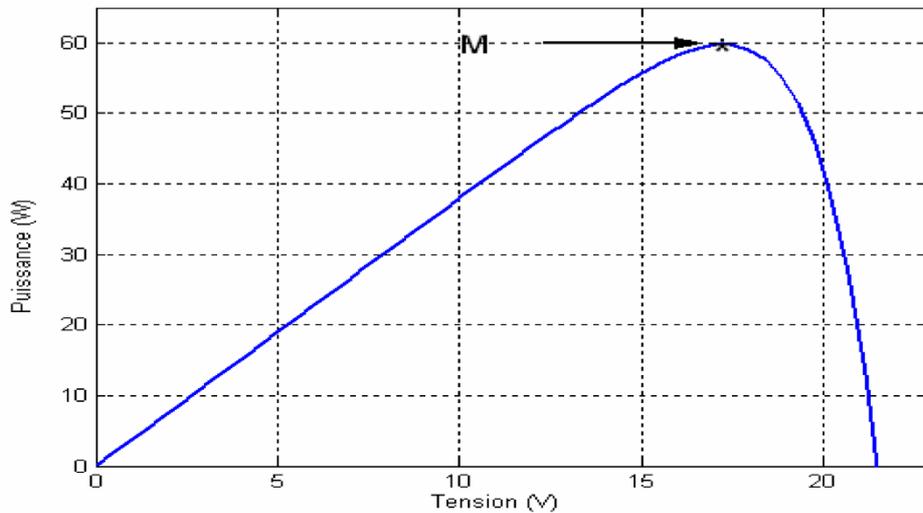


Figure 2.23. Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C.

2.12.3 Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV: c'est le facteur de remplissage ou de forme (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{\max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{co}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable sera également. Les meilleures cellules auront donc fait l'objet de compromis technologiques pour atteindre le plus possible les caractéristiques idéales. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (2.9)$$

2.12.4 Rendement

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

2.13 Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire.

Le module photovoltaïque utilisé pour la détermination des paramètres intervenant dans le rendement est le "BP solar MSX60". Nous avons implanté le modèle représentant ce module sous Matlab-Simulink et nous avons simulé son fonctionnement sous des conditions d'ensoleillement et de température variantes pour en déduire l'effet de chaque paramètre sur notre module PV.

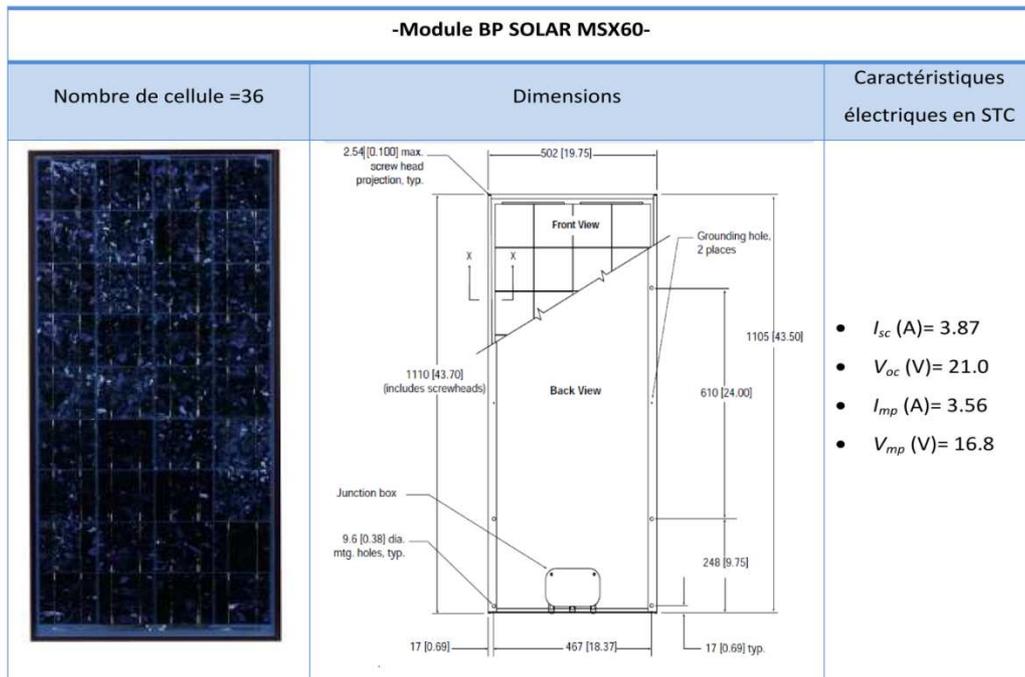


Figure 2.24: Caractéristiques physiques et électrique du Module BP SOLAR MSX60

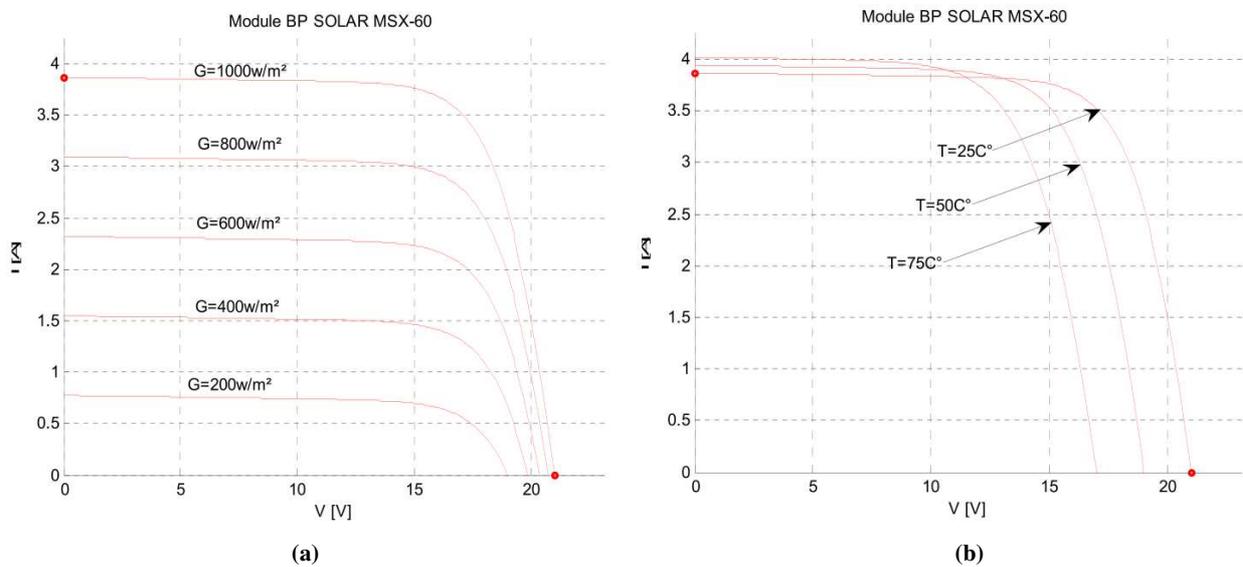


Figure 2.25: (a) caractéristique de la courbe I-V pour T constante (T=25°C), G variable; (b) caractéristique de la courbe I-V pour G constante (G=1000w/m2), et T variable

D'après la courbe ci-dessus nous remarquons que l'irradiation a un impact très remarquable sur le courant I_{sc} , ainsi ce dernier augmente avec la croissance de l'irradiation. Ainsi nous pouvons conclure que le rendement d'un module PV augmente considérablement avec l'augmentation de l'irradiation G.

La température a un impact sur la tension V_{oc} , comme le démontre la courbe ci-dessus le V_{oc} diminue avec la croissance de la température. Ainsi nous pouvons conclure que la température a un impact négatif sur le rendement d'un module PV.

2.13.1 Architecture classique d'un générateur photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C), un exemple de puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm² est d'environ 2.3 W_c sous une tension de 0.5V. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Une association de n_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, figure 2.26 L'équation (2.11) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.

$$V_{co_{n_s}} = n_s \cdot V_{co} \quad \text{avec} \quad I_{cc} = I_{cc_{n_s}} \quad (2.11)$$

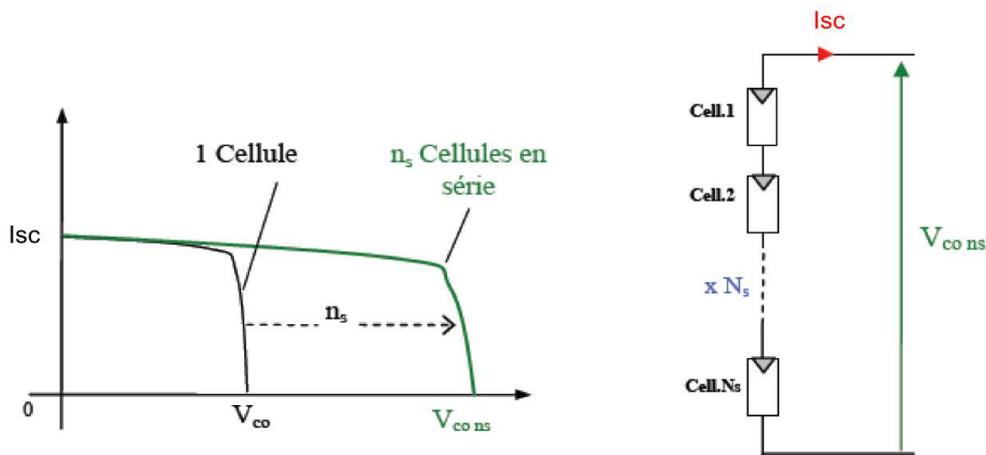


Figure 2.26: Caractéristiques résultantes d'un groupement de n_s cellules en série

D'autre part, une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, figure 2.27. L'équation (2.12) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules.

$$I_{sc_{n_p}} = n_p \cdot I_{sc} \quad \text{avec} \quad V_{co_{n_p}} = V_{co} \quad (2.12)$$

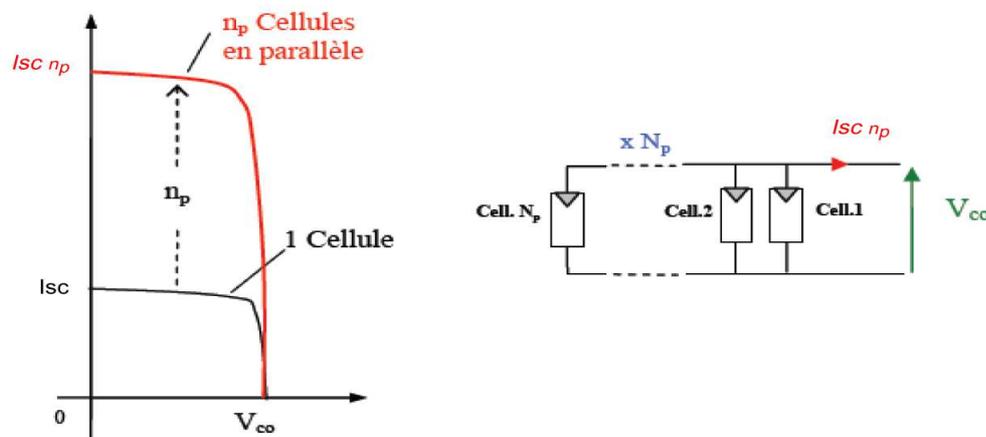


Figure 2.27: Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle

2.13.2 Protection des cellules

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles, figure (2.28).

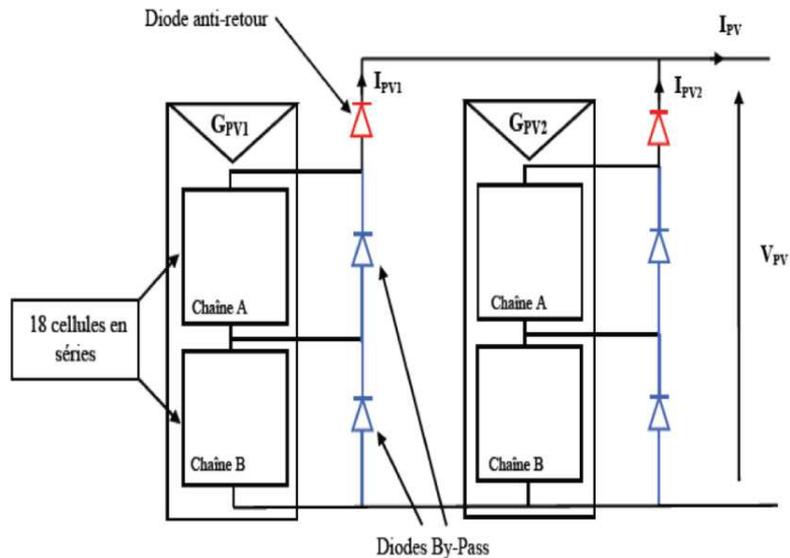


Figure 2.28: Exemples d'association sécurisée de deux modules PV Commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle.
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

Chapitre 3

Energie éolienne

3.1 Introduction

La question que nous nous sommes posés est une question vitale pour l'avenir de la planète. En effet, les énergies polluantes (hydrocarbures, nucléaire) ne sont pas inépuisables, et si rien n'est fait pour les remplacer, la crise de l'énergie qui risquerait alors de se produire serait la plus grande catastrophe au monde.

De plus, le réchauffement de la planète oblige ceux qui veulent la sauvegarder à utiliser des énergies non polluantes, car la concentration de l'atmosphère en CO₂ a augmenté de 20 % en 150 ans et la concentration en méthane (CH₄, un gaz à effet de serre comme le CO₂) a augmenté de 140%. Les conséquences de ce réchauffement de la planète seraient désastreuses si rien n'était fait pour le stopper, ou tout du moins le ralentir.

Il faut donc chercher d'autres solutions pour produire de l'énergie, et ce dès maintenant, avant qu'il ne soit trop tard. On estime que le vent distribue entre 1.5 et 4 milliards MW par heure, il est donc logique que l'on pense à exploiter cette formidable ressource. L'éolienne est donc une de ces énergies renouvelables qui prennent de l'ampleur.

3.2 Histoire de l'éolienne

L'utilisation de la force du vent n'est pas nouvelle, on a retrouvé la trace de systèmes fixes de conversion du vent qui remontent à 2000 ans avant J-C, et l'utilisation du vent pour la navigation date peut-être de 5000 ans. Certains pays ont depuis le Moyen-âge largement fait usage de ce type d'énergie par le biais de moulins à vent pour moudre le grain ou pomper l'eau.

Les années 1970 à 2000 ont vu une importante évolution à la fois de leur utilisation par le monde et de leur conception, bénéficiant des progrès technologiques et scientifiques dans les domaines de l'aérodynamique, la structure, les matériaux, l'électronique, etc. L'accroissement de nos besoins énergétiques suscite en effet leur développement et leur mise en œuvre. De par notre mode de vie, nous avons créé une forte demande d'énergie ; de plus, confrontés aux réductions des réserves, aux augmentations des coûts et aux impacts écologiques des énergies traditionnelles, nous sommes amenés à proposer des alternatives intéressante et renouvelable pour compléter ces sources traditionnelles, et l'éolienne constitue une source d'énergie adéquate car fiable, inépuisable et sans conséquences indésirables sur l'environnement, s'inscrivant notamment dans l'effort global de réduction des émissions des gaz à effet de serre.

3.3 Evolution mondiale de l'énergie éolienne

Depuis 1994, le marché mondial de l'énergie éolienne a augmenté de 30% par an. L'activité éolienne mondiale est principalement localisée en Europe. La capacité mondiale de production d'énergie éolienne est passée de 10000 MW à 55000 MW de 1998 à 2005.

L'Allemagne reste le leader avec une puissance produite équivalente à la moitié de la production mondiale (18400 MW). L'Espagne avec une croissance annuelle de 28% connaît la plus importante progression sur les 3 dernières années.

Les industries et les activités de recherches sont principalement concentrées en Europe. Ainsi, 8 des 10 entreprises éoliennes les plus importantes sont européennes et ont représenté 70% des ventes mondiales d'équipement en 2005.

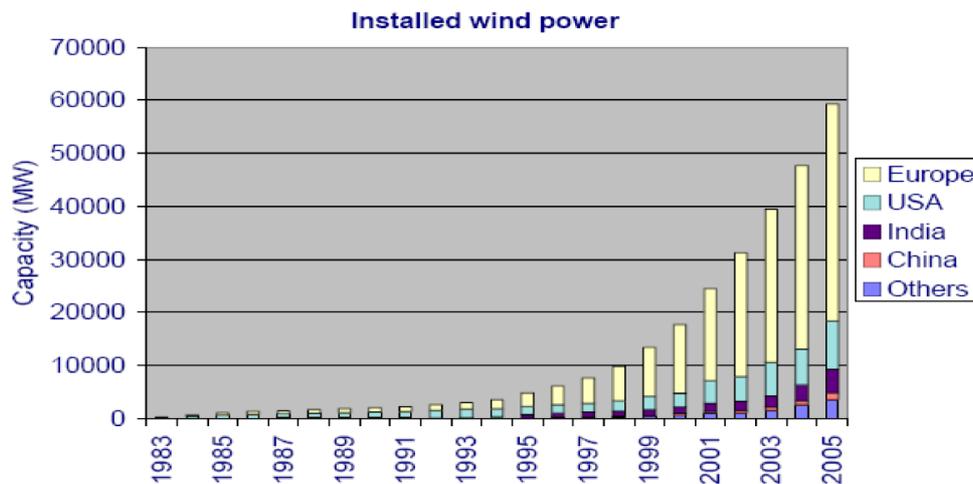


Figure 3.1: Evolution de la capacité de production mondiale

À l'échelle mondiale la capacité éolienne installée s'est développée très rapidement et les prévisions prévoient que cette évolution se poursuivra. En effet, l'éolien constitue un moyen de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de freiner la dépendance des différents acteurs aux produits pétroliers et d'améliorer la fiabilité du réseau électrique. Les importantes capacités de production éolienne installée en Europe, en particulier en Allemagne (18400 MW), en Espagne (10027 MW) et au Danemark (3122 MW) montrent que le vent peut être un moyen de production d'énergie à grande échelle.

3.4 Description et caractéristiques

3.4.1 Fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée de plusieurs éléments (figure 3.2). Tout d'abord,

- **Le mât:** c'est une tour cylindrique qui peut dépasser 120 m de hauteur. Les câbles électriques de raccordement au réseau et l'échelle d'accès sont situés à l'intérieur.
- **La nacelle** est située en haut du mât et contient la plus grande partie de l'installation électrique:
 - Le générateur, qui produit de l'électricité grâce à la rotation des pales.
 - Le multiplicateur, qui sert à augmenter le nombre de tours effectués par les pales de l'éolienne.
 - Les équipements servant à freiner les éoliennes et à l'orienter.

- **Le rotor** est constitué de plusieurs pales (construites en matériaux composites, polyester, époxy, fibres de verre, fibres de carbone ou bois) de longueur environ égale aux 2/3 de celle du mât. Les alliages d'aluminium et d'acier, trop lourds, servent uniquement aux petites pales.

L'éolienne est reliée au réseau électrique par des câbles souterrains.

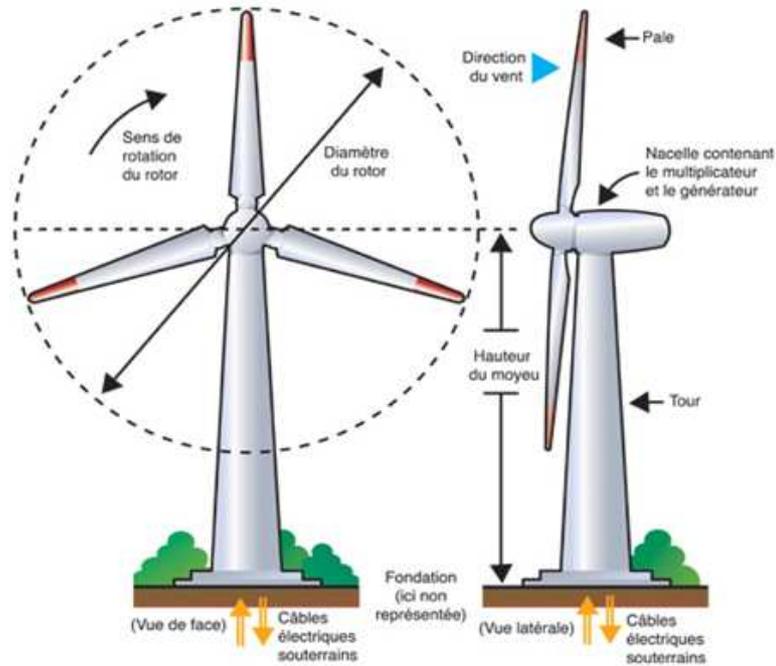


Figure 3.2: Schémas d'ensemble d'une éolienne

La construction d'une éolienne est rapide (environ une à deux semaines) et le démantèlement aussi. Il est toutefois regrettable que le bloc de béton soit souvent laissé sur place lors du démantèlement. Les éoliennes sont installées pour une durée d'environ vingt ans. L'éolienne utilise la force motrice du vent pour produire de l'électricité. Sous l'effet du vent, les pales tournent, ce qui entraîne le rotor. Le multiplicateur de vitesse augmente la vitesse de rotation du rotor (de 12-15 tours/min à 1500 tours/min).

Dans la nacelle (figure 3.3), l'alternateur produit de l'électricité. L'électricité est transportée à l'aide du transformateur de puissance. Elle est ensuite véhiculée par chacune des éoliennes à partir d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

- 1: Rotor
- 2: Pâles
- 3: Multiplicateur
- 4: Génératrice
- 5: Mécanisme d'orientation de la nacelle
- 6: Système hydraulique
- 7: Frein

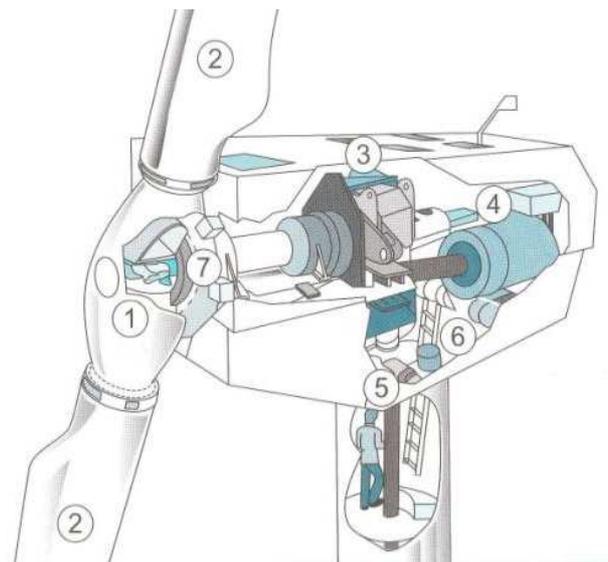


Figure 3.3: Les différents composants de la nacelle d'une grande éolienne

La vitesse minimale du vent pour faire fonctionner une éolienne est d'environ 4 m/s, soit 14.5 km/h. L'éolienne s'arrête automatiquement à partir de vents soufflant à plus de 25 m/s, soit 90 km/h. La vitesse optimale du vent pour l'éolienne est d'environ 12 m/s, soit 43 km/h. La force du vent influe sur la production d'une éolienne, donc sur l'endroit où elle doit être construite. La vitesse du vent doit être optimale et il faut également que le vent ne souffle pas dans tous les sens, autrement l'éolienne ne pourrait pas tourner correctement. Entre les cols, au sommet des collines, près de la mer, les éoliennes sont particulièrement efficaces.

Betz a prouvé par la loi qui porte son nom que les éoliennes ne peuvent transformer que 60 % de l'énergie totale du vent en énergie mécanique au maximum. Actuellement, les éoliennes arrivent à transformer plus de 55 % de l'énergie du vent pour les plus modernes. On se rapproche donc des limites.

Les éoliennes modernes et industrielles ont généralement 3 pales, car une éolienne à une pale ne pourrait pas tourner, les éoliennes ayant un nombre pair de pales sont soumises à des contraintes importantes car deux pales se retrouvent à la verticale l'une de l'autre et plus l'éolienne possède de pales, plus elle coûte cher.

Les éoliennes ayant plus de pales sont également moins performantes car la masse d'air déplacée par une pale gêne la pale suivante. Trois est donc le chiffre qui a été en général reconnu par les constructeurs d'éoliennes.

3.5 Différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles: celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

3.5.1 L'éolienne à axe horizontal

Cette éolienne a besoin de s'orienter par rapport au vent pour fonctionner. L'hélice de ce type d'éolienne est perpendiculaire au vent sur un mât qui varie de 10 à 100 m en général. Elle possède entre 1 et 4 pales. L'hélice peut être en amont de la machine par rapport au vent, on dit alors que l'éolienne est à «hélice au vent». Dans le cas contraire, l'éolienne est à «hélice sous le vent». C'est le type le plus répandu à l'heure actuelle car c'est celui qui possède le rendement le plus élevé.



Figure 3.4: Les différents types d'éoliennes.

3.5.2 L'éolienne à axe vertical

La particularité de ce type d'éolienne est qu'elle n'ont pas besoin de s'orienter par rapport au vent. Cependant, leur rendement est plus faible que celui des éoliennes à axe horizontale. Il existe deux types différents: **Darrieus** et **Savonius**.

- Le type Darrieus: Il est caractérisé par une vitesse de rotation élevée. Dans certains cas, Ces éoliennes sont plus adaptées que les éoliennes à axe horizontale par exemple pour l'intégration au bâtiment ou dans des zones isolées (refuge ...).

- Le type Savonius: Il a l'avantage d'être peu encombrant, esthétique et économique. Cependant la vitesse de rotation est nettement inférieure aux autres types d'éolienne, la production est faible.



Figure 3.5: Les différents types d'éoliennes de type Darrieus et Savonius

3.6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

3.6.1 Les avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- ✓ L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple et Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

3.6.2 Les inconvénients

- Le bruit: il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique: la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire la où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

3.7 Production et différentes sortes d'éoliennes

3.7.1 Production

Une éolienne produit environ 1/5 de sa puissance nominale, c'est à dire qu'une éolienne de 5 MW produira en réalité l'équivalent d'1MW car elle ne produit pas en permanence. La mise en exploitation d'une éolienne de 1 MW permet d'éviter un rejet de 2000 tonnes de CO₂ par an, en comptant les dépenses d'énergie liées à la construction. Une éolienne de 5 MW produit 10 millions de kWh. Une éolienne

produit en 2 à 3 mois l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication, transports compris. On distingue deux sortes d'éoliennes :

- **Les petites éoliennes**, dédiées aux particuliers, qui ne sont pas très grandes et produisent peu (quelques kW). Elles sont installées au fond d'un jardin, ou sur le toit d'une maison.
- **Les éoliennes industrielles**, qui produisent beaucoup d'énergie (plusieurs MW), qui mesurent parfois plus de 120 m et qui coûtent très cher. Le diamètre de leur rotor peut atteindre 100 m. On les trouve généralement par groupes : on parle alors de fermes éoliennes ou de parcs éolien.

3.7.2 Différentes sortes d'éoliennes

- Les éoliennes terrestres

Les plus puissantes produisent actuellement 5 MW, soit de quoi alimenter environ 1600 foyers. Elles transforment près de 60 % de l'énergie. On les construit dans des zones où le vent est fort et régulier (plus de 11km/h, dans les côtes, vallées...). Elles sont automatiquement arrêtées quand le vent est trop fort (plus de 90 km/h).



Figure 3.6: Les éoliennes terrestres

- Les éoliennes en pleine mer

Les éoliennes en pleine mer dites «off-shore» sont construites de la même manière que les éoliennes terrestres, mais elles présentent des avantages : elles produisent de l'énergie presque en continu et ont un impact beaucoup moins important sur le paysage. Cependant, l'installation de ces éoliennes est coûteuse (les mâts doivent résister aux vagues), leur protection contre la corrosion doit aussi être plus importante, la maintenance est chère tout comme le raccordement au parc électrique, qui est sous-marin. Les conditions météorologiques y sont plus difficiles qu'en pleine terre.



Figure 3.7: Les éoliennes en pleine mer

3.8 Aspects économiques

3.8.1 Prix des éoliennes

Les éoliennes de grande taille permettent de réduire les coûts et d'accroître la productivité énergétique. À mesure que la taille de l'éolienne augmente, les coûts par unité de surface du rotor diminuent, le nombre d'éoliennes nécessaires pour une quantité d'énergie donnée diminue, et les coûts de transport, de construction et de câblage diminuent.

3.8.2 Coûts de la production d'électricité

Le coût de production de l'électricité d'origine éolienne variant considérablement, il n'est pas aisé de déterminer la rentabilité a priori. Le montant de l'investissement dépend tout à la fois du régime de vent local et de l'accessibilité du site. Les coûts de construction de sites en mer ou distants sont plus élevés mais sont aussi en partie compensés par des vitesses de vent et une productivité accrues. Les coûts de fonctionnement et d'entretien dépendent de l'accessibilité.

Les données de la figure 8 (National Grid, 2013) permettent de comparer les prix de l'énergie éolienne *onshore* et *offshore*. Ces données correspondent à une plage de vitesses de vent particulière, et se fondent sur les paramètres ci-après:

- Coût installé : 1903 €/kW onshore, 2905 €/kW offshore ;
- Amortissement sur 20 ans. 8 % (réel) coût moyen pondéré ;
- Coûts d'exploitation et d'entretien : 75 €/kW/an onshore à 185 €/kW/an offshore.

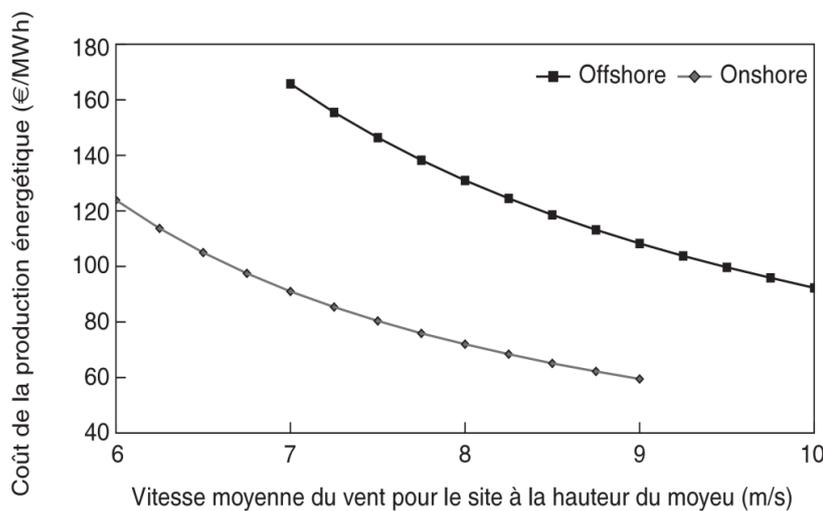


Figure 3.8: Comparaison entre les prix de l'énergie éolienne *onshore* et *offshore*

3.9 Conclusion

L'éolien est une énergie en forte augmentation, mais elle ne pourra pas fournir à elle seule la totalité de la production, le vent étant une ressource trop aléatoire. A moins de parvenir à stocker l'énergie de manière efficace en grande quantité, l'utilisation des éoliennes ne peut s'envisager seule. On pourrait éventuellement coupler cette énergie avec celle issue du soleil, afin de produire de l'électricité grâce aux éoliennes lorsqu'il y a du vent et grâce aux panneaux solaires lorsque le soleil brille. En général, le vent souffle quand il n'y a pas de soleil et inversement.

L'énergie éolienne n'est donc pas une solution envisageable seule, mais couplée avec d'autres énergies, elle peut être une solution efficace.

3.10 Exemple: Fiche technique de l'éolienne d'Iffendic (Ille-et-Vilaine, Bretagne)

➤ **Caractéristiques opérationnelles :**

Puissance maximale: 2 MW

Production annuelle estimée: 3960 MW

Vitesses :

- du vent de démarrage : 3,0 m/s
- du vent nominal : 12,0 m/s
- du vent de coupure : 25,0 m/s

➤ **Rotor:**

Diamètre : 82,0 m

Surface balayée: 5281 m²

Nombre de pales: 3

Vitesse de rotation: 8,5 à 17,1 tours/min

Poids : 17 tonnes

➤ **Pales:**

Longueur: 41 m

Matériaux: composite résine, fibre de verre et de carbone

Poids unitaire: 6,5 tonnes

➤ **Nacelle:**

Elément fixé au sommet de la tour, contenant la génératrice. Poids : 68 tonnes

➤ **Système d'orientation:**

Type: quatre motoréducteurs

Stabilisation : frein à disque

➤ **Multiplicateur:**

Type : étages parallèles et planétaires

Rapport de réduction : 1/105,4

➤ **Génératrice:**

Type: quatre pôles, asynchrone, à double alimentation

Puissance nominale: 2 000 kW

Vitesse de rotation : 900 à 1 800 tours/min

Tension nominale : 690 V

➤ **Mât:**

Type : Tubulaire en acier

Hauteur du moyeu : 80 m

Poids de la virole : 10 tonnes

➤ **Résistance au froid:**

Supporte jusqu'à -40°C, la neige, le givre et la glace. Certains éléments possèdent leur propre chauffage (génératrice, armoires électriques).

Cette fiche technique peut donner une idée générale de l'éolienne car cette éolienne est une éolienne industrielle standard

Chapitre 4

Autres sources renouvelables : Hydraulique

4.1. Intérêts de l'énergie hydraulique

Une centrale hydraulique produit de l'électricité grâce à une chute d'eau entre deux niveaux de hauteurs différentes, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur. En effet l'énergie primaire est «gratuite» et constamment renouvelable. Les charges de fonctionnement des centrales hydrauliques sont en général moins élevées que celles des centrales thermiques.



Figure 4.1 : Le barrage de la centrale hydroélectrique

4.2. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- hauteur de la chute,
- débit de la chute.

4.2.1 Puissance d'une chute d'eau

La puissance d'une centrale hydraulique peut se calculer par la formule suivante:

$$P = Q \cdot M_v \cdot h \cdot g$$

Avec :

- P : puissance en kW ;
- Q : débit moyen mesuré en mètres cube par seconde ;
- M_v : masse volumique de l'eau, soit 1000 kg/m^3 ;
- h : hauteur de chute en mètres ;

g : constante de gravité, soit près de $9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$;

On voit que, pour avoir une puissance importante, le produit $Q.h$ doit être le plus élevé possible. L'idéal est d'avoir un grand débit sur une grande hauteur de chute. Malheureusement ces deux conditions sont rarement réunies. Les termes Mv et g sont constants.

4.3. Les ouvrages nécessaires au fonctionnement de la centrale

Voici quels sont les différents ouvrages nécessaires au fonctionnement de la centrale :

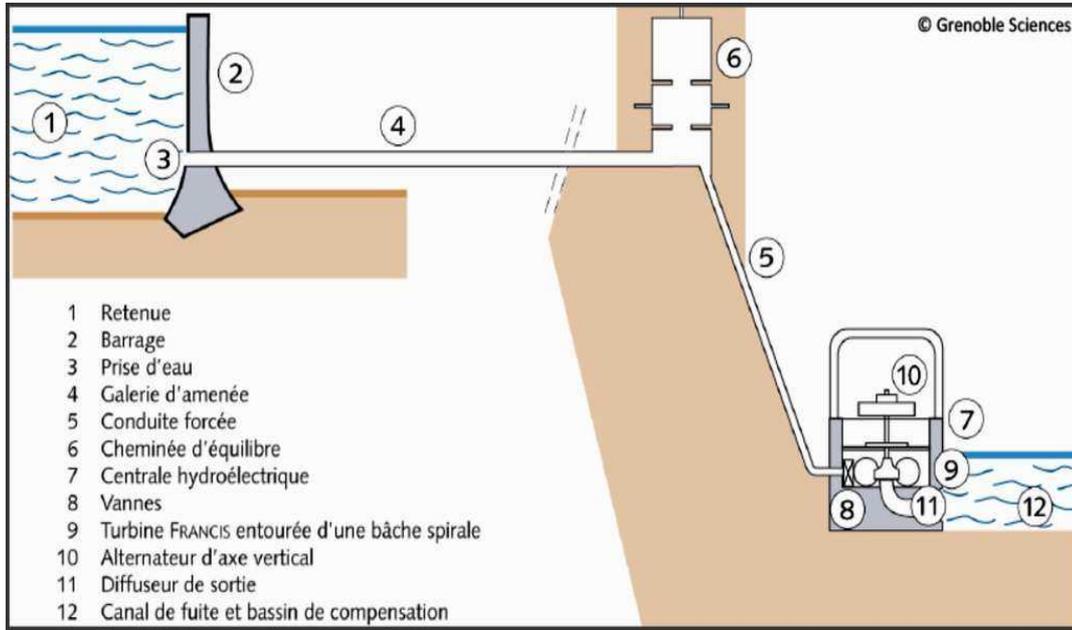


Figure 4.2: Représentation schématique d'une installation hydroélectrique de haute chute

Type d'ouvrage	Fonction	Caractéristiques
Barrage	Ouvrage de prise	<ul style="list-style-type: none"> Il permet de retenir l'eau. Il peut être soit une simple déviation du courant, soit un barrage fermé qui retient le cours d'eau.
Prise d'eau et canal d'amenée	Ouvrage d'amenée	<ul style="list-style-type: none"> Transforme l'énergie de l'eau en énergie cinétique. Le canal d'amenée n'est pas toujours nécessaire, notamment si la mise en charge se trouve sur le côté de la prise d'eau.
Turbine hydraulique, vannes, etc.	Ouvrage de production	<ul style="list-style-type: none"> L'énergie cinétique est transformée en énergie mécanique grâce au groupe abrité dans l'enceinte de la centrale, composé de la turbine hydraulique et de ses composants. L'énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à un générateur. Un transformateur adapte cette énergie à une tension plus exploitable. L'électricité est ensuite évacuée par câble.
Canal de sortie	Ouvrage de fuite	<ul style="list-style-type: none"> Le canal de sortie permet à l'eau qui ressort de la turbine de repartir dans le cours d'eau d'origine.

4.4. Impact social et environnemental

Il est parfois reproché à l'énergie hydraulique d'engendrer des déplacements de population, les rivières et les fleuves étant des lieux privilégiés pour installer des habitations. Par exemple, le barrage des Trois Gorges en Chine a entraîné le déplacement de près de deux millions de personnes. En raison d'une régulation modifiée de l'eau, les écosystèmes en amont et en aval des barrages peuvent être perturbés (notamment la migration des espèces aquatiques) bien que des dispositifs comme les passes à poissons soient installés (Figureure.3).



Figure 4.3: Grande échelle à poissons d'un barrage

4.5. Différents types de centrales

4.5.1. Les centrales de hautes chutes sont caractérisées par une forte hauteur de chute $h > 200\text{m}$. L'usine est toujours située à une distance importante de la prise d'eau parfois plusieurs kilomètres. Elles se trouvent en altitude, les usines de lacs disposent de plus de 400 heures de réserves. Leur rapidité de démarrage permet de répondre de consommation, notamment en hiver.

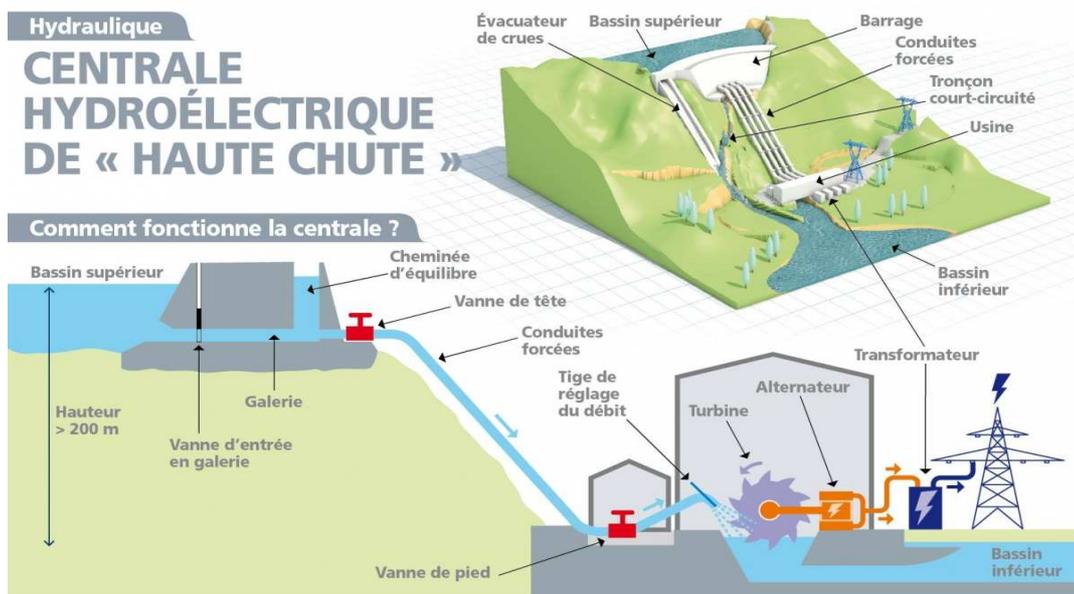


Figure 4.4: Centrales de hautes chutes

Les usines de haute chute sont généralement équipés de **turbines Pelton** (Figure.4.5): l'eau arrive en deux jets de la roue équipée de pales en forme de godets.

Exemple : **Centrale du Mont Cenis** (frontière France et l'Italie).

- Capacité de la retenue: 270.10^6 m^3 , Hauteur de chute: 882 m; Débit: $51 \text{ m}^3/\text{s}$; Deux groupes turbine Pelton-alternateur de 200 MVA.

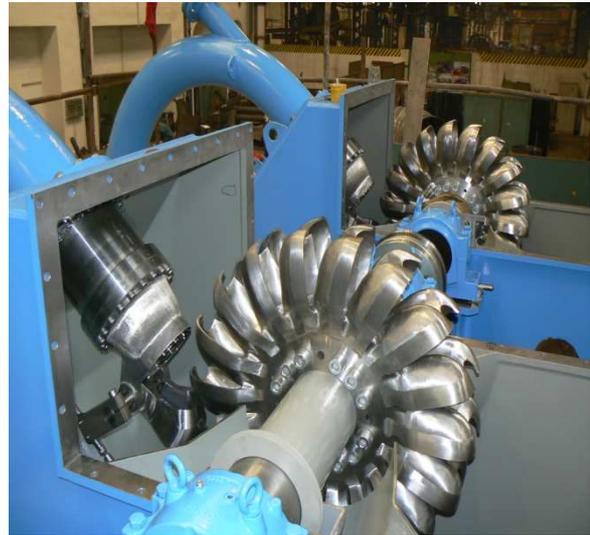
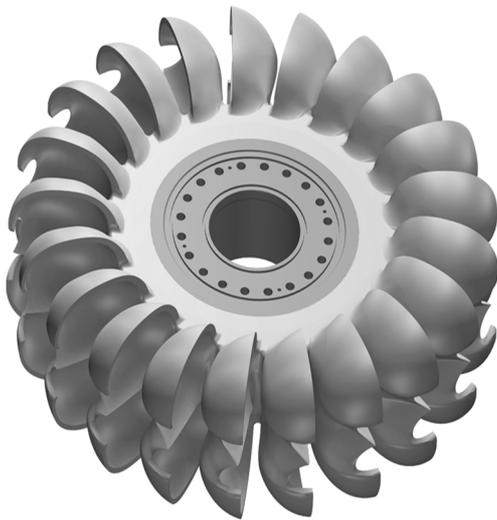


Figure.5 : Turbines Pelton

4.5.2. Les centrales de moyennes chutes

La hauteur de chute est comprise entre **30 m et 200 m**. L'unité de production est à proximité de la retenue. Les centrales hydraulique de moyenne chute sont disposées immédiatement en aval du barrage, et le plus souvent, elles sont implantées dans le barrage.

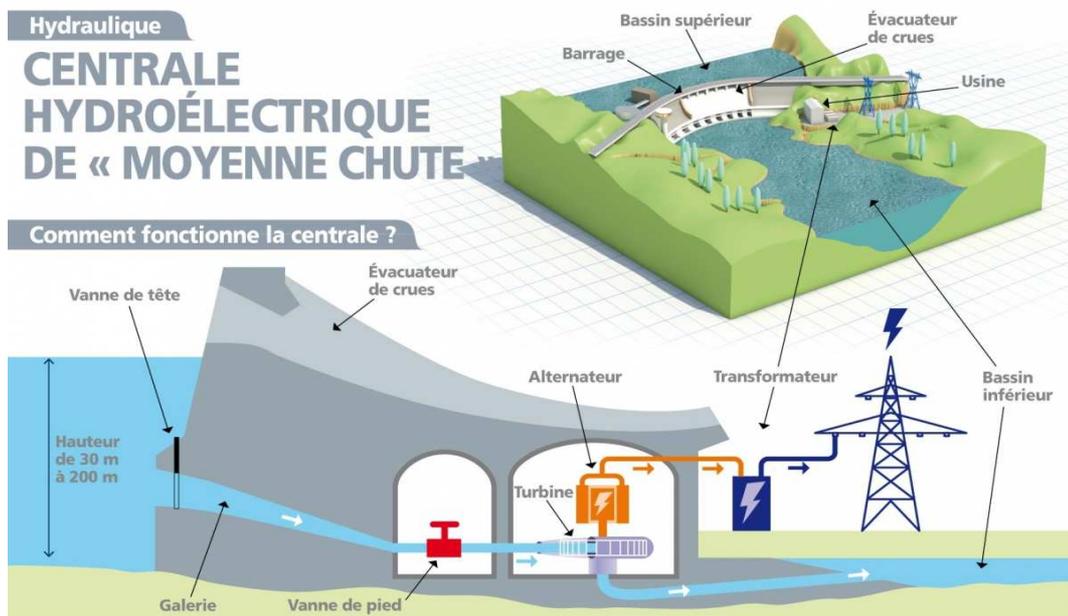


Figure 4.6: Centrales de moyennes chutes

Les usines de moyenne chute sont équipées de **turbine FRANCIS** (Fig 4.7), ou turbine à réaction, qui permettent l'utilisation de l'eau à moyenne pression. L'eau est dirigée contre les pales de la turbine (Fig4.7) par des ailettes de guidage, puis rabattue vers le centre de la roue.

Exemple: Centrale du Serre-Ponçon

- Capacité de la retenue : 1270.10^6 m^3 , Hauteur de chute : 128 m et 65 m ; Débit : $1200 \text{ m}^3/\text{s}$; Quatre ensembles turbine-alternateur de 90 MVA – 214 tr/min.

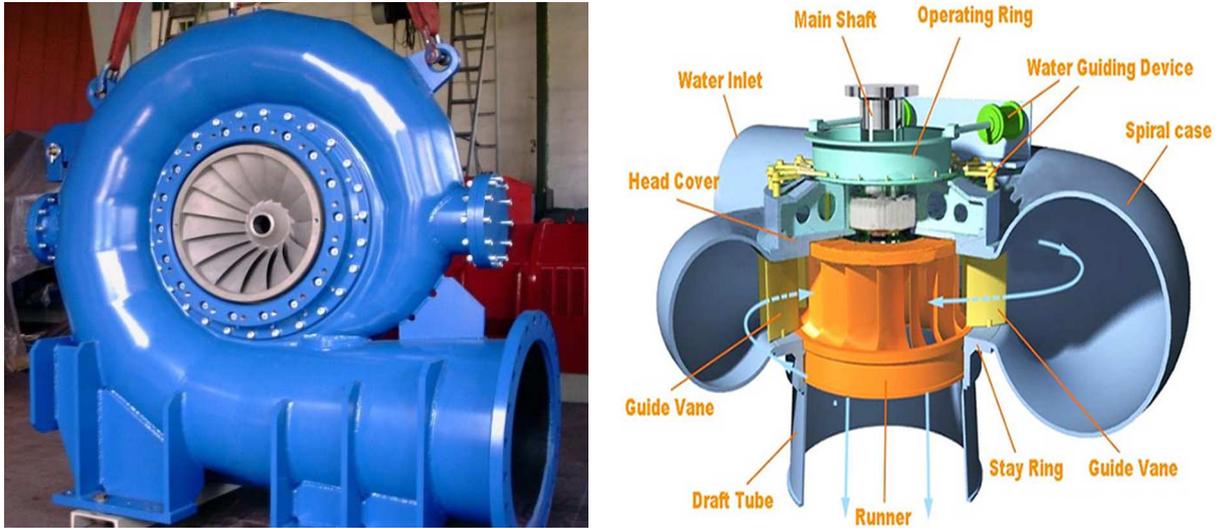


Figure 4.7: Turbines FRANCIS

4.5.3. Les centrales de basses chutes

La hauteur de chute est inférieure à **30 m**. On les appelle aussi centrale au fil de l'eau. Elles sont caractérisées par une hauteur très faible et un très fort débit.

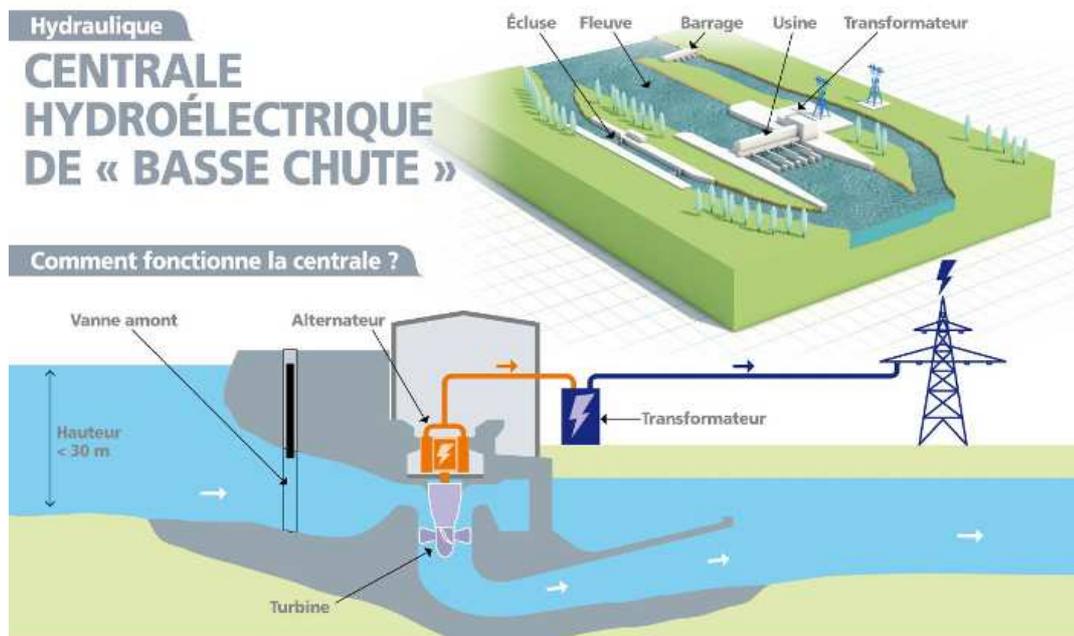


Figure 4.8: Centrales de basses chutes

Les usines de basse chute sont équipées soit de turbine à réaction type **KAPLAN** (Figure 4.9) avec pales orientables en fonction du débit, soit de groupes bulbes.

Exemple: Centrale de Rhinau sur le Rhin

- Hauteur de chute : 5 m et 15 m ; Débit : $5000 \text{ m}^3/\text{s}$; par groupe $350 \text{ m}^3/\text{s}$, Quatre ensembles turbine-alternateur de 42 MVA – 75 tr/min.

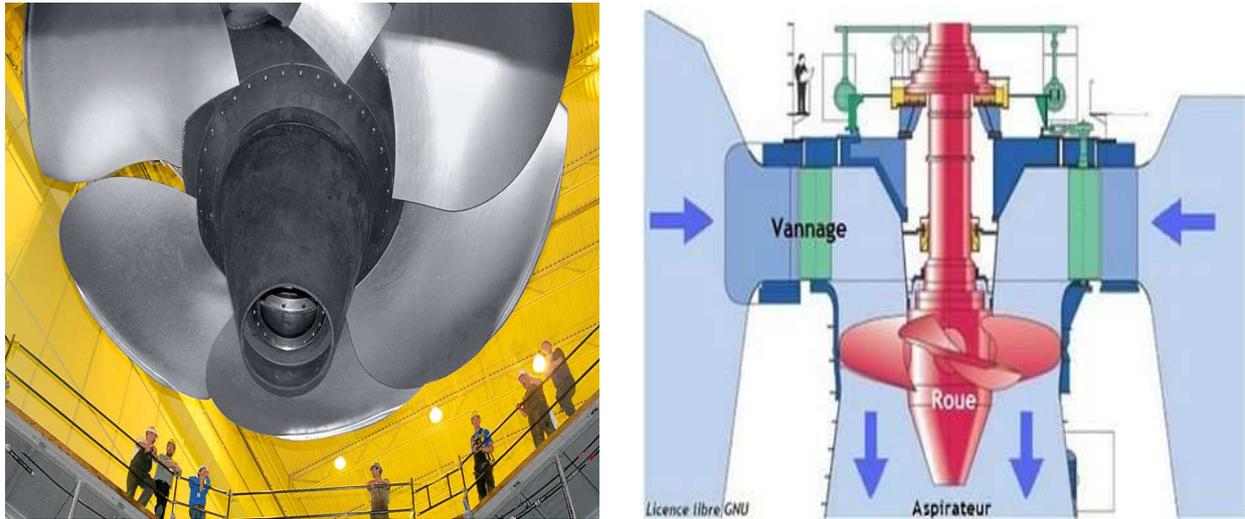


Figure 4.9: Turbines KAPLAN

Un type particulier de turbines, mises au point pour le barrage de la RANCE, est utilisé pour l'équipement des basses chutes: ce sont les groupes-bulbes, constitués d'une turbine de type KAPLAN à écoulement axial horizontal et d'un alternateur logé dans un bulbe profilé (Figure 4.10).

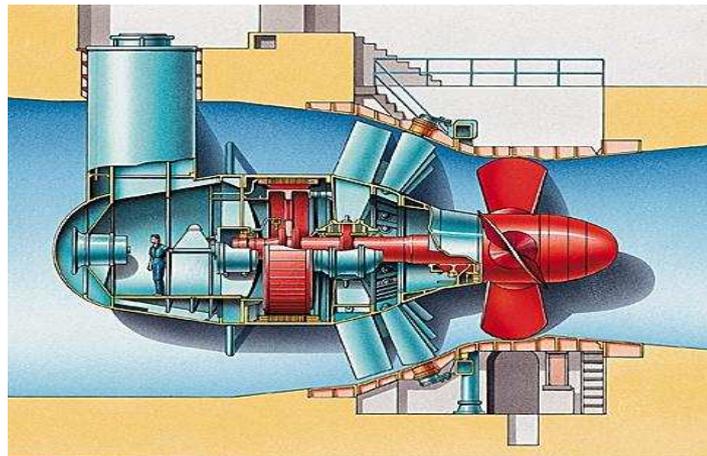


Figure 4.10 : Turbine de type KAPLAN à écoulement axial horizontal

4.6. Le coût de revient pour la production d'électricité par moyen de production

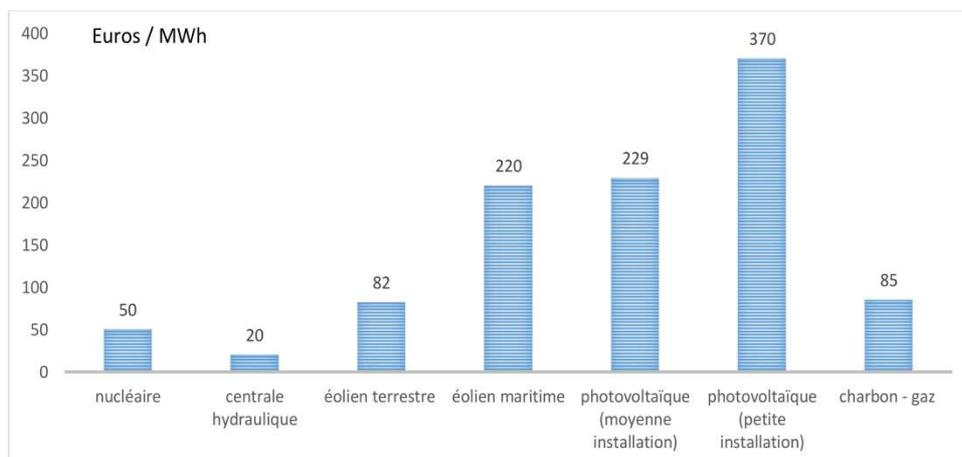


Figure 4.11 : Coût de revient pour la production d'électricité

4.7. Avantages et Inconvénients

4.7.1 Avantages

- Production d'énergie active durant les heures de fortes consommations d'électricité.
- Démarrage et arrêt des centrales très rapides.
- Aucune pollution n'est dégagée lors de la production d'électricité.
- Facilité d'entretien et la faible usure du matériel qui travaille à vitesse et à température modéré.
- Haut niveau de rendement des machines, capable de transformer 90% de l'énergie de l'eau en énergie mécanique.

4.7.2 Inconvénients

- Modification du débit et du niveau de l'eau.
- Perturbation de la faune et de la flore.
- Surcoût lié à la nécessité d'installer des passes à poissons.
- Risque pour les personnes en aval lié au barrage.
- Des investissements lourds

Bibliographie

- [1] Ouvrage, "Les énergies Renouvelables : Les bases, la technologie et le potentiel au Sénégal", publié par le PERACOD, 2011.
- [2] World Energy Outlook 2009.OECD / iea-International Energy Agency, p.58
- [3] K. HELALI, "Modélisation d'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative ", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012.
- [4] Anne Labouret, Michel Viloz, "Energie Solaire Photovoltaïques", Edition le Moniteur Dunod 2006.
- [5] P.PAPET " Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats mince en silicium cristallin ". Thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007. (s.d.).
- [6] Lalouni Sofia, Etude, commande et simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique, Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.
- [7] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel), édition DUNOD, août 2003, Paris(France).
- [8] Cyrille CHAZALLON, "Conception d'Eoliennes," INSA de Strasbourg – Spécialité Génie Civil RIZZO Damien, élève ingénieur de 5ème année Projet de Fin d'Etudes, 2008.
- [9] Mathis Paul, "Les énergies renouvelables ont-elles un avenir ?", Les Petites Pommes du Savoir, Editions le Pommier, 2004.
- [10] Jean-L.B, Hervé, N et Claude S, "L'énergie dans le monde : bilan et perspectives", EDP Sciences, décembre 2007.
- [11] Site : www.clg-champagne-lemesnil.ac-versailles.fr/IMG/pdf/l_energie_hydraulique.pdf