

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



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département des Sciences et Technologies

Projet de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : Maintenance en Instrumentation Industrielle

Thème

**CONCEPTION D'UN PLAN DE MAINTENANCE
POUR UNE CENTRALE SOLAIRE
PHOTOVOLTAÏQUE**

Par :

Mr. DJADI Redouane

Mr. HAMOUABDELLAH Salah

Jury :

Dr. TOUAFEK Khaled

Maître de Recherche A

URAER Ghardaïa

Encadreur

M.

Maître Assistant A

Univ. Ghardaïa

Examineur

Année universitaire 2012/2013

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma très chère et la meilleure maman du monde pour tout son amour et son dévouement, à mon père qui a toujours été là pour moi et qui m'a donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance

Car Les mots me manquent pour exprimer ma profonde reconnaissance à ma tendre famille dont l'amour, la patience et le sacrifice s'inscrivent à chaque page de ce document.

Et je le dédie à mes frères et mes sœurs et toute ma famille

Tous mes amis d'université avec lesquels j'ai passé trois années inoubliables,

A toutes les personnes que j'aime et qui m'aiment

Redouane

DÉDICACE

*Je dédie ce travail à mes parents et à mes frères
et à ma sœur JAMILA, et à ma tante ZOËRA, et
à tout mon entourage qui m'ont aidé et soutenu.*

*Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde
gratitude pour leur aide précieuse ainsi que
pour les conseils et encouragements qu'ils n'ont
cessé de me prodiguer.*

HAMOUABDELLAH Salah

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage de mener à terme ce modeste travail.

Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont bien voulu nous apporter leur expérience pour la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons également à remercier DR. TOUAFEK KHALED pour son encadrement, sa compréhension, ses conseils, ses observations, son aide et sa disponibilité durant la réalisation de ce mémoire.

Ma profonde gratitude s'adresse aussi à tous les enseignants qui nous ont suivis durant notre formation.

Et nous tenons aussi à remercier toute l'équipe de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelable, pour la réalisation ce projet de fin d'études.

ملخص

الهدف من المشروع هو انجاز مخطط الصيانة لمحطة شمسية كهر وضوئية التي تعتبر منشأة صناعية مستقلة. وهذه المنشأة تنتج الطاقة الكهربائية بصفة مستمرة.

إن تطبيق مخطط الصيانة حسب المعايير المعروفة تسمح في اشتغال مستمر دون تسجيل أي انقطاع وبفعالية ممتازة وذلك بتجنب الضياع الناجم عن سوء الصيانة و التنبؤ بأي عطل.

Résumé

L'objectif de notre travail est de concevoir un plan de maintenance pour une centrale solaire photovoltaïque qui est une installation industrielle autonome. Cette installation produira de l'énergie électrique de manière continue. L'application d'un plan de maintenance selon les normes permettra la continuité du fonctionnement ainsi qu'une bonne efficacité tout en diminuant les pertes dues au mauvais entretien.

Abstract

The objective of our work is to develop a maintenance plan for a solar photovoltaic plant which is an independent industrial facility. This plant will produce electricity continuously. The application of a maintenance plan according to the standards allow continuity of operation as well as all good efficiency by reducing losses to poor maintenance.

Liste des Figures

Figure 1: Pertes en énergie Subie par la Terre du rayonnement solaire.....	5
Figure 2: Exemples de spectre solaire.....	6
Figure 3: Énergie éolienne.....	7
Figure 4: Énergie hydraulique.....	8
Figure 5: Énergie géothermique.....	10
Figure 6: Bilan énergétique de la terre.....	13
Figure 7: l'albédo.....	14
Figure 8: Cordonnées terrestres.....	14
Figure 9: Réflexion, transmission et absorption.....	16
Figure 10: Principe du piégeage par diffusion dans une photopile.....	17
Figure 11: Empilements optiques d'une cellule ; a) Au silicium. b) Au silicium amorphe.....	18
Figure 12: a) Silicium pour (intrinsèque). b) Silicium de type n. c) silicium de type p.....	21
Figure 13: Représentation schématique d'une jonction p-n.....	22
Figure 14: Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau.....	23
Figure 15: Le rendement.....	25
Figure 16: Systèmes photovoltaïques avec stockage électrique.....	26
Figure 17: Systèmes à couplage directe sans batterie.....	26
Figure 18: Les diverses composantes d'un système photovoltaïque.....	27
Figure 19: Composants de base d'un générateur photovoltaïque avec batterie.....	28
Figure 20: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque.....	29
Figure 21: Schéma de principe d'un régulateur de charge/décharge.....	33
Figure 22: Les systèmes photovoltaïques sans batterie (charge résistive).....	38
Figure 23: Les différentes méthodes de maintenance	46
Figure 24: Les opérations de maintenance.....	48
Figure 25: Procédure du nettoyage d'un module photovoltaïque	55
Figure 26: Moments préconisé pour contrôle l'ombre sur le module pv.....	55
Figure 27: Exemple d'obstacle donnant de l'ombre sur le module pv	56
Figure 28: Procédé d'entretien d'une batterie.....	57
Figure 29: Plaques immergées par l'électrolyte.....	57

Liste des Tableaux

Tableau 1: Quelques données physiques du soleil.....	11
Tableau 2: Fiche d'entretien visite contrôle	59
Tableau 3: Fiche de maintenance, visite et contrôle.....	60
Tableau 4: Fiche de maintenance, visite de dépannage	61

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre1 Généralités sur les énergies renouvelables.....	2
1.1. Introduction aux énergies renouvelables	2
1.2. Historique	2
1.2.1. L'énergie solaire	2
1.2.2. L'énergie éolienne.....	3
1.2.3 La biomasse	3
1.2.4. La géothermie	3
1.2.5. L'énergie hydraulique.....	3
1.3. Les sources d'énergies	3
1.3.1. Les sources d'énergie non renouvelables.....	3
1.4. L'effet de serre.....	4
1.5. Les sources des énergies renouvelables.....	5
1.5.1. L'énergie solaire.....	5
1.5.2. L'énergie éolienne.....	6
1.5.3. L'énergie hydraulique.....	8
1.5.4. La biomasse	9
1.5.6. Energie géothermique.....	10
1.6. Le rayonnement solaire	11
1.6.1. Quelques données physiques du soleil.....	11
1.6.2. Constante solaire.....	12
1.6.3. Albédo	13
1.7. Cordonnées terrestres.....	14
Chapitre 2 Les systèmes photovoltaïques.....	16
2.1. Conversion de la lumière en électricité.....	16
2.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.....	18
2.3. La collecte des charges.....	20
2.4. L'effet photovoltaïque.....	20
2.4.1. Principe de la cellule.....	20
2.4.2. Le matériau.....	20
2.4.3. Dopage des semi-conducteurs.....	21

2.4.4. Jonctions P-n et P-i-n	21
2.4.5. Orientation et inclinaison des modules.....	22
2.4.6. Le rendement.....	24
2.5. Les systèmes photovoltaïques.....	25
2.5.1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique	25
2.5.2. Les systèmes à couplage direct sans batterie.....	26
2.6. Les systèmes photovoltaïques avec batterie.....	27
2.6.1. Principe de fonctionnement	27
2.6.2. Description.....	28
2.6.3 Stockage de l'énergie	31
2.6.4 Le régulateur de tension.....	33
2.6.5 Le tableau de distribution	34
2.6.6 Avantages et inconvénients	34
2.6.7 Domaines d'application.....	35
2.6.8 Les modes de fonctionnement	37
2.7. Les systèmes photovoltaïques sans batterie	38
2.7.1. Charge résistive.....	38
2.7.2. Charge adaptée	38
Chapitre 3 Techniques de maintenance	39
3.1. Généralités sur la maintenance.....	39
3.2. Définition de la maintenance.....	39
3.3. Objectifs de la maintenance des installations industrielles.....	40
3.4. Les politiques de maintenance	41
3.5. Les différentes méthodes la maintenance.....	42
3.5.1. Maintenance corrective.....	43
3.5.2. Maintenance préventive.....	43
3.5.3. Maintenance préventive systématique.....	43
3.5.4. Maintenance préventive conditionnelle.....	44
3.6. Opérations de maintenance.....	47
3.6.1. Opérations de maintenance corrective.....	47
3.6.2. Localisation de défaillance.....	47
3.6.3. La remise en état.....	49
3.6.4. Opérations de maintenance préventive.....	50
3.7. Autres formes et méthodes de maintenance.....	52

Chapitre 4 Conception d'un plan de maintenance pour un système photovoltaïque.....	53
4.1. Maintenance de l'installation PV.....	53
4.2. Les principaux problèmes et leurs solutions.....	53
4.3. Entretien et maintenance : une garantie de performance.....	54
4.3.1. Nettoyage des modules solaires	54
4.3.2. Prévention de l'ombre sur le module solaire.....	55
4.4. Entretien des batteries.....	56
4.5. Le convertisseur.....	57
4.6. Entretien du régulateur.....	58
4.7. Entretien des câbles	58
Conclusion générale.....	63
Bibliographie.....	64

Introduction générale

La maintenance s'exerce sur des équipements industriels de production placés dans un contexte économique. Chaque équipement plus ou moins complexe, constitue un système technique, conçu pour mettre en œuvre un procédé et destiné à réaliser, partiellement ou totalement, un produit ou un service. La maintenance a pour mission de veiller sur les systèmes techniques que sont les systèmes de production.

L'objectif de notre travail est de concevoir un plan de maintenance pour une centrale solaire photovoltaïque qui est une installation industrielle autonome. Cette installation produira de l'énergie électrique de manière continue. L'application d'un plan de maintenance selon les normes permettra la continuité du fonctionnement ainsi qu'une bonne efficacité tout en diminuant les pertes dues au mauvais entretien.

Nous avons partagé notre mémoire en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons fait un aperçu général sur les Energies Renouvelables, à travers leurs définitions, historique et les différents types. En effet l'utilisation par l'homme des sources d'énergie renouvelable, dont l'énergie solaire, éolienne et hydraulique, est très ancienne ; ce type d'énergie est utilisé depuis l'antiquité et son utilisation a continué à exister jusqu'à l'arrivée de la "Révolution Industrielle", époque à laquelle, étant donné le bas prix du pétrole, elles ont été abandonnées.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des systèmes photovoltaïques à travers les sous systèmes (cellules photovoltaïques, batteries, régulateurs...).

Dans le troisième chapitre, un aperçu général est donné sur les techniques de maintenance industrielle.

Dans le quatrième chapitre nous avons donné l'essentiel du plan de maintenance conçu pour un système photovoltaïque. En effet, nous avons appliqué les règles de la maintenance industrielle étudiés dans le chapitre 3 pour la conception d'un plan d'entretien et de maintenance des centrales solaires photovoltaïques.

Une conclusion générale termine ce mémoire.

Chapitre1:

Généralités sur les énergies renouvelables

Chapitre 1

Généralités sur les énergies renouvelables

1.1. Introduction aux énergies renouvelables

L'utilisation par l'homme des sources d'énergie renouvelable, dont les énergies solaire, éolienne et hydraulique, est très ancienne ; ce type d'énergie est utilisé depuis l'antiquité et son utilisation a continué à exister jusqu'à l'arrivée de la "Révolution Industrielle", époque à laquelle, étant donné le bas prix du pétrole, elles ont été abandonnées.

Cependant depuis ces dernières années, étant donné l'accroissement du coût des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un à renouveau des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le lieu même où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage de se compléter entre elles. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec peu de vent), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, ce sont les aérogénérateurs qui prendront le relais et produiront la majorité de l'énergie électrique.

1.2. Historique

Les énergies nouvelles, ou énergies renouvelables, ne constituent pas une idée neuve, bien qu'elles fassent l'objet d'un engouement croissant [1]. Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, l'eau ou encore la croissance des végétaux ont toujours été exploitées par l'homme.

1.2.1. L'énergie solaire

Dans l'Antiquité, la concentration de rayons solaires à l'aide de miroirs en bronze permettait déjà de chauffer des fours à haute température. L'effet photovoltaïque, consistant à convertir la lumière en électricité, a été découvert dès 1839 par Becquerel.

1.2.2. L'énergie éolienne

Elle est également développée dès l'Antiquité pour des bateaux à voile, des moulins à vent, pour la meunerie et l'irrigation.

1.2.3. La biomasse

Elle est utilisée par l'homme depuis la Préhistoire (combustion des végétaux), dès qu'il acquiert la maîtrise du feu pour se chauffer, cuire sa nourriture et s'éclairer.

1.2.4. La géothermie

Les premières traces d'utilisation de cette énergie datent de près de 20 000 ans. La pratique des bains thermaux se développe avec l'apparition de la civilisation.

1.2.5. L'énergie hydraulique

La force de l'eau est utilisée depuis plus de 2 000 ans avec les moulins et les bateaux à aubes. Les roues sont utilisées à partir du XIX^e siècle pour produire de l'électricité (hydroélectricité appelée « houille blanche »).

Sous Vauban (fin XVII^e), on dénombrait 65 000 moulins à eau, 15 000 usines hydrauliques et 16 000 moulins à vent. La révolution industrielle au XIX^e siècle a marqué un déclin des énergies renouvelables au profit des énergies fossiles.

A défaut d'être « nouvelles » historiquement, ces énergies peuvent être considérées comme telles d'un point de vue technologique.

1.3. Les sources d'énergies

1.3.1. Les sources d'énergies non renouvelables

L'utilisation des combustibles fossiles, le pétrole, le charbon et le gaz, contribue fortement aux émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane et l'oxyde nitreux [2].

a. Le charbon

Le charbon est formé par des matières végétales ensevelies et exposées pendant longtemps à une forte pression géologique. Plus cette pression est forte et appliquée pendant longtemps, plus le

charbon contient de carbone et plus sa valeur en tant que combustible est grande. On l'extrait dans des mines souterraines ou à la surface du sol. Le charbon est un combustible fossile abondant qui peut servir à produire de l'électricité à bon marché.

b. Le pétrole

Le pétrole brut est la source énergétique la plus couramment utilisée dans le monde. Il représente l'énergie primaire mondiale et sert à fabriquer la quasi-totalité des combustibles liquides; c'est le principal carburant utilisé pour les transports dans le monde entier. Vu sa teneur énergétique élevée, il permet facilement et sans danger de stocker de l'énergie et de la transporter là elle doit être utilisée. On l'emploie aussi pour chauffer les locaux ou produire de l'électricité ainsi que dans l'industrie pétrochimique.

c. Le gaz naturel

Le gaz naturel est un mélange gazeux composé d'hydrocarbures légers qu'on trouve dans des gisements souterrain situés dans des formations de roches sédimentaires. On utilise généralement des gazoducs pour le transporter. Le gaz naturel se prête à des multiples utilisations, notamment le chauffage de locaux ou de l'eau, la production de chaleur pour l'industrie, la production d'électricité. Il dégage également des gaz à effet de serre.

d. La fission nucléaire

Quand les noyaux de certains atomes d'uranium sont fragmentés à l'intérieur d'un réacteur nucléaire, ils dégagent une grande quantité de chaleur. Cette chaleur sert à produire de la vapeur qui fait tourner une turbine, et cette dernière fait fonctionner une génératrice.

1.4. L'effet de serre

L'énergie solaire atteint la Terre principalement sous forme de lumière. Réfléchi par la Terre sous forme de rayonnement infrarouge, elle est retenue par l'atmosphère qui protège ainsi notre planète du froid de l'espace et assure au sol une température moyenne de 15 C° qui permet la vie. Curieusement ce sont des composants mineurs de l'atmosphère qui absorbent la chaleur: Le gaz carbonique C_{o2} qui ne constitue que le 0.035% (350 parties par million/ppm) de l'air mais contribue pour 55% à l'effet de serre, le méthane (1.9 ppm/15% de l'effet), le protoxyde d'azote N₂₀ (0.4 ppm), les CFC (24% de l'effet) et la vapeur d'eau [3].

La figure 1 résume les pertes en énergie de rayonnement et en quantité de chaleur subie par la Terre. On y observe que les constituants atmosphériques absorbent non seulement les flux de chaleur sensible, y compris la transpiration des végétaux, mais aussi la très grande majorité des flux de rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre: effectivement, sur cet éclairage de

quelque 390 W. m^{-2} , seuls 30 W. m^{-2} environ se perdent dans l'espace interplanétaire après que l'atmosphère les a transmis; l'autre part du rayonnement, soit environ 360 W. m^{-2} , reste "piégée" dans les couches atmosphériques ou certains éléments chimiques, et en tout premier lieu l'eau, parviennent à les absorber à un niveau ou à un autre. On assiste la première manifestation de l'effet de serre, grâce auquel 465 W. m^{-2} (environ) sont conservés dans l'atmosphère sur les 495 W. m^{-2} (environ) que libère la surface terrestre par émission de chaleur et rayonnement infrarouge.

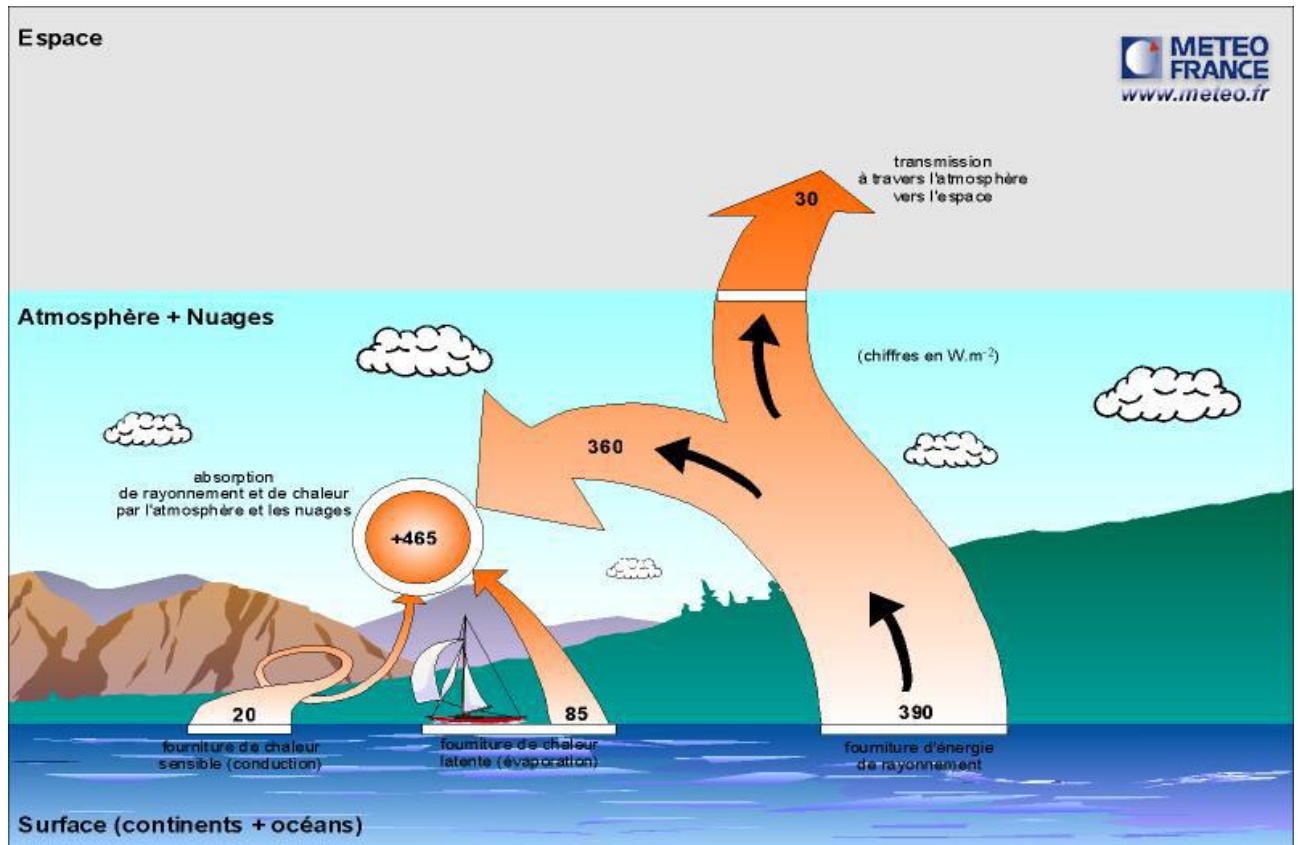


Figure 1 : Pertes en énergie du rayonnement solaire subie par la terre

1.5. Les sources des énergies Renouvelables

1.5.1. L'énergie solaire

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre.

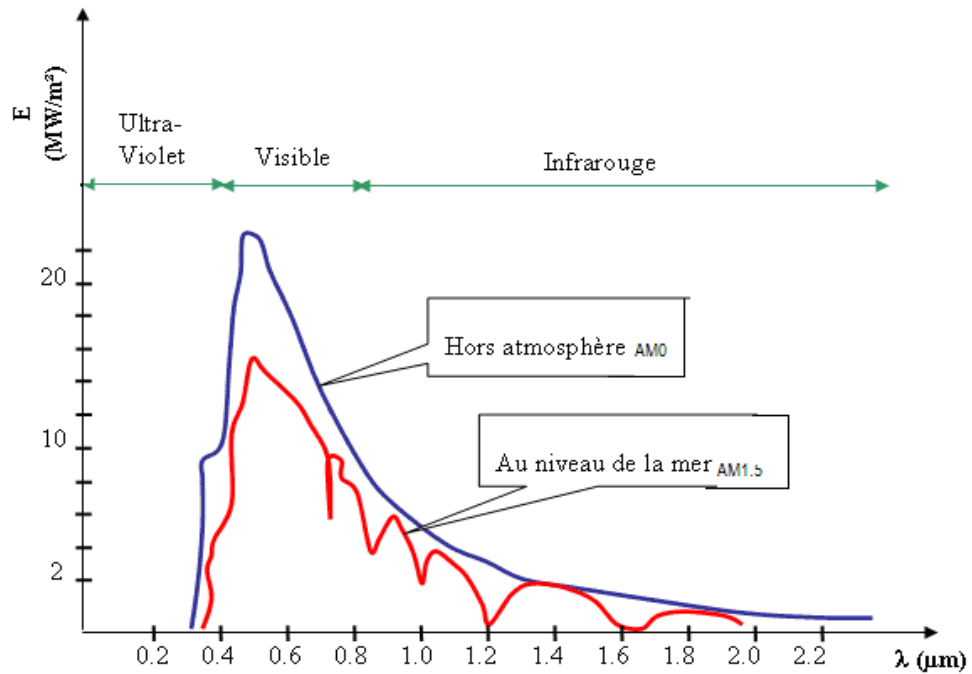


Figure 2 : Exemples de spectre solaire

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique (figure 2) dans lequel on trouve notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique émettent de l'énergie [4]. Le niveau d'irradiante (le flux énergétique) arrivant à la surface de la Terre dépend de la longueur d'onde du rayonnement solaire.

Deux grandes familles d'énergie solaire à cycle court se distinguent :

- l'énergie solaire thermique qui utilise la chaleur transmise par rayonnement
- l'énergie photovoltaïque qui utilise le rayonnement lui-même

1.5.2. L'énergie éolienne

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masses d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique.



Figure 3 : Energie éolienne

Des voiliers ont été utilisés dès l'Antiquité, comme en témoigne la Barque solaire de Khéops. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'essentiel des déplacements nautiques à moyenne et longue distance se sont faits grâce à la force du vent. Un dérivé terrestre n'ayant d'usage que sportif a été rendu possible par les techniques modernes : le char à voile.

L'énergie éolienne a aussi été vite exploitée dans des moulins à vent équipés de pales en forme de voile, comme ceux que l'on peut voir aux Pays-Bas ou encore ceux mentionnés dans *Don Quichotte*. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les moulins des Pays-Bas actionnent directement des pompes dont le but est d'assécher ou de maintenir secs les polders du pays. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains.

Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisé sur place (site isolé de réseau de distribution). Pour résoudre le problème d'espace, elles sont de plus en plus souvent placées en mer.

En France, par exemple, l'éolien se développe également de plus en plus à l'échelle individuelle. En effet, le petit éolien devient très rentable, les fabricants proposant des génératrices de plus en plus performantes, et de plus en plus abordables. Le petit éolien est généralement utilisé pour produire de l'électricité qui sera consommée directement sur place. En effet, le tarif d'achat de l'électricité mis en place n'est pas avantageux pour le petit éolien. De plus, pour bénéficier du tarif d'achat, il faut que l'éolienne soit placée en Zone de Développement Éolien, ce qui limite les possibilités à l'échelle individuelle.

Demain, de nouvelles voiles iront chercher les vents d'altitude, plus puissants, plus réguliers. Magenn, Kite Gen, et Skywindpower s'élèveront à 300m, 1200m ou 5000m pour produire jusqu'à 100 fois plus d'électricité qu'une éolienne actuelle [5].

1.5.3. L'énergie hydraulique

À l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables.



Figure 4 : Energie hydraulique

On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entrainer des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé...).

Depuis l'invention de l'électricité, cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :

-L'énergie des vagues : elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis [6], sorte de vers en métal articulé ou le Searev [7]. Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.

-L'énergie marémotrice : elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée).

- **L'énergie hydrolienne** : elle est issue de l'utilisation des courants sous marins.

- **L'énergie thermique des mers** : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.

- **L'énergie osmotique** : elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer [8].

L'idée remonte aux années 70, c'est donc une énergie nouvelle, elle consiste à tirer parti du phénomène d'osmose qui se produit lors du mélange d'eau de mer et d'eau douce (grâce à leur salinité différente). La première centrale osmotique a été ouverte à Hurum en Norvège par la société Stat kraft à l'embouchure du Fjord d'Oslo au bord de la Mer du Nord. Il s'agit encore d'un prototype destiné à tester la fiabilité du processus et à en améliorer le rendement, mais l'ouverture d'une première centrale industrielle est prévue pour 2015. Une centrale de la taille d'un terrain de football pourrait produire de l'électricité pour 30 000 ménages. D'après l'entreprise, à terme 50 % de la production électrique de l'Union Européenne pourrait être d'origine osmotique.

1.5.4. La biomasse

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le bois et les biocarburants.

Des cyanobactéries modifiées pourraient convertir de l'énergie solaire en carburant et consommer du CO₂. Cette technique et l'utilisation de ce carburant équilibreraient la production et la consommation de CO₂. Par génie génétique, une entreprise a créé et améliore peu à peu cette technique [9].

Une équipe de recherche de l'Université de Stafford a montré que la production d'électricité à partir de la biomasse serait plus rentable économiquement et écologiquement que sa transformation et son utilisation dans les transports en tant que biocarburants. Pour ce faire, Elliott Campbell et ses collègues ont comparé l'impact et le rendement de la production de l'électricité et de l'éthanol, de leur utilisation mais aussi du cycle de vie des voitures électriques et à moteur thermique. D'après eux, l'option électrique émet deux fois moins de CO₂ que l'option bio carburant et un hectare de

culture permet de parcourir 52 000 km à l'électricité contre 31 000 km à l'éthanol. Pourtant ce constat ne rassure en rien sur les problèmes d'utilisation des sols et d'alimentation mondiale.

1.5.6. L'énergie géothermique

Un des témoignages les plus anciens date de 2000 ans avant Jésus-Christ, avec dans les îles Lipari (Italie) l'exploitation d'eau naturellement chaude pour les thermes.



Figure 5: Energie géothermique

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

En 2009, les trois premiers producteurs sont les États-Unis, les Philippines et l'Indonésie. Ce dernier pays possède le plus grand potentiel (27 gigawatts, soit 40 % des réserves mondiales) [10].

Pour autant le géothermique comporte lui aussi des risques au niveau humain. Les techniques évoluent et permettent de chercher la chaleur à de plus grandes profondeurs. Il a été montré que la modification des pressions dans les sous-sols avait un impact sur l'activité sismique. La fréquence des tremblements de terre mais aussi leur puissance peut être augmentée à cause de l'exploitation de cette énergie [11].

1.6. Le rayonnement solaire

Le Soleil est la plus proche étoile de la Terre : il en est à environ 150 millions de kilomètres. Comme les autres, c'est un gigantesque ballon de gaz lumineux, qui brille parce que l'hydrogène se transforme par fusion nucléaire en hélium, en dégageant une énergie considérable. Il fournit toute la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur Terre et exerce une influence fondamentale sur notre planète [12].

Le soleil est composé à 74,5% d'hydrogène et à 23,5% d'hélium, le 2% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. Il est généralement accepté que la source d'énergie du soleil est une réaction thermonucléaire hydrogène-hélium; les détails de cette réaction sont peu connus et jamais encore observés en laboratoire. La puissance rayonne à la surface de soleil est donc à peu près égale à $\pi D^2 \sigma T^4$ soit $3,79 \cdot 10^{26}$. Seule une puissance de l'ordre de $1,7 \cdot 10^{17}$ W est interceptée par la terre; 30% de ce flux est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbé et réémis vers sous forme de rayonnement dans l'infrarouge, 23% sert de source d'énergie au cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère et 0,5% se trouve sous forme de photosynthèse dans les plantes [13].

1.6.1. Quelques données physiques du soleil

Tableau 1: Quelques données physiques du soleil [14]

Le Soleil	
Masse	2×10^{33} kilogramme = 335.000 masse terrestre
Diamètre	1.4 million kilomètres = 109 diamètre terrestre
Densité	1400 kg/m^3 (eau = 1000 kg/m^3)
Age	approximativement 4600 million d'années
Luminosité (énergie produite)	4×10^{23} kilowatts
Température de surface	environ 5500°C (5800k)
Température centrale	environ 14 million de degrés
Composition (par la masse atomique)	74.5 % d'hydrogène, 23.5 % d'hélium et éléments plus lourds 2 % par exemple oxygène, carbone et azote
Composition (par le nombre d'atomes)	94 % d'hydrogène, 6 % d'hélium et éléments plus lourds

1.6.2. Constante solaire

La constante solaire se dit de l'éclairement énergétique d'une surface normale aux rayons solaires, située à la limite de l'atmosphère. Cette valeur est fixée à 1353W/m^2 .

Le rayonnement solaire dirigé vers la terre est en partie absorbé par l'atmosphère et en partie renvoyé dans l'espace.

$$I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$$

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1,6\%$ de la distance terre-soleil et donc une variation de ce flux.

Le rayonnement émis par le soleil comporte des ondes électromagnétiques dont une partie, appelée le rayonnement solaire, ne cesse de parvenir à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la valeur prise par la température superficielle du soleil environ 5500K , l'énergie de rayonnement que ce rayonnement électromagnétique transmet à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre $0,4$ et $0,7\mu\text{m}$ de longueur d'onde environ), et le proche infrarouge (entre $0,7$ et $4 \mu\text{m}$ environ); cette énergie correspond à un éclairement de quelque 340 watts par mètre carré ou w. m^{-2} (voir la figure 6). Mais sur cette quantité d'éclairement qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ 100w.m^{-2} sont réfléchis vers l'espace: seul le reste est absorbé, disons, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre.

Tout d'abord, près du quart de cet éclairement incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère: pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (environ 65w.m^{-2}) le reste étant du autres constituants atmosphériques(gaz et aérosols), qui réfléchissent environ 15w.m^{-2} ; en outre, l'atmosphère et ses nuages prélèvent absorption 80w.m^{-2} environ sur l'éclairement solaire: restent donc approximativement 180w.m^{-2} qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont à peu près les deux tiers se font directement, le reste s'effectuant par diffusion vers le bas; c'est grâce à ce rayonnement diffus que l'on peut voir sans interruption pendant le jour même quand les nuages cachent le soleil.

Ici intervient un processus assez complexe d'interaction entre diffusion vers le bas et réflexion : la surface terrestre , possédant un albédo moyen élevé, devrait renvoyer dans l'atmosphère environ 50w.m^{-2} sur les quelque 180w.m^{-2} incidents; mais en fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard par diffusion vers le bas depuis le milieu atmosphérique et

s'ajoute partiellement aux 130w.m^{-2} (environ) de rayonnement solaire non réfléchis à son contact. Bien qu'il n'existe pas dans la réalité deux instants distincts pour l'absorption par la surface terrestre, mais un phénomène continu d'absorption du rayonnement solaire, on peut résumer le processus précédent en disant que tout se passe comme si les 50w.m^{-2} réfléchis par cette surface se répartissaient entre 20w.m^{-2} (environ) définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire après diffusion vers le haut à travers l'atmosphère et 30w.m^{-2} (environ) retournant à la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Ces 30w.m^{-2} s'ajoutent aux 130w.m^{-2} initialement non réfléchis pour constituer approximativement les 160w.m^{-2} pratiquement la moitié du rayonnement solaire qu'absorbe la surface terrestre.

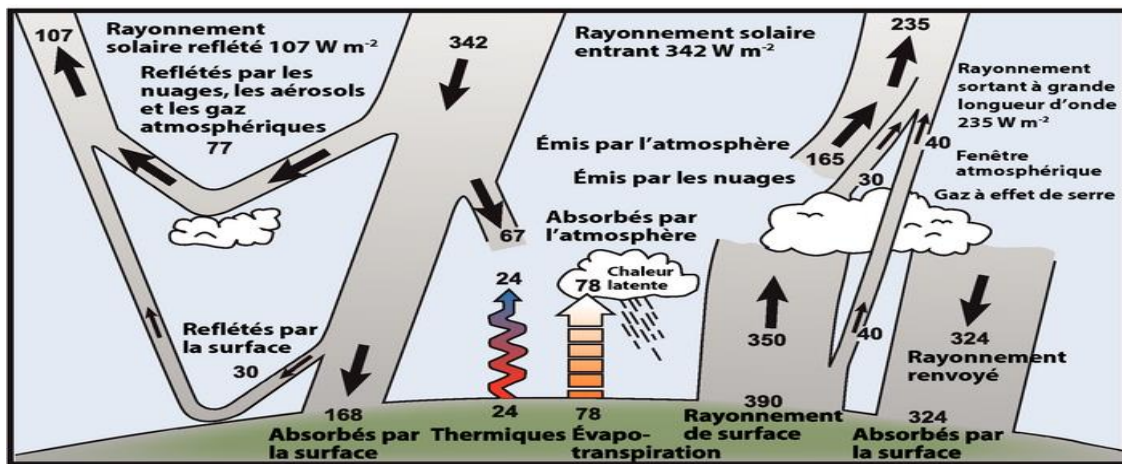


Figure 6: Bilan énergétique de la terre

1.6.3. Albédo

Considérons un milieu physique pourvu d'une surface qui reçoit un rayonnement électromagnétique bien déterminé, par exemple un élément de la surface terrestre sur lequel parvient le rayonnement solaire. Une partie du rayonnement incident va être renvoyée vers le milieu où il se propageait, après avoir subi une réflexion contre la surface du milieu recevant le rayonnement. L'albédo du milieu considéré est alors, comme l'indique la (figure7), le rapport du flux de rayonnement réfléchi par ce milieu au flux de rayonnement incident [15].

Autrement dit : l'albédo est la fraction du rayonnement solaire directement renvoyée vers l'espace (réflexion ou diffusion) par la surface terrestre ou par l'atmosphère.

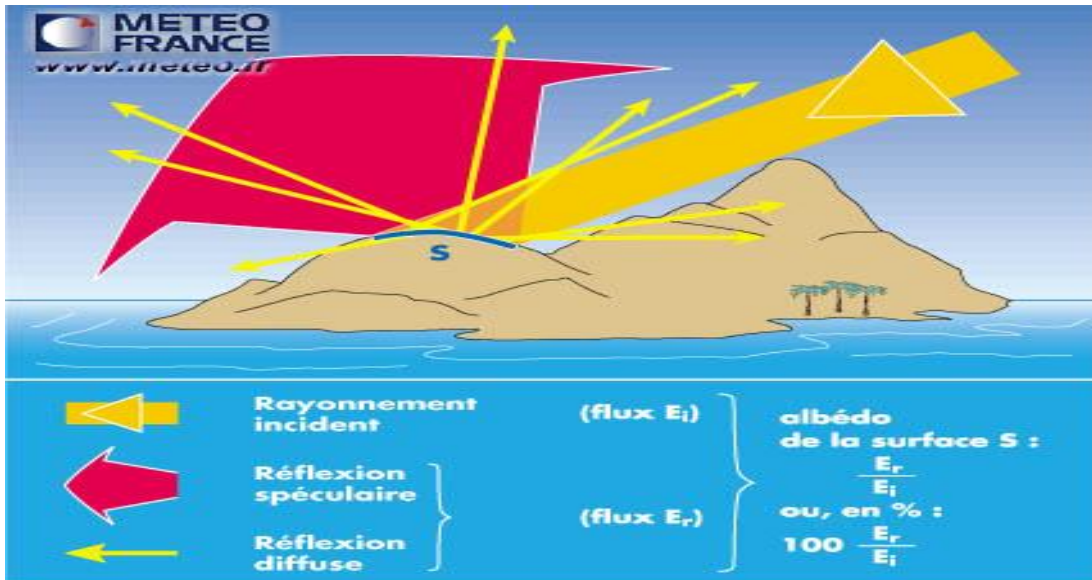


Figure 7: l'albédo

1.7. Cordonnées terrestres

En première approximation, notre planète peut être considérée comme une sphère, tournant sur elle-même autour de l'axe des pôles. L'Equateur correspond à la section diamétrale de cette sphère par un plan perpendiculaire à l'axe des pôles (plan équatorial), alors que les pôles sont définis par l'intersection de cet axe de rotation avec la surface de la terre [16].

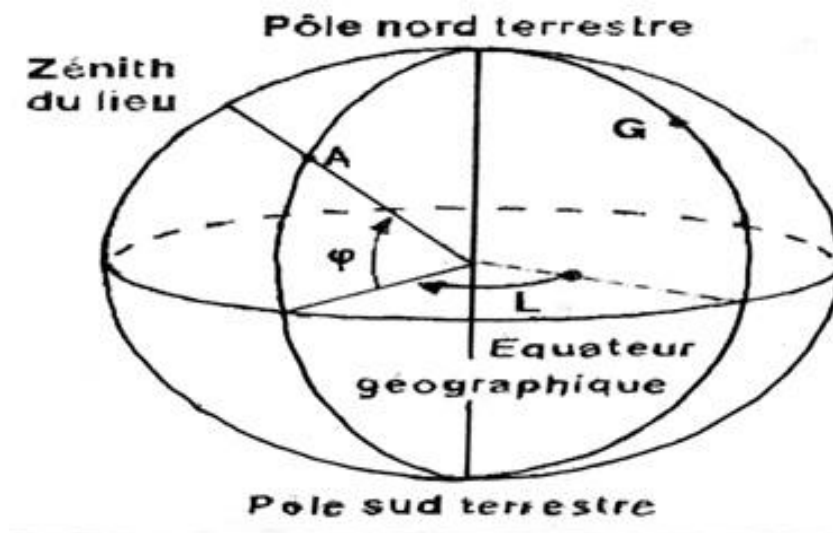


Figure 8 : Cordonnées terrestres

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques : Longitude, latitude, ainsi que par son altitude.

-La longitude d'un lieu correspond à l'angle que fait le plan méridien par ce lieu avec un plan méridien retenu comme origine. On a choisi pour méridien origine 0° le plan passant par l'observatoire de Greenwich.

-La latitude d'un lieu correspond à l'angle, avec le plan équatorial, que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° .

-L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface référence théorique, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer. On l'exprime généralement en mètre.

Conclusion

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le lieu même où elles sont produites).

Chapitre 2:

Les systèmes photovoltaïques

Chapitre 2

Les systèmes photovoltaïques

Introduction

Parmi les moyens d'exploitation du gisement solaire, nous citons la transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque. Le terme (photopile) est très souvent utilisé pour désigner la cellule photovoltaïque (PV). Il faut cependant noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un cne cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif.

2.1. Conversion de la lumière en électricité

La lumière se compose de photons, «grains de lumière», chacun porteur d'une énergie dépendant de sa longueur d'onde. Ces photons peuvent pénétrer dans certaines matières, et même passer au travers: les objets transparents pour notre œil laissent passer la lumière visible.

Plus généralement, un rayon lumineux qui arrive sur un solide peut subir trois événements optiques. (Figure 9):

- La réflexion: la lumière est renvoyée par la surface de l'objet,
- La transmission: la lumière traverse l'objet,
- L'absorption: la lumière pénètre dans l'objet et n'en ressort pas, l'énergie est restituée sous une autre forme.

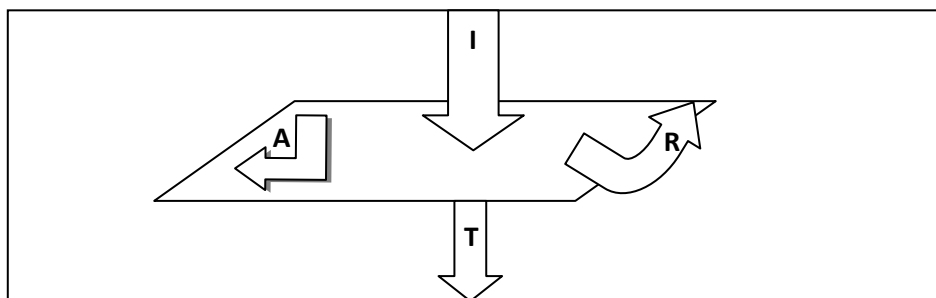


Figure 9: réflexion, transmission et absorption

$$I \text{ (flux incident)} = R \text{ (réfléchi)} + A \text{ (absorbé)} + T \text{ (transmis)}$$

Ce sont les propriétés optiques du matériau rencontré qui conditionnent la répartition de ces diverses contributions.

Prenons l'exemple d'un morceau de verre coloré en rouge. Il transmet la lumière rouge, puisque notre œil la perçoit. La partie réfléchie s'élèvera à 8% du flux lumineux, toutes couleurs confondues, du fait de l'indice de réfraction du verre. Et le reste de la lumière, bleue, jaune, etc. sera absorbé dans la matière.

Cette absorption sera perceptible au toucher sous éclairage intense car le verre va s'échauffer. En effet, dans la plupart des matériaux, la part absorbée de la lumière est convertie en chaleur, c'est-à-dire en rayonnement infrarouge (de longueur d'onde comprise entre 1 μ m, limite rouge du spectre visible, et 1mm, début des ondes radio).

Dans un matériau photovoltaïque, une partie du flux lumineux absorbé sera restituée sous forme d'énergie électrique. Il faut donc au départ que le matériau ait la capacité d'absorber la lumière visible, puisque c'est ce que l'on cherche à convertir : lumière du soleil ou d'autres sources artificielles. On prendra soin également de minimiser les pertes purement optiques par réflexion ou par transmission.

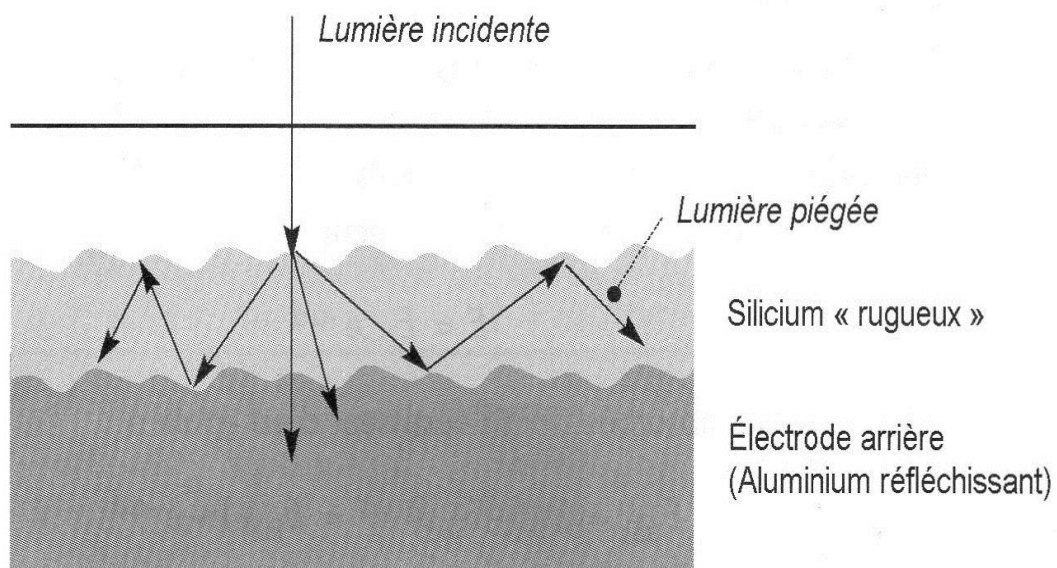


Figure 10: principe du piégeage par diffusion dans une photopile

Quant à la réflexion, elle dépend avant tout des indices de réfraction des matériaux traversés. Plus la différence d'indice est élevée de part et d'autre d'une surface, plus elle est réfléchissante.

Le taux de réflexion s'écrit : $R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2$ si les matériaux en contact sont d'indice n_1 et n_2 .

Donc du silicium brut ($n = 3,75$ à $0,6 \mu\text{m}$) en contact avec l'air ($n = 1$) réfléchit 33% de la lumière qu'il reçoit. Il n'est pas envisageable de perdre un tiers du flux lumineux juste pour cette raison !

En pratique le silicium n'est pas exposé directement à l'air [17].

Le silicium cristallin, lui est enrobé dans une résine EVA, elle-même surmontée d'une plaque de verre protectrice. L'EVA et le verre ont un indice de 1,5 donc il reste un contraste important avec le silicium. Une couche d'indice intermédiaire est donc placée, le silicium; il s'agit d'un oxyde d'indice proche de 2, son épaisseur est optimisée pour jouer le rôle d'antireflet à une longueur d'onde assez centrale ($0,6 \mu\text{m}$ pour le silicium cristallin).

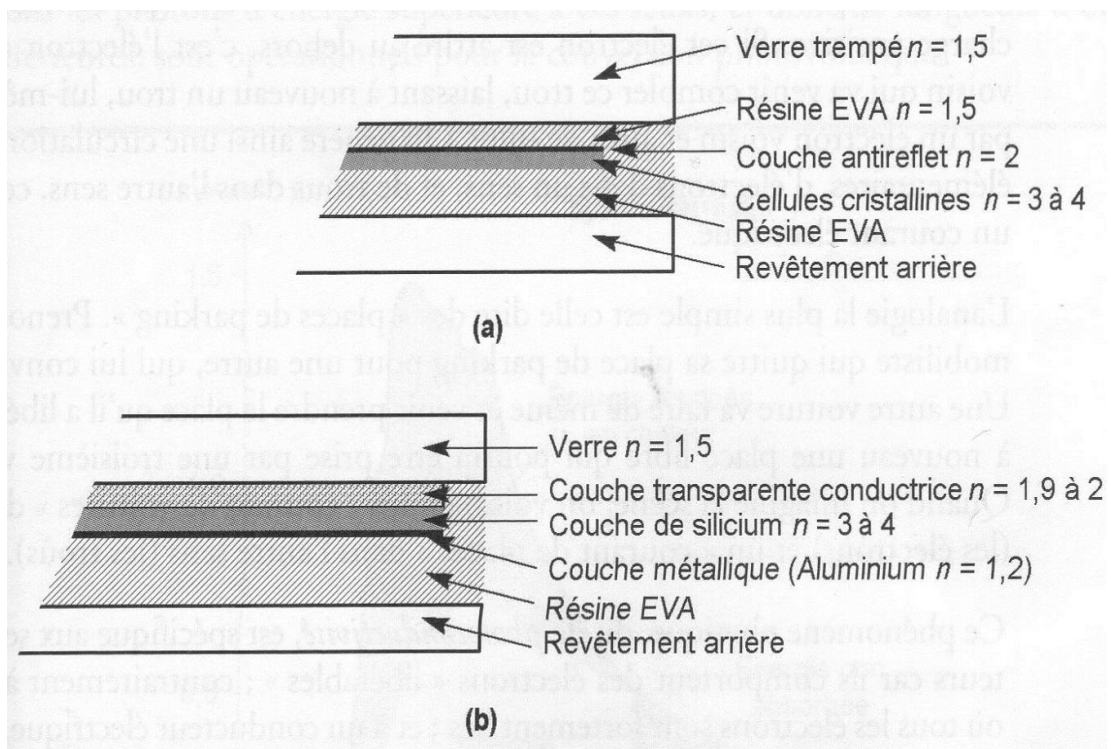


Figure 11: Empilements optiques d'une cellule ; a) Au silicium. b) Au silicium amorphe

Dans le cas du silicium amorphe, l'empilement des indices de réfraction est plus favorable et l'électrode transparent située entre le verre et le silicium joue déjà un rôle d'antireflet puisque son indice est de 1,9 à 2,1 (entre le verre d'indice 1,5 et le silicium d'indice 3 à 4). En revanche, on prendra soin d'optimiser son épaisseur pour favoriser l'entrée de la lumière visible dans le silicium amorphe (dont la réponse est plutôt centrée à $0,5 \mu\text{m}$).

2.2. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques

On va s'intéresser maintenant à la lumière absorbée dans le matériau photovoltaïque et expliquer comment son énergie est convertie en électricité.

Les charges élémentaires qui vont produire le courant électrique sous illumination sont des électrons, charges négatives élémentaires, contenus dans la matière semi conductrice. Tout solide est en effet constitué d'atomes qui comprennent chacun un noyau (de protons et de neutrons) et un ensemble d'électrons gravitant autour.

Les photons absorbés vont tout simplement transférer leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau), leur permettant ainsi de se libérer de l'attraction de leur noyau. Ces électrons libérés sont susceptibles de produire un courant électrique si on les attire ensuite vers l'extérieur [17].

En régime permanent, l'électron libéré laisse un «trou » qui se traduit par une charge positive. Si cet électron est attiré au dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui va venir combler ce trou. Laisant à nouveau un trou, lui-même comblé par un électron voisin et ainsi de suite. On génère ainsi une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens, et de trous dans l'autre sens, ce qui donne un courant électrique.

L'analogie la plus simple est celle dite des «places de parking». Prenons un automobiliste qui quitte sa place de parking pour une autre, qui lui convient mieux. Une autre voiture va faire de même et venir prendre la place qu'il a libérée, laissant à nouveau une place libre qui pourra être prise par une troisième voiture, etc. Quand on imagine la scène, on voit bien un «courant de voitures» dans un sens(les électrons) et un «courant de places» dans l'autre sens(les trous).

Ce phénomène physique, appelé la photoconductivité, est spécifique aux semi-conducteurs car ils comportent des électrons «libérables»; contrairement à un isolant où tous les électrons sont fortement liés; c'est un conducteur électrique, dans lequel il existe une forte densité d'électrons totalement libres.

On comprend aisément qu'il existe, dépendant du matériau, un «seuil» d'énergie minimum nécessaire à cette «libération» des électrons par les photons. Si ce seuil dépend du matériau, c'est tout simplement parce que la structure électronique est différente pour chaque type d'atomes (nombre d'orbitales et quantité d'électrons par atome) et donc les énergies mises en jeu également.

On appelle ce seuil le gap optique du matériau ou la largeur de bande interdite. En effet, si le photon a une énergie inférieure, il ne pourra pas créer la paire électron-trou et ne sera pas absorbé. Les propriétés optiques et électriques sont donc intimement liées.

2.3. La collecte des charges

Pour que les charges libérées par l'illumination soient génératrices d'énergie, il faut qu'elles circulent, il faut donc les «attirer» hors du matériau semi-conducteur dans un circuit électrique.

Sinon, elles se recombinent: l'électron, chargé négativement, neutralisant le «trou» chargé positivement. Autrement dit, les électrons libérés retrouveraient leur état initial à la périphérie de leur atome : cela libérerait de l'énergie thermique (chaleur) mais aucune énergie électrique.

Cette extraction des charges est réalisée au sein d'une jonction créée volontairement dans les semi-conducteurs. Le but est d'engendrer un champ électrique à l'intérieur du matériau, qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté [17].

C'est possible grâce au dopage du semi-conducteur. La jonction d'une photopile au silicium est constituée d'une partie dopée au phosphore (P), dite de type n accolée à une partie dopée du bore (B), dite de type p. C'est à la frontière de ces deux parties que se crée un champ électrique pour séparer les charges positives et négatives.

2.4. L'effet photovoltaïque

2.4.1. Principe de la cellule

Les photopiles sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs. C'est-à-dire ayant des propriétés intermédiaires entre les isolants et les conducteurs [18].

2.4.2. Le matériau

La cellule la plus courante utilise le silicium, très répandu sous forme de silice (sable), mais qui doit être amené à un très grand état de pureté et sous forme de monocristal.

En effet, le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des "impuretés") sont substitués dans un réseau cristallin (dopage).

-Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès: il sera dit de type "n" (ex. silicium dopé au phosphore)

-Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons: il sera dit de type "p" (ex. silicium dopé au bore) [18].

2.4.3. Dopage des semi-conducteurs

Le dopage d'un semi-conducteur pur va permettre d'amener des charges excédentaires qui amélioreront la conductivité du matériau.

La figure 12; représente une vue schématisée, à plat, des atomes de silicium (à 4 électrons dans la couche externe) qui sont chacun liés à quatre autres atomes de silicium. [17]

A l'état pur, le silicium dit intrinsèque n'est pas très photoconducteur.

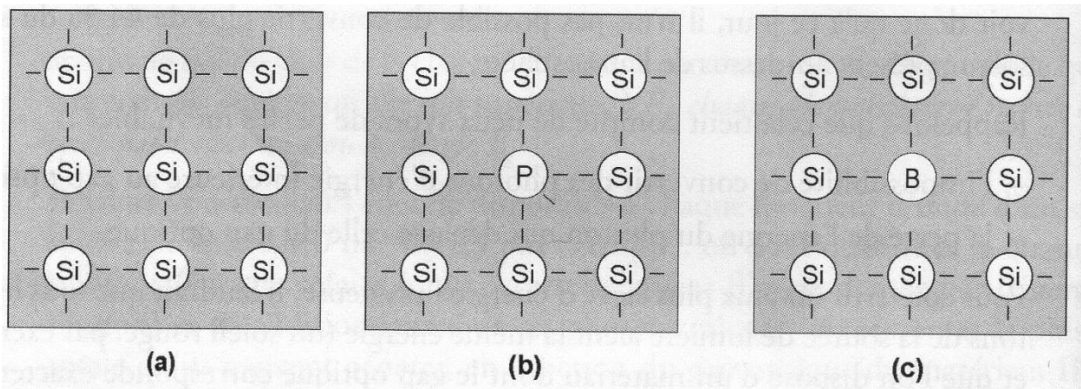


Figure 12: a) Silicium pur (intrinsèque). b) Silicium de type n. c) silicium de type p.

En le dopant avec des atomes étrangers de phosphore qui ont 5 électrons dans leur couche externe, un électron par atome de phosphore ne pourra pas se lier avec ses correspondants du silicium, il y aura alors un excédent de charges négatives dans le cristal (figure 12-b). Le matériau sera donc potentiellement donneur d'électrons, disponibles pour la conduction électrique, et le silicium ainsi dopé est appelé silicium de type n.

Par symétrie, on peut également doper le silicium avec du bore qui a seulement trois électrons dans sa bande de valence. Le résultat est l'apparition d'un excédent de trous donc de charges positives, puisqu'il manque un électron à chaque atome de bore pour compléter les 4 électrons du silicium (figure 12). Le matériau est à l'inverse du précédent accepteur d'électrons. Ce matériau ainsi dopé est appelé silicium de type P.

2.4.4. Jonctions p-n et p-i-n

La mise en contact de deux zones à dopages opposés dans un semi-conducteur constitue un élément fort connu : la diode. A l'interface où les concentrations d'atomes étrangers font passer le silicium du type p au type n apparaît une région appelée zone de charge d'espace qui provient de la tendance des électrons excédentaires de la couche à vouloir passer du cote n par réciprocity.

Cet échange de porteurs dans la zone de charge spatiale crée un champ électrique qui va contrebalancer l'échange de charges et rétablir l'équilibre thermique.

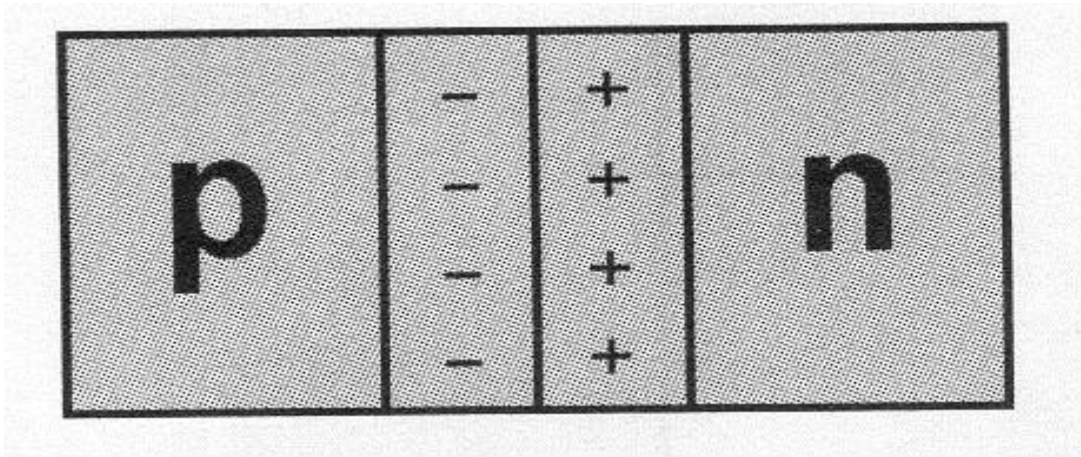


Figure13: représentation schématique d'une jonction p-n

La cellule solaire est donc le plus souvent une tranche de silicium dopé «p» d'un côté et «n» de l'autre, à laquelle on ajoute des contacts électriques pour collecter le courant. Cette jonction a donc les caractéristiques électriques d'une diode au silicium classique avec, sous illumination, apparition d'une photo courant indépendant de la tension et proportionnelle au flux lumineux et à la surface de la cellule [17].

Mais cette simple structure p-n, adaptée au silicium cristallin, n'est pas suffisante dans tous les cas, par exemple, un silicium amorphe dopé de type p n'est pas un très bon photoconducteur, et il est préférable que la conversion photovoltaïque se produise dans un matériau non dopé, donc intrinsèque, et noté «i». La cellule au silicium amorphe classique se compose donc de 3 couche : p-i-n. La couche «i» placée au centre du dispositif est la plus épaisse, et sert à la conversion des charges. Les couches p et n, quant à elles, permettent la création du champ électrique interne qui s'étend dans toute la couche i, ce qui favorise la séparation des charges.

2.4.5. Orientation et inclinaison des modules

La position des modules photovoltaïques par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs possibilités. On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, Nord, Sud-ouest...). Quant à l'inclinaison, elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés [17].

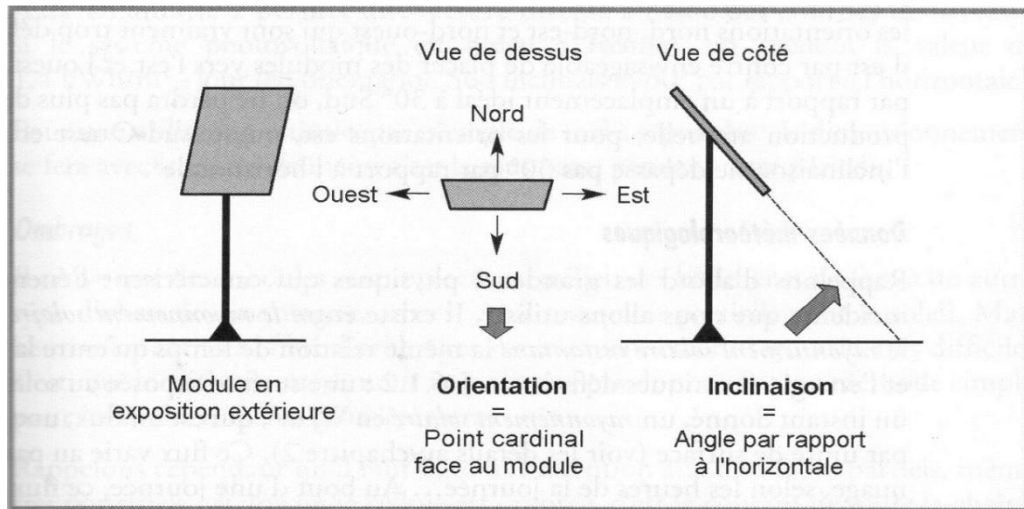


Figure14: définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau

Quand on a le choix, l'orientation idéale d'un module photovoltaïque obéit à une règle qui est très simple à retenir: vers l'équateur, ce qui donne:

- orientation vers le sud dans l'hémisphère nord
- orientation vers le nord dans l'hémisphère sud

En ce qui concerne l'inclinaison, c'est un peu plus compliqué. Prenons d'abord le cas d'une application autonome qui consomme une énergie quasi-constante tout au long de l'année. L'hiver étant la période la moins ensoleillée, c'est à cette période qu'il faut optimiser la production. Les panneaux doivent donc pouvoir récupérer l'énergie d'un soleil dont la hauteur est faible. Il en résulte qu'en Europe, pour une utilisation annuelle, l'inclinaison idéale est environ égale à la latitude du lieu + 10° (pour une orientation sud). Cela donne en France et en Suisse une implantation dite (60° Sud) orientation sud et inclinaison à 60° par rapport à l'horizontale.

Quand l'application fonctionne seulement en période estivale, une inclinaison de 20 à 30° est préférable, toujours pour une orientation sud.

Lorsque le champ photovoltaïque est connecté au réseau, le raisonnement est un peu différent puisque l'utilisateur revend l'intégralité de l'énergie que produisent ses panneaux. Il a donc intérêt à produire le plus possible sur l'année entière, et non plus sur une saison donnée. L'optimum se situe donc entre 15 et 45° en Europe du Sud et entre 25 et 60° en Europe du Nord, toujours pour une orientation plein Sud, bien entendu.

Cette orientation sud n'est pas toujours possible sur une habitation à cause de son implantation par rapport aux points cardinaux. Si on exclut généralement les orientations nord, nord-est et nord-

ouest qui sont vraiment trop défavorables, il est par contre envisageable de placer des modules vers l'est et l'ouest. En effet, par rapport à un emplacement idéale à 30° Sud, on ne perdra pas plus de 15% en production annuelle, pour les orientations est, ouest sud-ouest et sud-est si l'inclinaison ne dépasse pas 30° par rapport à l'horizontale.

2.4.6. Le rendement

Le rendement d'une cellule est le rapport entre l'énergie électrique qu'elle fournit et l'énergie solaire reçue sur l'ensemble de sa surface. Toute l'énergie de la lumière solaire n'est pas transformée en électricité.

- Certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles(d)
- Certains ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron ($E < E_g$).

Dans le silicium, le seuil correspond à une longueur d'onde de 1.1 μm ; la partie infrarouge du spectre solaire est inutilisée. (c)

-Seuls les photons d'énergie suffisant ($E > E_g$) sont absorbés et créent des paires électrons-trous. L'énergie excédentaire est cédée aux électrons sous forme d'énergie cinétique qu'ils perdent rapidement pour se retrouver sous forme de chaleur. (b)

-Enfin de nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile.

Ces différents phénomènes limitent théoriquement le rendement à 22% pour le silicium monocristallin. Pratiquement les photopiles, actuellement les plus utilisées pour des raisons de coût, ont un rendement typique de l'ordre de 12 à 14%**[18]**.

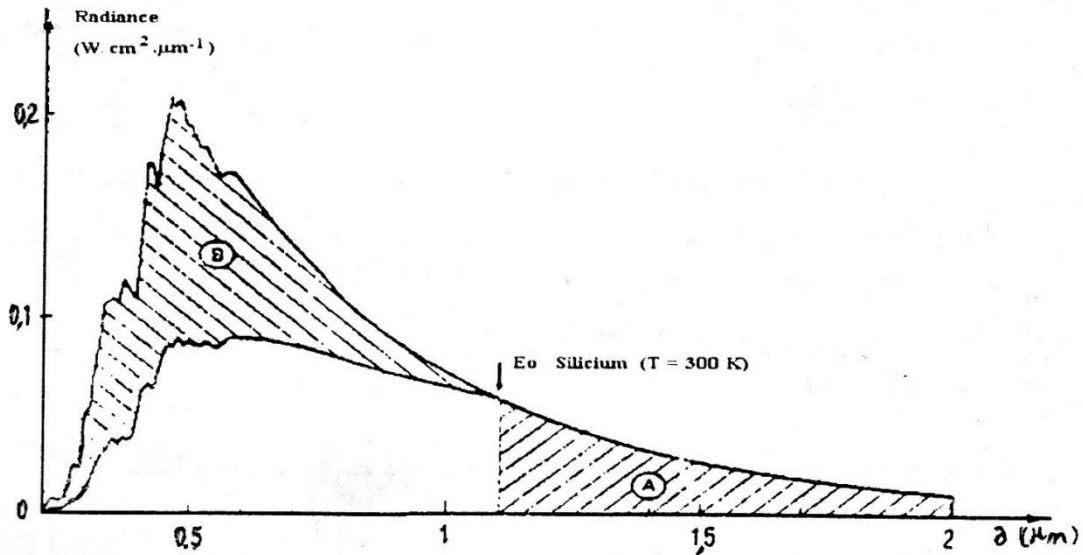


Figure 15: Le rendement

Exploitation du spectre solaire par une cellule au silicium Si (Figure 15) :

- La zone A correspond à l'énergie perdue par les photons non absorbés (c)
- La zone B correspond à l'excès d'énergie, non utilisé, des photons d'énergie supérieure à E (b)

2.5. Les systèmes photovoltaïques

On ne peut pas considérer les modules photovoltaïques comme simple générateurs d'énergie électrique en remplacement d'un réseau. Mais on peut associer étroitement ces modules à un système complet pour une application bien spécifique correspondant à un besoin défini. Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés sont de deux types:

2.5.1 Les systèmes photovoltaïques avec stockage électrique (Batterie d'accumulateurs électriques).

Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation

- Soit directement en courant continu.
- Soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-alternatif (onduleur).

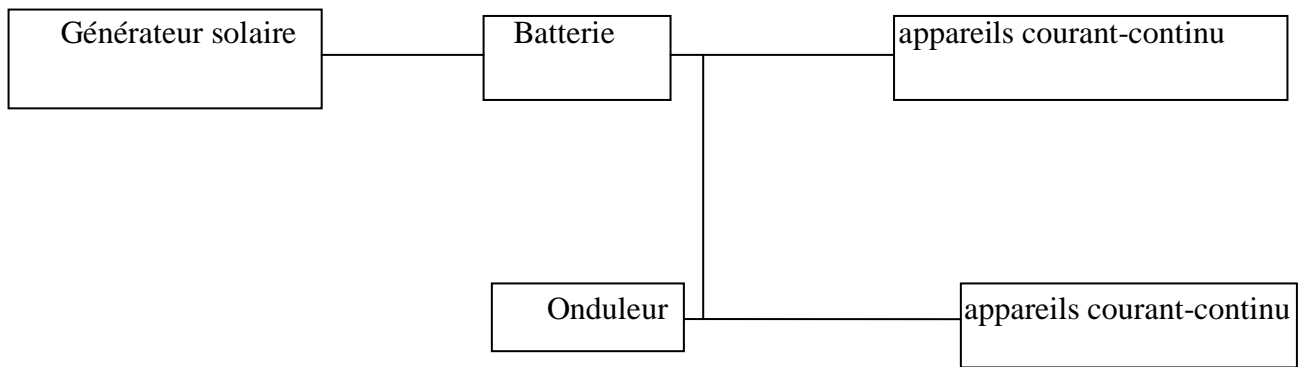


Figure 16: Systèmes photovoltaïques avec stockage électrique [18].

2.5.2. Les systèmes à couplage direct sans batterie

(Fonctionnement dit aussi "au fil du soleil"). Les appareils sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit éventuellement par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu (adaptateur d'impédance).

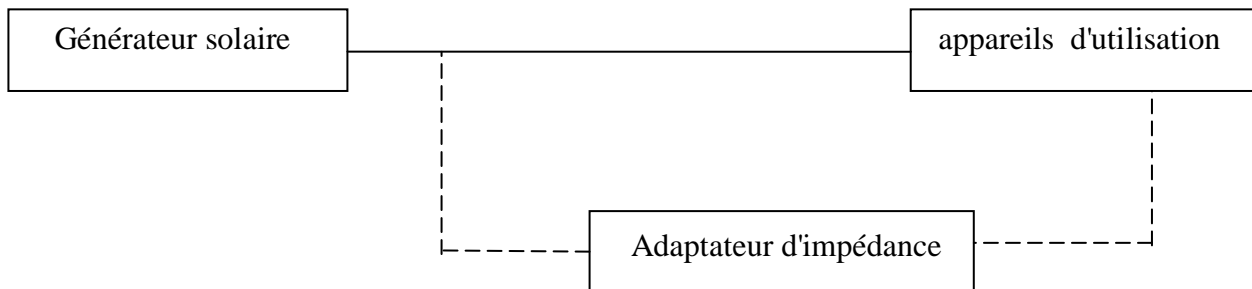


Figure 17: Systèmes à couplage direct sans batterie [18].

Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à un stockage mais qui ne sera pas sous forme électrique.

Ex -Pompage \implies Stockage par réservoir d'eau

-Réfrigération \implies Stockage de froid (stockage eutectique)

Le choix de tel ou tel système se fera en fonction de différents critères : simplicité, application, environnement..... etc.

Toutefois l'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge constituée soit d'une batterie, soit d'une charge quelconque par rapport à l'ensemble des modules solaires.

Comme on a vu précédemment, on recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Un système photovoltaïque est donc constitué du générateur, et des charges à alimenter. Ces charges sont de type courant-continu ou courant-alternatif. Les diverses composantes d'un système photovoltaïque sont représentées symboliquement sur le schéma général suivant (figure 18). Cette représentation synoptique recouvre à peu près tous les cas de figure, mais il est bien certain qu'un système photovoltaïque ne comporte en général qu'un certain nombre des éléments représentés ici.

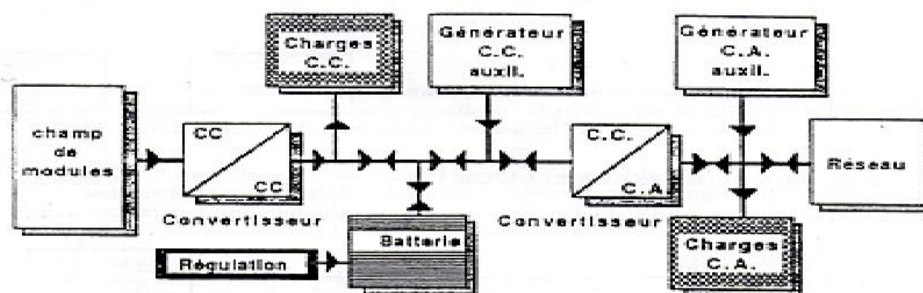


Figure 18: Les diverses composantes d'un système photovoltaïque

2.6. Les systèmes photovoltaïques avec batterie

2.6.1. Principe de fonctionnement

Un générateur photovoltaïque avec batterie comprend généralement différents composants de base comme l'indique la figure suivante.

- Le champ de modules photovoltaïques charge la batterie en période d'ensoleillement.
- La batterie d'accumulateurs assure le stockage journalier et saisonnier de l'énergie électrique.
- La diode anti-retour évite la décharge des accumulateurs à travers le panneau solaire en période d'obscurité.

-Le régulateur de charge protège la batterie contre la surcharge et éventuellement contre les décharges profondes occasionnelles.

Chaque composant du système devra être déterminé en fonction des contraintes techniques et économiques [18].

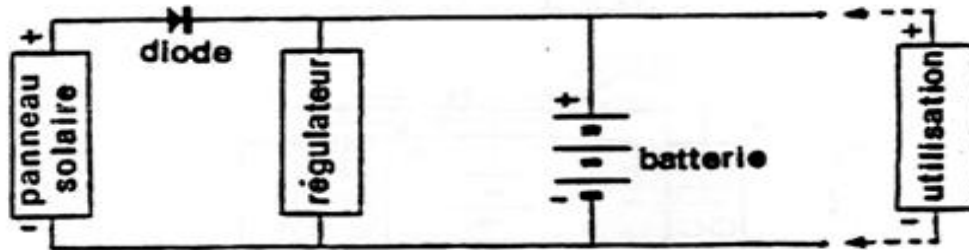


Figure 19: composants de base d'un générateur photovoltaïque avec batterie

2.6.2. Description

Le système photovoltaïque est l'ensemble du générateur photovoltaïque, des équipements de consommation (charge) et d'un onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif. La figure ci-dessous représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

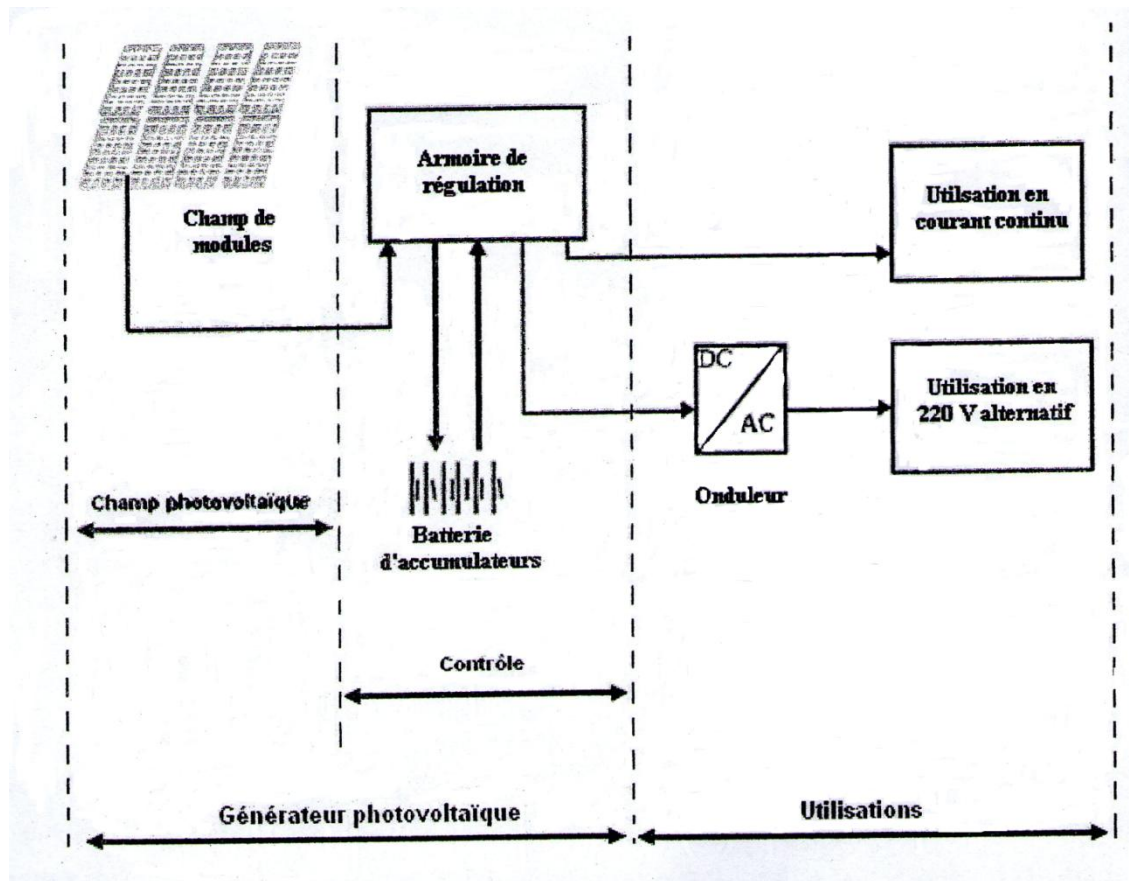


Figure 20: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque comprend en général cinq sous-ensemble (dont 2 optionnels):

- a) Le champ de modules produit l'énergie.
- b) L'armoire de régulation gère le système.
- c) Le parc de batterie stocke l'énergie
- d). L'onduleur (optionnel) transforme l'énergie
- e) Le chargeur (optionnel) permet de recharger la batterie à partir d'un groupe électrogène d'appoint en cas de besoins [19].

a) Le champ de modules

Le nombre de module qui constituent le générateur photovoltaïque est déterminé à partir des besoins en énergie électrique du futur utilisateur et des caractéristiques climatiques du site :

ensoleillement, température, etc.

b) L'armoire électrique

L'armoire électrique relie entre eux les différents éléments du générateur photovoltaïque autonome. Elle rassemble les protections réglementaires nécessaires à toute installation électrique (respect des normes en vigueur) et accueille le système de régulation.

La partie régulation de l'armoire électrique assure plusieurs fonctions :

- Régulation de la charge de la batterie par limitation de la tension pour éviter les surcharges.
- Limitation de la charge de la batterie par délestage de l'utilisation, pour éviter les décharges trop profondes risquant d'endommager la batterie.
- Contrôle du fonctionnement du générateur, par voyants et appareils de mesure : ampèremètre, voltmètre, ampèreheure mètre, enregistreur de données.

c) Le parc de batterie

La batterie d'accumulateurs stocke l'énergie produite par les modules pour assurer l'alimentation des récepteurs en toute période. Elle est constituée d'éléments de 2, 6, ou 12 V. La tension et la capacité désirées s'obtiennent par un couplage série / parallèle des éléments.

La capacité est déterminée en fonction des besoins des usagers, du mode de consommation de l'énergie et du nombre de jours d'autonomie souhaité. Pour un habitat dans les Pyrénées Orientales, on prévoira environ 7 jours d'autonomie, dans le Jura ce sera plutôt 15 jours.

La durée de vie des batteries stationnaires au plomb est d'environ 8 à 10 ans (sous réserve d'une bonne gestion, rôle de la régulation).

d) L'onduleur et le chargeur

L'onduleur est un appareil permettant de transformer le courant continu en courant alternatif et d'alimenter les récepteurs en alternatif à partir de l'énergie stockée dans la batterie.

Certains onduleurs ont la particularité d'être réversibles, c'est-à-dire qu'ils sont aussi capables de tenir le rôle de chargeur en convertissant le courant alternatif provenant d'une autre source alternative (groupe électrogène, réseau, pico turbine hydroélectrique, éolienne), en courant continu pour charger la batterie.

Si cela n'est pas le cas, on rajoute un chargeur indépendant.

Les dimensions de l'onduleur et du chargeur doivent être adaptées à la puissance des appareils à alimenter et à la capacité du parc de batteries auquel ils sont reliés [19].

2.6.3 Stockage de l'énergie

Le fait que l'énergie solaire ne soit pas disponible sur l'ensemble d'une période de fonctionnement du système alimenté impose l'utilisation d'un organe de stockage de l'énergie électrique dans les installations autonomes.

Les fonctions de cet organe consistent à:

- Permettre un déséquilibre entre la production et la consommation
- Permettre une puissance élevée sur un temps court, compatible avec la production journalière, avec une puissance de production installée faible.
- Pour les systèmes solaires, l'énergie est stockée sous la forme d'un courant continu.

Deux types de batteries sont utilisés :

-Les accumulateurs au plomb/acide (Pb/Pb SO₄) qui sont les plus utilisés vu leur bon rendement énergétique de charge/décharge ; environ 70%.

-Les accumulateurs cadmium/nickel sont les plus chers, mais ils sont aussi très résistants aux surcharges et aux décharges, comme ils ont une bonne aptitude au cyclage et résistent bien aux basses températures [19].

a) Types d'accumulateurs

- Accumulateurs au plomb
- Accumulateurs alcalin
- Accumulateurs en argent

b) Caractéristiques des accumulateurs

-L'autodécharge : C'est la perte de la capacité de la batterie au repos exprimée en général en %mois. Elle augmente avec l'âge et la température.

-La décharge profonde : Il s'agit de la décharge maximale de l'accumulateur qui n'est tolérable que quelques jours par an (1 à 3 jours par an). Les batteries solaires peuvent être déchargées jusqu'à 80 % de leur capacité totale.

-La capacité d'un accumulateur : La capacité d'un élément d'accumulateur est la quantité d'électricité qu'un élément chargé peut fournir pendant la période de décharge, elle s'exprime en Ampère-heure [Ah]. La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge et de la température. Plus le régime de décharge est élevé et plus la capacité diminue.

-La tenue en cycles : Dépendant beaucoup de la profondeur de décharge, ce paramètre varie typiquement de 400 cycles à 80% de décharge à 2000 cycle à 40 % de décharge.

-La tension nominale : La tension nominale aux bornes d'un élément d'accumulateur au plomb est de 2V, elle est de 1.2V pour des accumulateurs cadmium/nickel.

-La durée de vie : Elle dépend principalement du nombre de cycle charge/décharge. Elle est de 2 à 7 ans pour les batteries au plomb et de 10 à 25 ans pour celles du cadmium/nickel.

-Le rendement énergétique (ρ) : Il est donné par $\rho = \frac{\text{nombre d'Ah fournis pendant la décharge}}{\text{nombre d'Ah fournis pendant la charge}}$.

-Les avantages de ces deux types d'accumulateurs sont :

1- Une très bonne résistance mécanique (application embarquées)

2- Le gel support les températures élevées

-Les inconvénients de ces deux types d'accumulateurs sont:

1-Cout élevé (cout multiplié par 5 par rapport aux accumulateurs au plomb)

2-Tension par élément 1.2V ou 2V

3-Risque de tension en fin de charge s'il n'y a pas de régulateur de fin de charge car la tension pour une batterie de 12V peut dépasser 18V (risque éventuels de détérioration de certains récepteurs) ;

c) Installation des batteries

-Maintenir toujours les batteries en position verticale.

-Eviter, durant les manipulations, de renverser l'acide des batteries.

-Ne jamais toucher les batteries avec des outils non isolés.

-Le local où les batteries sont installées doit être ventilé, calorifugé et non accessible aux enfants.

-Les accumulateurs peuvent être placés à l'intérieur ou à l'extérieur. Lorsque les accumulateurs sont situés dans une structure habitée, il faut s'assurer que l'endroit où ils sont gardés est muni d'une bouche d'aération donnant sur l'extérieur. Lorsque les accumulateurs sont gardés à l'extérieur, on devrait les placer dans un coffre ou un abri quelconque. La température favorable aux accumulateurs est de 25°C [19].

-Lors de l'installation du générateur photovoltaïque, il est impératif de connecter d'abord la batterie aux bornes du régulateur prévu à cet effet, en respectant bien les polarités; ensuite, les panneaux solaires et enfin les appareils de consommation. Le démontage suit la séquence inverse : appareils, modules puis la batterie.

2.6.4 Le régulateur de tension

C'est un dispositif électronique qui permet d'effectuer une régulation de la charge et de la décharge. Il protège les batteries des surcharges et des décharges excessives et prolonge la durée de vie des batteries. Ainsi quand l'énergie produite est supérieure à l'énergie consommée, l'excédent d'électricité est stocké dans la batterie jusqu'à ce que la limite de charge de la batterie soit atteinte. Inversement, quand l'énergie produite est inférieure à l'énergie consommée, la batterie fournit la quantité d'électricité supplémentaire nécessaire pour faire fonctionner les applications; ainsi il a essentiellement un rôle de protection contre la surcharge ou la décharge profonde de la batterie. Il évite également qu'en fin de charge d'une batterie ne se produise un phénomène de surcharge qui amènerait une ébullition provoquant une perte d'eau et que la décharge ne dépasse un seuil limite de la capacité de la batterie, ce qui l'endommagerait.

Les régulateurs sont donc réglés à des tensions de coupure (seuil haut et seuil bas) qui correspondent aux limites qu'il ne faudrait pas dépasser. On distingue alors deux parties :

- Une partie de régulation de charge : La batterie est complètement chargée. Dans ce cas, le régulateur déconnecte la batterie du panneau photovoltaïque pour éviter la consommation d'eau, le dégagement d'hydrogène et l'oxydation des tablettes.

- Une partie de régulation de la décharge : Les accumulateurs sont complètement déchargés par absence d'énergie solaire. Dans ce cas, le régulateur coupe l'utilisation car il y a risque que les tablettes négatives se recouvrent de sulfate de plomb [19].

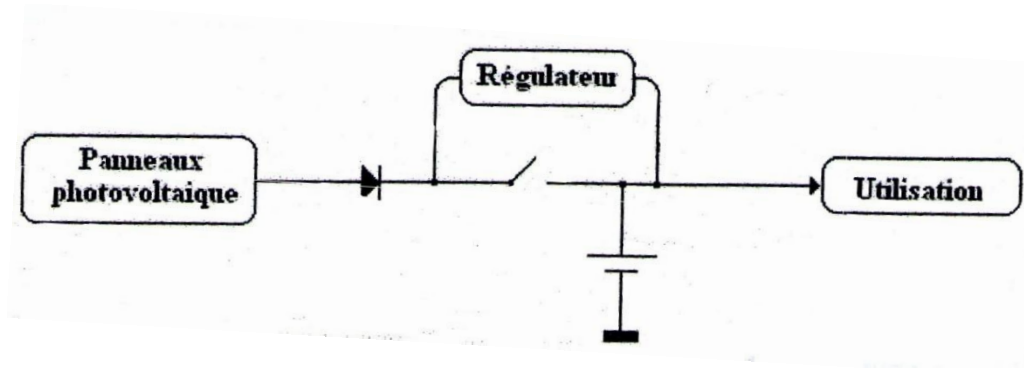


Figure21: Schéma de principe d'un régulateur de charge/décharge

- **Types de régulateurs**

Il existe différents types de régulateur, parmi lesquels nous citerons :

- L'autorégulateur (self régulation)
- Le régulateur Shunt
- Le régulateur série
- Le régulateur à déconnection partielle
- Le régulateur à découpage
- Le régulateur suiveur du point de puissance maximale

2.6.5 Le tableau de distribution

Ce coffret est le siège des départs vers les charges. Il comporte les éléments de protection et de distribution électrique. Cette armoire contient les composants assurant les fonctions suivantes:

- La protection des charges et de l'onduleur
- L'enregistrement des consommations
- L'affichage des tensions et courants du système
- Des alarmes, fusibles, disjoncteurs
- Les bornes de branchement en AC

2.6.6 Avantages et inconvénients

a) Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages:

-D'abord, une haute fiabilité-elle ne comporte pas de pièces mobiles – qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

-Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétique divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

-Leurs couts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

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

b) Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

-La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologique et requiert des investissements d'un cout élevé.

-Le rendement réel de conversion d'un module est fiable (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).

-Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

-Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le cout du générateur photovoltaïque est accru [19].

2.6.7 Domaines d'application

- a) Domaine spatial
- b) Habitation isolée
- c) Industrie isolée
- d) Centrale de puissance
- e) Résidence urbaine
- f) Biens de consommation

a) Domaine spatial

C'est de loin le secteur le plus ancien puisque les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante. Depuis lors, des recherches et développements nombreux ont été réalisés dans le domaine militaire (NASA aux Etats-Unis) et public (ESA en Europe) pour accroître les performances électriques tout en réduisant le poids des modules.

b) Habitation isolée

L'approvisionnement en électricité dans les régions rurales isolées est un problème d'actualité, en particulier dans les pays en voie de développement. L'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées n'est pas rentable pour les sociétés d'électricité. Bien que la solution des groupes électrogènes (Diesel) présente beaucoup d'inconvénients (peu fiable, peu autonomes et l'entretien), ils ont souvent été choisis pour leur cout d'investissement modéré. En effet, le cout initial élevé d'un générateur photovoltaïque est l'obstacle majeur à son expansion sur ce type de marché, en particulier dans les pays en voie de développement où les taux d'intérêt sont souvent très élevés.

De nombreuses organisations internationales d'aide aux pays en voie de développement ont choisi la technologie photovoltaïque comme outil de développement social et économique pour fournir des services de base à la population, tels que:

-**le pompage de l'eau** pour la consommation du village ou pour l'irrigation,

-**la réfrigération** pour la production de glace et la conservation de vaccins, sang, produits agricoles,....,

-**l'éclairage** (lampe portative, éclairage public, électrification villageoise,...)

c) Industrie isolée

La technologie photovoltaïque est de plus couramment intégrée dans les programmes nationaux d'électrification rurale (habitations domestiques, écoles, centres de santé, télécommunication,...). Beaucoup d'applications professionnelles exigent une source d'électricité hautement fiable, autonome, sans entretien et sans combustible. Le générateur photovoltaïque est de loin l'option la plus séduisante; on l'utilise avec succès dans les télécommunications (stations-relais pour TV, radio, téléphonie, émetteur-récepteur,...).

d) Centrale de puissance

Avec les applications photovoltaïques connectées au réseau national d'électricité, une nouvelle tendance se dégage; elle est caractérisée par un fort potentiel de diffusion dans les pays industrialisés. Des centrales de production photovoltaïque sont expérimentées de puis quelques années en Europe, aux Etats-Unis et au Japon, mais elles n'ont pas encore dépassé le stade pilote.

e) Résidence urbaine

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est aussi envisagé en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et façades de bâtiments.

f) Biens de consommation

L'électronique moderne requiert de très petites puissances – du milliwatt à la dizaine de Watts – de sorte que beaucoup de petits appareils peuvent être alimentés par une petite surface de cellules photovoltaïques. Les calculatrices et les montres sont les applications les plus connues.

Les chargeurs de batteries, radios, lampes de poche, luminaires de jardin, systèmes d'alarme, jouets, fontaines, tondeuses à gazon, etc, sont d'autres exemples et cette liste n'est pas limitative [19].

2.6.8 Les modes de fonctionnement

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux sont indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

- **Systèmes Autonomes**

Les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité.

- **Systèmes hybrides**

Les systèmes hybrides, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité, sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible (substance dont la combustion produit de la chaleur ou de l'énergie), ou aux deux à la fois. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année, ou si vous désirez diminuer votre investissement dans les champs de modules photovoltaïques et les batteries d'accumulateurs.

- **Systèmes connectés à un réseau**

Tout ou une partie de l'énergie produite est injectée dans le réseau de distribution électrique. Il existe principalement deux variantes :

-L'injection simple où la totalité de l'énergie produite est injectée dans le réseau.

-L'**injection secours** dans laquelle on utilise des batteries. Cette injection permet de fournir de l'énergie de façon autonome en cas d'absence du réseau public (coupures dues à des aléas climatiques ou techniques). Ainsi une garantie de service de distribution électrique est assurée [19].

2.7. Les systèmes photovoltaïques sans batterie

2.7.1. Charge résistive

En branchant directement une charge résistive sur un panneau photovoltaïque, le point de fonctionnement (I, V) se trouve à l'intersection de la droite de charge $I = V/R$ et de la caractéristique du module solaire I(V).

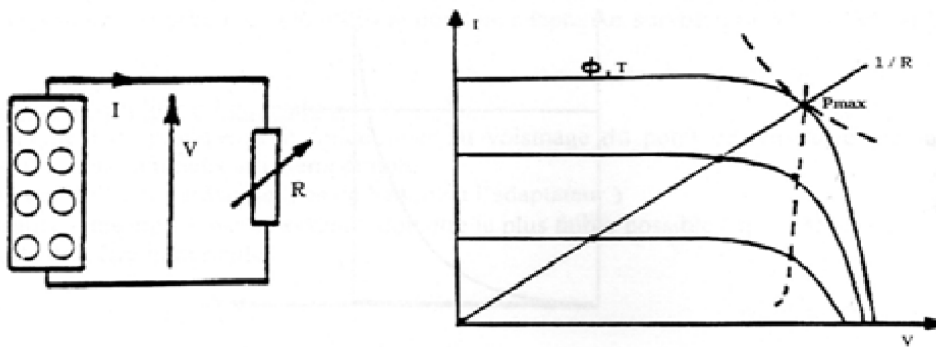


Figure22: Les systèmes photovoltaïques sans batterie (charge résistive)

Si la puissance délivrée à la charge est maximale pour l'ensoleillement, ce n'est plus le cas pour des ensoleillements plus faibles. La charge de type résistive est donc mal adaptée pour un couplage direct et un ensoleillement variable [18].

2.7.2. Charge adaptée

Pour avoir une bonne adaptation, il faut brancher une charge dont la caractéristique I(V) se rapproche au plus près de la courbe de puissance maximale du module solaire, qui est pratiquement verticale. Egalement une batterie d'accumulateurs répond donc à cette contrainte par sa caractéristique en charge I(V) pratiquement verticale ($V_b = E_0 + r I$).

Conclusion

Maintenant que nous connaissons les composants d'un système photovoltaïque, et les diverses applications possible, nous allons aborder le dimensionnement d'un system photovoltaïque

Chapitre 3:
Techniques de maintenance
industrielle

Chapitre 3

Techniques de maintenance industrielle

Introduction

La maintenance s'exerce sur des équipements industriels de production placés dans le contexte économique de l'entreprise.

Chaque équipement plus ou moins complexe, constitue un système technique, conçu pour mettre en œuvre un procédé et destiné à réaliser, partiellement ou totalement, un produit ou un service.

3.1. Généralités sur la maintenance

La maintenance a pour mission de veiller sur les systèmes techniques que sont les systèmes de production pour :

- préserver leur bon état de fonctionnement en évitant l'apparition de défaillances (maintenance préventive) ;
- rétablir leur bon état de fonctionnement quand il est dégradé par l'apparition de défaillances (maintenance corrective) ;
- optimiser leurs conditions d'exploitation (maintenance a méliorative).

Dans tous les cas, il est indispensable de bien connaître l'équipement pour savoir sur quoi, où, quand et comment intervenir, afin de remédier aux défaillances, de les prévenir et surtout d'éviter d'engendrer la moindre gêne à la production.

3.2. Définition de la maintenance

Ce n'est pas seulement réparer ou dépanner au moindre coût ou remettre en état dans les plus brefs délais. Ce n'est pas non plus maintenir les installations en marche à tout prix ou assurer une sécurité de fonctionnement élevée, coûte que coûte, pour atteindre une disponibilité maximale mais non rentable. La maintenance commence dès la conception du matériel : il faut qu'il soit apte à être entretenu (notion de maintenabilité), ensuite à produire; son utilisation doit être aisée et sa sécurité maximale. Pendant toute sa vie de production la maintenance surveille le matériel, suit ses dégradations et le remet à niveau avec un contrôle des performances, une surveillance des coûts et disponibilités en recherchant les solutions les plus simples. En fin de vie, la maintenance propose d'abord une diminution des performances compatible avec les possibilités du matériel et enfin son renouvellement.

Il est possible aussi de condenser tout ceci dans la définition de l'AFNOR (Association Française de Normalisation) : «La maintenance est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé», en lui ajoutant «au coût optimal» [20].

3.3. Objectifs de la maintenance des installations industrielles

Les objectifs de la gestion de maintenance seront atteints si le gestionnaire maîtrise parfaitement les paramètres et les conditions de fonctionnement de l'entreprise.

Le rôle de la maintenance est donc de traiter des défaillances afin de réduire et si possible d'éviter les arrêts de production.

La maintenance est indissociable de la poursuite des objectifs conduisant à la maîtrise de la qualité. Les cinq zéros symbolisant les objectifs concernent en effet la maintenance. C'est un fonctionnement avec:

- Zéro panne : c'est l'objectif matériel de la maintenance.
- Zéro défaut : une production sans défaut nécessite un outil de production en parfait état et une organisation adéquate, tout produit présentant un défaut est assimilable à un arrêt de production et se traduit par une prolongation des délais et des coûts inacceptables.
- Zéro stock et zéro délai : une fabrication sans stock n'est pas compatible avec une livraison sans délai que si l'outil de production est parfaitement fiable.
- Zéro papier : il faut assurer zéro papier inutile, en particulier les papiers engendrés pour les erreurs, les défauts, les défaillances, le retard, etc.

A. Fiabilité

Un système est fiable lorsque la probabilité de remplir sa mission sur une durée donnée correspond à celle spécifiée dans le cahier des charges

B. Fiabilité et qualité

L'Union technique de l'électricité (UTE), sur recommandation de la Commission électrotechnique internationale, a proposé la définition suivante : la fiabilité est l'aptitude d'un

dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données pour une période de temps donnée.

La fiabilité est la probabilité de n'avoir aucune défaillance à l'instant t . Comprise entre 0 et 1 (ou 0 et 100 %) elle est notée, $R(t)$ pour **Reliability** (= *fiabilité en anglais*). Si le dispositif ne peut être réparé, la fiabilité est alors la probabilité de n'avoir connu aucune défaillance jusqu'à l'instant t .

Il ne faut pas confondre la fiabilité (fonction du temps) et le contrôle de qualité (fonction statique). Par exemple, on teste des circuits intégrés au sortir de la chaîne de production, et on constate que 3 % d'entre eux ne fonctionnent pas, ou incorrectement : on peut dire que la « qualité » de cette chaîne (son rendement de production) est 97 % (3 % de défauts).

Une fois ces circuits insérés dans un système, on constate que leur temps moyen de fonctionnement correct avant panne (MTTF, pour *Mean-time To Failure*) est de 100 000 heures. Leur taux de défaillance (nombre de pannes par unité de temps) sera donc: $\frac{1}{\text{MTTF}}$ Celui-ci se note λ et est exprimé en h^{-1} .

Si on constate de plus que ces pannes ne sont pas prévisibles et surviennent de façon totalement aléatoire, alors la fiabilité de ces circuits en fonction du temps sera donnée par la fonction :

$R(t) = e^{-t/\text{MTTF}} = e^{-\lambda t}$ (Expression valable uniquement dans le cas où le taux de défaillance est constant).

On constate que, quel que soit MTTF :

- pour $t=0$, la fiabilité vaut toujours 1
- pour t tendant vers l'infini, la fiabilité tend vers 0.

3.4. Les politiques de maintenance

Les politiques d'entretien ou de maintenance vont de l'absence totale à des définitions très élaborées. Souvent le responsable est abandonné à sa seule initiative, la consigne étant que les machines tournent au moindre frais. La prévision est inconnue : on voit des révisions générales stoppées parce qu'on remplace la machine, et des machines laissées à l'abandon alors qu'elles vont être très sollicitées. Dans d'autres cas la direction fixe à la maintenance et en accord avec elle des objectifs précis ainsi que les moyens nécessaires, ceci pour un temps déterminé. A échéance on fait

le point et on révisé les objectifs. Le responsable d'entretien connaît donc la ligne à suivre et conserve le maximum de liberté dans les décisions d'action prises à son niveau. Une véritable politique ou stratégie de maintenance doit combiner des moyens d'intervention, techniques, économiques, financiers et humains. Elle est fondée sur la rentabilité. Elle tient compte des moments. Tantôt on recherchera le coût minimum en période d'austérité, tantôt le maximum de disponibilité en période de croissance. Des études de fiabilité permettent de définir les probabilités de panne donc les moyens nécessaires. Un contrôle de gestion permet de vérifier que la maintenance se trouve au voisinage de l'optimum, et que les choix sont effectués en fonction des gains escomptés : une dépense importante peut être plus rentable qu'une dépense moindre s'il y a gain de délai, ou de durée de vie, ou de disponibilité ou de qualité sur le produit.

La maintenance sera donc amenée à considérer alors:

-Les prévisions à long terme liées à la politique de l'entreprise permettant l'ordonnement des charges, des stocks, des investissements en matériel.

-Les prévisions à moyen terme la volonté de maintenir le potentiel d'activité de l'entreprise conduit à veiller à l'immobilisation des matériels à des moments qui perturbent le moins possible le programme de fabrication. Dès lors il faut fournir nécessairement et suffisamment tôt le calendrier des interventions de maintenance. Celle-ci ayant une influence sur l'ordonnement des fabrications.

-Les prévisions à court terme dans ce cas le service de maintenance s'efforcera à réduire les durées d'immobilisation du matériel et les coûts de ses interventions. Sachant que les réductions des coûts et d'immobilisation ne sont possibles que si le matériel et les interventions ont fait l'objet d'une étude préalable, il est donc nécessaire de préparer le travail et d'étudier les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'exécution des interventions. Le service technique lié à cette fonction doit fournir toutes les informations qualitatives et quantitatives susceptibles d'influencer les politiques particulières de l'entreprise [21].

3.5. Les différentes méthodes de la maintenance

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de maintenance et doit s'opérer en accord avec la direction de l'entreprise.

Pour choisir, il faut être informé des objectifs de la direction, des décisions politiques de maintenance, mais il faut aussi connaître le fonctionnement et les caractéristiques des matériels ; le comportement du matériel en exploitation ; les conditions d'application de chaque méthode ; les coûts de maintenance et les coûts de perte de production.

3.5.1. Maintenance corrective

Définition : Maintenance effectuée après défaillance.

Défaillance : Altération ou cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

On distingue deux formes de défaillance : la défaillance partielle et la défaillance complète.

Défaillance partielle : Altération de l'aptitude d'un bien à accomplir les fonctions requises.

Défaillance complète : Cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir la fonction requise.

La maintenance corrective a pour objet de redonner au matériel des qualités perdues, nécessaires à son utilisation.

Les défauts, pannes ou avaries diverses exigeant une maintenance corrective entraînent une indisponibilité immédiate ou à très brève échéance des matériels affectés ou / et une dépréciation en quantité ou / et en qualité des services rendus.

3.5.2. Maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Elle doit permettre d'éviter des défaillances des matériels en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter.

Le but de la maintenance préventive :

- Augmenter la durée de vie des matériels
- Diminuer la probabilité des défaillances en service
- Diminuer le temps d'arrêt en cas de révision ou de panne
- Prévenir et aussi prévoir les interventions de la maintenance corrective coûteuse
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc.
- Diminuer le budget de la maintenance
- Supprimer les causes d'accidents graves [22].

3.5.3. Maintenance préventive systématique

La maintenance préventive effectuée selon un échancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision partielle ou complète.

Conditions d'application:

Cette méthode nécessite de connaître : le comportement du matériel ; les usures ; les modes de dégradations ; le temps moyen de bon fonctionnement entre deux avaries (MTBF).

Cas d'application:

La maintenance systématique peut être appliquée dans les cas suivants :

- Equipements soumis à la législation en vigueur (sécurité réglementée). Par exemple ; appareil de levage, extincteur (incendie), réservoir sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc.
- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves. Par exemple ; tous les matériels assurant le transport en commun des personnes, avion, trains, etc.
- Equipements ayant un coût de défaillance élevé. Par exemple ; éléments d'une chaîne automatisée, systèmes fonctionnant en continu.
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service. Par exemples ; consommation excessive d'énergie, allumage et carburation déréglés pour les véhicules à moteurs thermiques.

3.5.4. Maintenance préventive conditionnelle

La maintenance préventive est subordonnée à un type d'événement prédéterminé, (autodiagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.), révélateur de l'état de dégradation du bien

La maintenance conditionnelle est donc une maintenance dépendant de l'expérience et faisant intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle parfois maintenance prédictive.

Conditions d'application:

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant les cas il est souhaitable de les mettre sous surveillance et à partir de là, on peut décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint, mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs.

Cas d'application:

Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Paramètres mesurés:

Ils peuvent porter par exemple sur :

- Le niveau et la qualité d'une huile
- Les températures et les pressions
- La tension et l'intensité du matériel électrique
- Les vibrations et les jeux mécaniques

De tous les paramètres énumérés, l'analyse vibratoire est de loin la plus riche quant aux informations recueillies. Sa compréhension autorise la prise, en pleine connaissance de cause des

décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle. La surveillance peut être soit périodique, soit continue.

Avantages:

La connaissance du comportement est en temps réel, à condition de savoir interpréter les résultats. A ce niveau l'information a un rôle fort intéressant à jouer.

Par exemple, une société a introduit un système de gestion par microprocesseur pour améliorer ou installer un programme de maintenance conditionnelle. Ce système de gestion comporte une centrale de mesure électronique portable, une imprimante et un analyseur de données. Les mesures s'effectuent avec un simple capteur. Les données recueillies sont soit transmises à une imprimante, soit déchargées dans un analyseur de données pour emmagasinage sur une bande magnétique ou sur une disquette qui peut fournir les rapports de maintenance automatiquement.

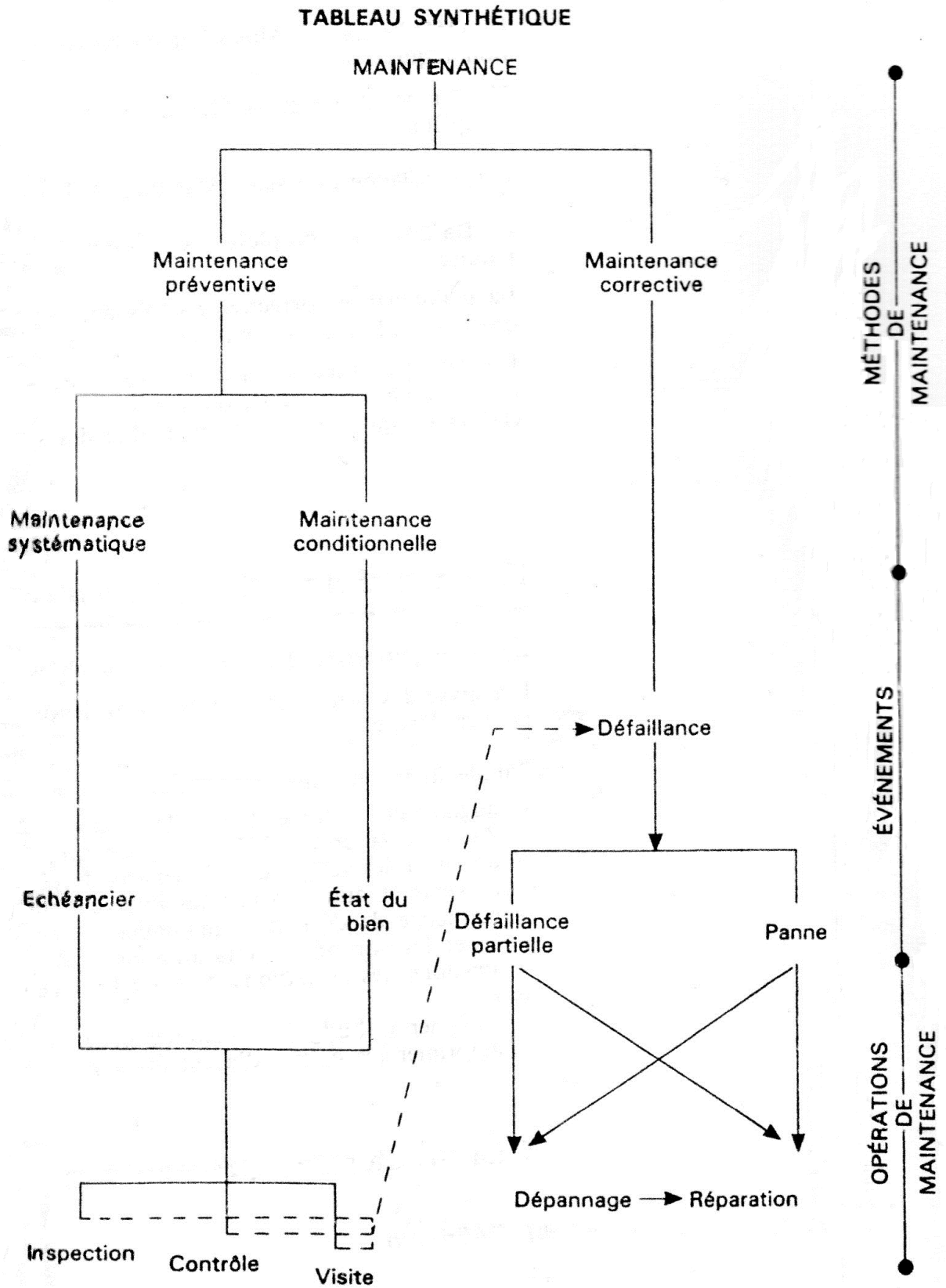


Figure 23: Les différentes méthodes de maintenance [23].

3.6. Opérations de maintenance

3.6.1. Opérations de maintenance corrective

Ces opérations peuvent être classées en trois groupes d'actions.

-Le premier groupe concerne la localisation de la défaillance ; il comprend les opérations suivantes : le test, la détection, le dépistage et le diagnostic.

-Le deuxième groupe concerne les opérations de la remise en état ; il comprend les opérations suivantes : le dépannage, la réparation et la modification soit et du matériel ou du logiciel.

-Le troisième groupe concerne la durabilité ; il comprend les opérations suivantes : la rénovation, la reconstitution et la modernisation.

3.6.2. Localisation de défaillance

C'est l'action qui conduit à rechercher précisément le (les) élément(s) par le(s) quel(s) la défaillance se manifeste.

Le test : c'est une opération qui permet de comparer les réponses d'un système à une sollicitation appropriée et définie, avec celles d'un système de référence, ou avec un phénomène physique significatif d'une marche correcte.

La détection : c'est l'action de déceler au moyen d'une surveillance accrue, continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant.

Le dépistage : c'est une action qui vise à découvrir les défaillances dès leur début par un examen systématique sur des équipements apparemment en état de fonctionnement.

Le diagnostic : c'est l'identification de la cause probable de la (ou les) défaillance(s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test. Le diagnostic permet de confirmer, de compléter ou de modifier les hypothèses faites sur l'origine et la cause des défaillances et de préciser les opérations de maintenance corrective nécessaires.

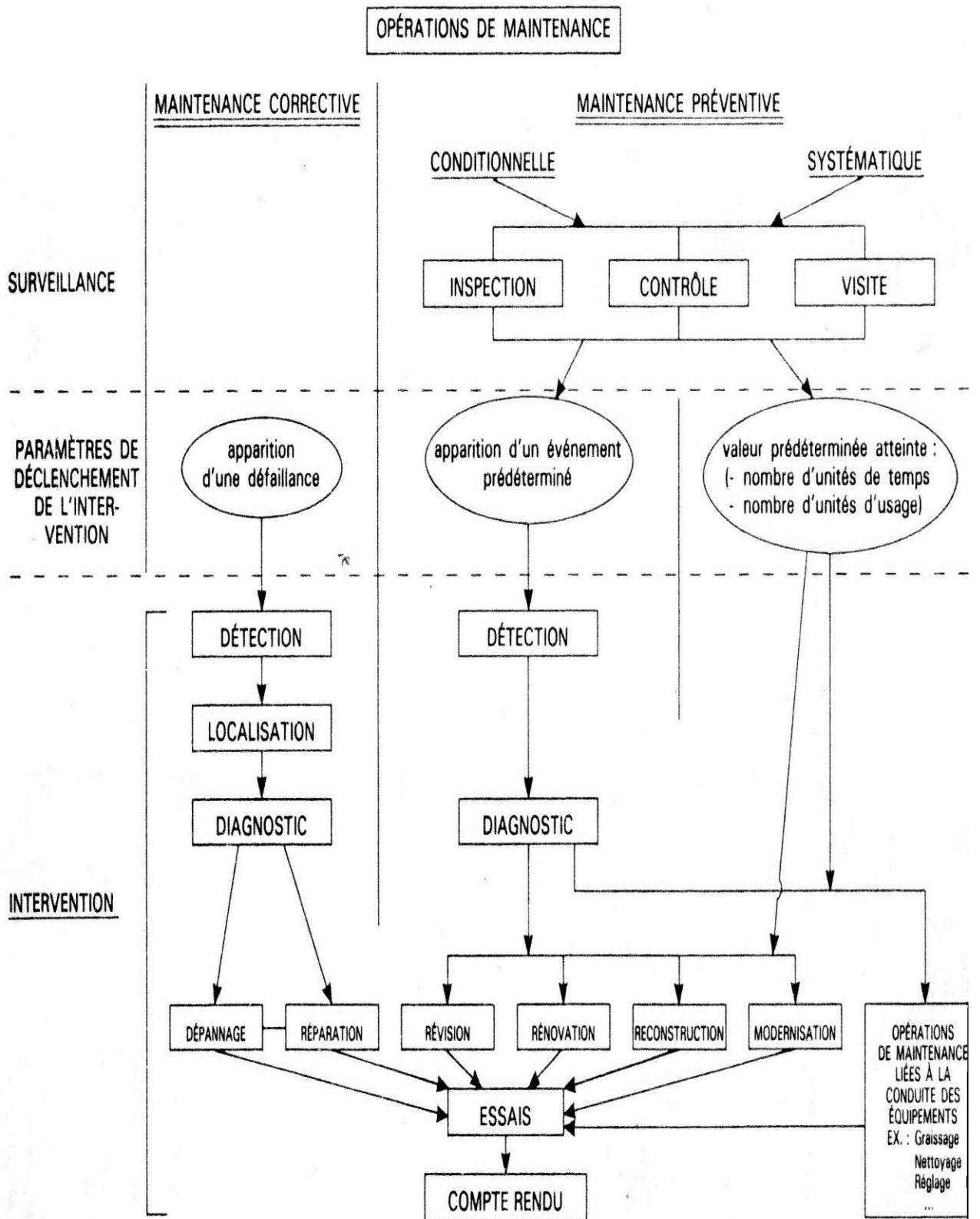


Figure 24: Les opérations de maintenance [23].

3.6.3. La remise en état

La remise en état de fonctionnement peut consister à réaliser l'une des opérations suivantes.

A. Le dépannage:

C'est une action sur un bien en panne, en vue de le remettre en état de fonctionnement ; compte tenu de l'objectif, une action de dépannage peut s'accommoder de résultats provisoires et de conditions de réalisation hors règles de procédures, de coûts et de qualité, et dans ce cas sera suivie de la réparation.

Le dépannage, opération de maintenance corrective, n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation n'est pas indispensable même si cette connaissance permet souvent de gagner du temps.

Souvent les interventions de dépannage sont de courte durée mais peuvent être nombreuses. De ce fait les services de maintenance, soucieux d'abaisser leurs dépenses, tentent d'organiser les actions de dépannage. D'ailleurs certains indicateurs de maintenance, pour mesurer son efficacité, prennent en compte le problème du dépannage.

Ainsi le dépannage peut être appliqué, par exemple, sur des équipements fonctionnant en continu dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt.

B. La réparation:

C'est une intervention définitive et limitée de maintenance corrective après défaillance.

L'application de la réparation, opération de maintenance corrective, peut être décidée, soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique.

Cas d'application : Tous les équipements sont concernés.

C. La modification:

C'est une opération à caractère définitif effectuée sur un bien en vue d'en améliorer le fonctionnement ou d'en changer les caractéristiques d'emploi.

D. La durabilité:

La durabilité est la durée de vie ou durée de fonctionnement potentielle d'un bien pour la fonction qui lui a été assignée dans des conditions d'utilisation et de maintenance données.

Les opérations de maintenance qui concernent la durabilité d'un bien sont les suivantes.

La rénovation : inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles défaillants, conservation des pièces bonnes.

La rénovation apparaît donc comme l'une des suites possibles d'une révision générale au sens strict de sa définition.

La reconstitution : remise en l'état défini par le cahier des charges initial, qui impose le remplacement de pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes. La reconstruction peut être assortie d'une modernisation ou de modifications.

Les modifications apportées peuvent concerner, en plus de la maintenance et de la durabilité, la capacité de production, l'efficacité, la sécurité, etc.

La modernisation : remplacement d'équipements, accessoires et appareils ou éventuellement de logiciel apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur le bien d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

Cette opération peut aussi bien être exécutée dans le cas d'une rénovation, que celui d'une reconstruction.

La rénovation ou la reconstruction d'un bien durable peut donner lieu, pour certains de ses sous-ensembles, à la pratique d'un échange standard.

L'échange standard : c'est la reprise d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé, et vente au même client d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble, neuf ou remis en état conformément aux spécifications du constructeur, moyennant le paiement d'une soulte dont le montant est déterminé d'après le coût de remise en état.

Soulte : somme d'argent qui, dans un échange ou dans un partage compense l'inégalité de valeur des lots ou des biens échangés. Afin d'accélérer les procédures et de diminuer les coûts, le recouvrement peut être forfaitaire [24].

3.6.4. Opérations de maintenance préventive

Ces opérations peuvent être classées en quatre groupes d'actions.

-Le premier groupe concerne l'entretien ; il comprend les opérations suivantes : le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface.

-Le deuxième groupe concerne la surveillance ; il comprend les opérations suivantes : l'inspection le contrôle et la visite.

-Le troisième groupe concerne la révision ; il comprend les opérations suivantes : la révision partielle et la révision générale.

-Le quatrième groupe concerne la préservation ; il comprend les opérations suivantes : la mise en conservation, la mise en survie et la mise en service.

A. L'entretien:

L'entretien comprend les opérations courantes et régulières de la maintenance préventive tels que le nettoyage, la dépollution et le retraitement de surface qu'ils soient externes ou internes. Par exemple, on peut signaler pour le nettoyage extérieur l'existence de divers types de nettoyage en fonction de la structure et de l'état d'un bien, des produits utilisés et de la méthode employée (les solutions alcalines aqueuses, les solvants organiques, le soufflage aux abrasifs, etc.). Il faut aussi préciser que le retraitement de surface inclut les opérations de lubrification et de graissage.

B. La surveillance:

Les termes définis ci-après sont représentatifs des opérations nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du bien, effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

L'inspection : c'est une activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies. Cette activité peut s'exercer notamment au moyen de rondes.

Le contrôle : c'est une vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Le contrôle peut :

- comporter une activité d'information
- inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement
- déboucher sur des actions correctives

La visite : c'est une opération consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du 1er niveau.

C. La révision:

C'est l'ensemble des actions d'examen, de contrôle et des interventions effectuées en vue d'assurer le bien contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il est d'usage de distinguer suivant l'étendue de cette opération les révisions partielles des révisions générales. Dans les deux cas, cette opération implique la dépose de différents sous-ensembles. Ainsi le terme de révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections, etc. Les deux types d'opération définis (révision partielle ou générale) relèvent du 4ème niveau de la maintenance

D. La préservation

Elle comprend les opérations suivantes.

La mise en conservation : c'est l'ensemble des opérations devant être effectuées pour assurer l'intégrité du bien durant les périodes de non-utilisation.

La mise en survie : c'est l'ensemble des opérations devant être effectuées pour assurer l'intégrité du bien durant les périodes de manifestation de phénomènes d'agressivité de l'environnement à un niveau supérieur à celui défini par l'usage de référence.

La mise en service : c'est l'ensemble des opérations nécessaires, après l'installation du bien, à sa réception, dont la vérification de la conformité aux performances contractuelles.

3.7. Autres formes et méthodes de maintenance

L'amélioration des biens d'équipement qui consiste à procéder à des modifications, des changements, des transformations sur un matériel correspond à la maintenance d'amélioration.

Dans ce domaine beaucoup de choses restent à faire. C'est un état d'esprit qui nécessite une attitude créative. Cette créativité impose la critique. Cependant, pour toute maintenance d'amélioration une étude économique sérieuse s'impose pour s'assurer de la rentabilité du projet. Les améliorations à apporter peuvent avoir comme objectif l'augmentation des performances de production du matériel ; l'augmentation de la fiabilité, c'est-à-dire diminuer les fréquences d'intervention ; l'amélioration de la maintenabilité (amélioration de l'accessibilité des sous-systèmes et des éléments à haut risque de défaillance) ; la standardisation de certains éléments pour avoir une politique plus cohérente et améliorer les actions de maintenance; l'augmentation de la sécurité du personnel.

Tous les matériels sont concernés à condition que la rentabilité soit vérifiée. Cependant une petite restriction pour les matériels à renouveler dont l'état est proche de la réforme, pour usure généralisée ou par obsolescence technique [25].

Conclusion

La maintenance s'exerce sur des équipements industriels de production placés dans un contexte économique. Chaque équipement plus ou moins complexe, constitue un système technique, conçu pour mettre en œuvre un procédé et destiné à réaliser, partiellement ou totalement, un produit ou un service. La maintenance a pour mission de veiller sur les systèmes techniques que sont les systèmes de production.

Chapitre 4:

Conception d'un plan de maintenance pour un système photovoltaïque

Chapitre 4

Conception d'un plan de maintenance pour un système photovoltaïque

Introduction

Concevoir un plan de maintenance pour une centrale solaire photovoltaïque qui est une installation industrielle autonome. Cette installation produira de l'énergie électrique de manière continue. L'application d'un plan de maintenance selon les normes permettra la continuité du fonctionnement ainsi qu'une bonne efficacité tout en diminuant les pertes dues au mauvais entretien.

4.1. Maintenance de l'installation PV

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les principes généraux de la maintenance pour un système photovoltaïque isolé ou connecté au réseau.

En théorie, un système photovoltaïque domestique ne nécessite pas d'entretien. Ayant une durée de vie minimum de 20 à 25 ans, il ne présente en effet aucune pièce mobile et, l'inclinaison des modules de la plupart des installations couplée à un verre extra-lisse, assure le nettoyage de leur surface.

4.2. Les principaux problèmes et leurs solutions

La capacité des modules à fournir de la puissance diminue au fil du temps. Les producteurs de panneaux photovoltaïques garantissent aujourd'hui une baisse maximale de la puissance d'origine de 20 % sur 20 à 25 ans.

L'onduleur, quant à lui a une durée de vie de 10 ans. Il faut alors prévoir de le changer au moins une fois sur les 20 à 25 ans de production. S'agissant d'électronique sensible aux fortes chaleurs, il convient de placer l'onduleur (les onduleurs) dans un endroit ventilé, pour éviter une détérioration prématurée du matériel.

Dans le cas d'une variation importante de la production par rapport à l'estimatif ou aux résultats des années précédentes, plusieurs facteurs peuvent entrer en jeu :

- la présence de masques : l'étude de potentiel doit intégrer les éléments susceptibles de générer des ombres portées sur les modules, les privant ainsi de production. Par ailleurs, la croissance d'un arbre ou la construction d'un bâtiment entre le soleil et les modules entraîneront également une baisse de la production.

-un dépôt de poussière : si les précipitations locales ne suffisent pas à les nettoyer, les modules peuvent recevoir moins d'énergie solaire que prévue. La production d'électricité photovoltaïque en est donc aussi dégradée. Un simple nettoyage à l'eau, annuel ou biennuel est alors recommandé.

4.3. Entretien et maintenance : une garantie de performance

Comme tout système en extérieur, les modules photovoltaïques sont exposés aux aléas climatiques (canicules, orages, grêle, etc.), aux activités alentours et à la vie de la faune locale. Le suivi d'une installation est donc un élément clé de son bon fonctionnement et permet d'éviter bien des surprises. La plupart des installateurs proposent un service de maintenance préventive souvent à plusieurs niveaux (contrôle de l'installation électrique, contrôle des modules, nettoyage etc.) pour un budget d'environ 1 % du montant de l'investissement global par an.

4.3.1. Nettoyage des modules solaires

La poussière accumulée sur le panneau diminue considérablement sa production d'électricité nettoyée le panneau solaire une fois par semaine.

Faire le nettoyage le soir, ou tôt le matin, quand les panneaux ne sont pas exposés au fort rayonnement solaire.

Procédure:

1. Accéder au panneau à l'aide d'une échelle.
2. Utiliser un chiffon propre et seulement de l'eau. Ne jamais utiliser d'autres produits. Ne jamais utiliser de matériaux abrasifs qui pourraient rayer le verre.
3. Essuyer doucement la surface du panneau, en partant du haut, et s'assurer qu'il n'y a plus de traces de poussière.
4. Ne pas s'appuyer ou se tenir au panneau pour garder l'équilibre.
5. Vérifier à chaque nettoyage que les fixations du panneau sont bien serrées.
6. Veiller à ne rien laisser sur le panneau.

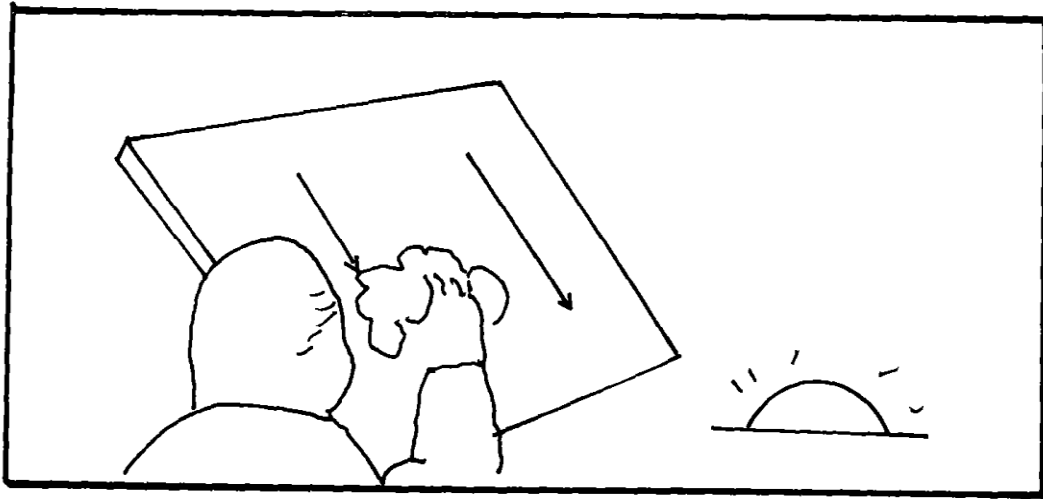


Figure 25 : Procédure du nettoyage d'un module photovoltaïque

4.3.2. Prévention de l'ombre sur le module solaire

Le module solaire ne fournira pas l'énergie maximale s'il est dans l'ombre pendant la journée: vérifier une fois par mois que le module solaire n'est pas à l'ombre même partiellement.

Contrôler la portée de l'ombre sur le module vers 8 heures du matin, midi et 4 heures de l'après-midi [26].

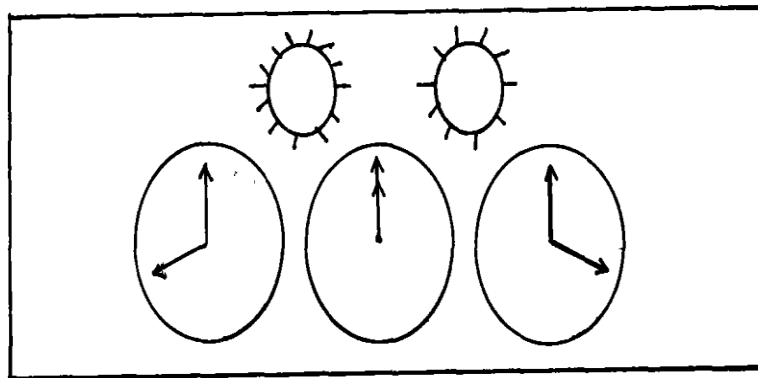


Figure 26 : Moments préconisés pour contrôler l'ombre sur le module pv

Procédure:

1. Couper les branches et buissons qui font de l'ombre sur le module solaire.
2. S'assurer que rien n'a été entreposé sur le module solaire.
3. Vérifier les nouvelles constructions : si elles font de l'ombre, il faut veiller au déplacement du module solaire.

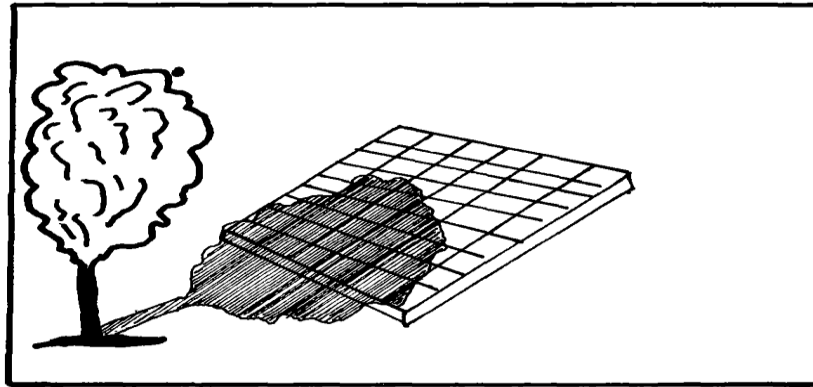


Figure 27 : Exemple d'obstacle donnant de l'ombre sur le module pv

4.4. Entretien des batteries

Les batteries risqueront de se détériorer si le niveau d'électrolyte est en dessous de la normale. Tous les six mois, vérifier le niveau d'électrolyte dans la batterie.

Rajouter de l'eau distillée dans chaque élément de batterie en s'arrêtant au trait qu'indique le niveau minimum.

ATTENTION : Ne jamais rajouter de l'acide dans une batterie déjà mise en fonctionnement

Ne jamais approcher de flammes ni de cigarettes pendant cette opération

Procédure:

1. Mettre les disjoncteurs en position "ARRET".
2. Ouvrir la boîte à batteries.
3. Essuyer avec un chiffon le dessus de la batterie.
4. Dévisser les bouchons de remplissage.
5. Vérifier les plaques dans chaque élément de batterie [26].

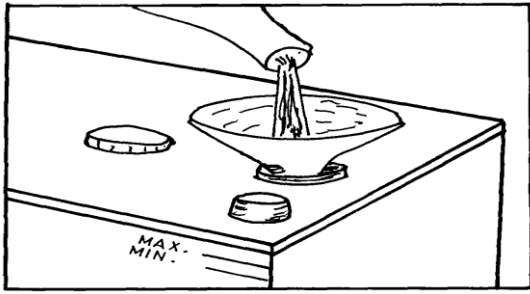


Figure 28 : procédé d'entretien d'une batterie

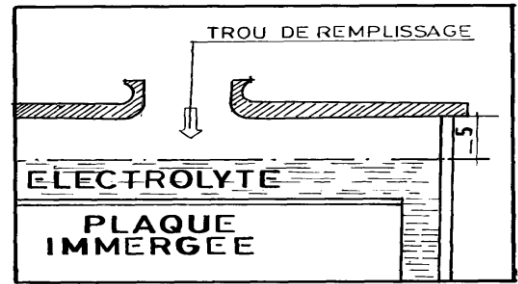


Figure 29 : Plaques immergées par l'électrolyte

6. Remettre les bouchons en place après avoir contrôlé tous les éléments.
7. Vérifier que les cosses de la batterie sont serrées et propres les nettoyer avec de l'eau propre.
8. Essuyer soigneusement le dessus de la batterie : il faut qu'il soit sec.
9. Appliquer de la graisse silicone ou de la Vaseline sur les bornes de connexion.
10. Remettre le disjoncteur en position "MARCHE".

4.5. Le convertisseur

Contrôle visuel, à faire de tous les 6 mois à 1an. S'il est à l'extérieur, tous les 6 mois. Le convertisseur devrait être installé dans un secteur propre, sec, aéré, il doit être séparé, et pas directement au dessus, de la banque de batteries. Tandis que le système fonctionne, les contrôles opérationnels suivants peuvent être faits :

- Vérifier que le convertisseur fonctionne correctement par l'observation des LED
- Vérifier que si le convertisseur en mode réserve (si présent) fonctionne correctement. Ceci peut être fait par l'interruption de toutes les charges et les appareils fonctionnant dans le système. Une fois dans le mode réserve, brancher un appareil et le convertisseur démarre immédiatement.
- Vérifier que toutes les opérations de déclenchement à distance du générateur de secours (si présent) fonctionnent.
- S'assurer que le générateur de secours démarre et s'arrête aux niveaux de tension corrects de la batterie [26].

4.6. Entretien du régulateur

Tous les trois mois, nettoyer et vérifier le boîtier régulateur.

Procédure :

1. Nettoyer avec un chiffon sec l'extérieur du régulateur afin de le maintenir propre.
2. Vérifier si le régulateur n'a pas reçu des infiltrations d'eau, notamment par les câbles en provenance du toit (module solaire).
3. Vérifier que le montage du régulateur au mur est bien solide.

4.7. Entretien des câbles

Tous les trois mois, une inspection régulière est nécessaire pour s'assurer que les câbles sont en bon état.

Procédure :

1. Vérifier les câbles électriques qui relient le régulateur de charge, le module solaire, la batterie et les utilisations (réglettes, prises de courant).
2. Si l'un de ces câbles est endommagé, il peut être la cause d'un court-circuit. Il faut tout de suite le réparer.

Tableau 3 : Fiche de maintenance, visite et contrôle [27].

TACHE	DESCRIPTION	EFFECTUEES			
		OUI		NON	
TACHE 1C	Contrôler que toutes les charges de courants au fonctionnement	OUI		NON	
TACHE 2C	Vérifier le niveau de l'électrolyte dans la batterie	OUI		NON	
TACHE 3C	Vérifier que l'usager effectue correctement les tâches quotidiennes. Formation supplémentaire donnée.	OUI		NON	
TACHE 4C	Contrôler la tension de la batterie, la densité et la qualité de l'électrolyte	OUI		NON	
TACHE 5C	Mesurer la tension (circuit ouvert)= V_{CO} et intensité (court circuit)= I_{CC} à la sortie du module solaire	OUI		NON	
TACHE 6C	Vérifier les voyants du régulateur de charge	OUI		NON	
TACHE 7C	Contrôler la solidité des connexions du module solaire, des charges de courant, des interrupteurs, du régulateur, et de la batterie	OUI		NON	
TACHE 8C	Remplir cette fiche de maintenance en 2 exemplaires: un pour votre service et l'autre que vous laisserez à coté du système	OUI		NON	

PIECES CHANGEES OU REPARÉES	DESCRIPTION DES TRAVAUX
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

-NOM ET SIGNATURE DU L'USAGER:

-DATE:

-NOM ET SIGNATURE DU TECHNICIEN:

-DATE:

NUMERO DE FICHE:.....

Tableau 4: Fiche de maintenance, visite de dépannage. [27]PANNE TOTALE

TACHES	DESCRIPTION	EFFECTUEES			
		OUI		NON	
TACHE 1T	Vérifier que les disjoncteurs "REGLETTES" et "PRISES" sont sur la position "MARCHE"	OUI		NON	
TACHE 2T	Enlever et contrôler les fusibles, remettre ou les remplacer	OUI		NON	
TACHE 3T	Vérifier le niveau de l'électrolyte dans la batterie	OUI		NON	
TACHE 4T	Vérifier que toutes les connexions du câble à la batterie et au régulateur de charge sont branchées et bien serrées	OUI		NON	
TACHE 5T	Contrôler la tension de la batterie, la densité et la qualité de l'électrolyte	OUI		NON	
TACHE 6T	Contrôle visuel du module	OUI		NON	
TACHE 7T	Contrôle visuel des câbles	OUI		NON	
TACHE 8T	Mesurer l'intensité (court circuit) V_{co} et l'intensité (cort circuit) I_{cc} à la sortie du module solaire	OUI		NON	
TACHE 9T	Mesurer l'intensité (court circuit) I_{cc} à la sortie du module solaire	OUI		NON	
TACHE 10T	Contrôle visuel des voyants	OUI		NON	
TACHE 11T	Mesurer la tension/ intensité dans le câble venant du module solaire à l'entrée du régulateur (V_{co}/I_{cc}) (le régulateur branché)	OUI		NON	
TACHE 12T	Mesurer la tension et l'intensité de charge du module solaire (fonctionnement normal) à l'entrée du régulateur (V_{fn}/I_{fn}) (le régulateur branché)	OUI		NON	
TACHE 13T	Mesurer la tension/ intensité à la sortie du régulateur (V_{fn}/I_{fn}) (Réglettes + Appareils audiovisuels allumés)	OUI		NON	
TACHE 14T	Mesurer la tension de la batterie (V_{charge}) *Disjoncteurs "la charge " *Voyant indiquant que la batterie est en cours de charge.	OUI		NON	
TACHE 15T	Mesurer la tension de la batterie (V_{co}) *Disjoncteurs "la charge " et prises sur la position d'arrêt *A faire tout de suite après la tache 14T	OUI		NON	
TACHE 16T	Mesurer la tension de la batterie ($V_{déb-décharge}$) *Disjoncteurs "la charge " et prises en position marche *Module solaire recouvert d'un tissu	OUI		NON	

Conclusion générale

Depuis ces dernières années et étant donné l'accroissement du coût des combustibles fossiles et des problèmes environnementaux dérivés de leur exploitation, nous assistons à un renouveau réel des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisés de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisées dans le même lieu où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec peu de vent), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, ce sont les aérogénérateurs qui prendront le relais et produiront la majorité de l'énergie électrique.

En théorie, un système photovoltaïque domestique ne nécessite pas d'entretien. Ayant une durée de vie minimum de 20 à 25 ans, il ne présente en effet aucune pièce mobile et, l'inclinaison des modules de la plupart des installations couplée à un verre extra-lisse, assurant le nettoyage de leur surface. Nous avons appliqué les règles de la maintenance industrielle pour la conception d'un plan d'entretien et de maintenance des centrales solaires photovoltaïques.

L'application d'un plan de maintenance selon les normes permettra la continuité du fonctionnement ainsi qu'une bonne efficacité tous en diminuant les pertes du au mauvais entretien.

Bibliographie

- [1] <http://www.connaissance des energies.org/les-énergies-nouvelles-sont-nouvelles>
- [2] - MOUZAOUI Ch et OUAR Na - Dimensionnement d'une installation solaire domestique à courant alternatif - Mémoire de fin d'études Université de Bejaia - 2006.
- [3] <http://www.infe.fr/dee2003/efetserre0.htm>
- [4] - SACADURA Jean-François - Initiation aux transferts thermiques – Lavoisier – Paris – 1993 - (ISBN 2-85206-618-1)-(p.88).
- [5] <http://allwewish.org/je-voeu-les-alternatives-au-nucleaire/?lang=fr>
- [6] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Pelamis-\(électricité\)pelamis-energie-vague\[archive\]](http://fr.wikipedia.org/wiki/Pelamis-(électricité)pelamis-energie-vague[archive]) ecosources.info, décembre 2008
- [7] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Searev>
- [8] <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/32014.htm>
- [9] http://www.huffingtonpost.com/2011/02/28/joule-unlimited-diesel-fuel_n_829057.html
- [10] http://www.lemonde.fr/planete/article/2009/10/24/1-indonesie-mise-sur-l-electricite-geothermique_1258317_3244.html
- [11] <http://www.science-et-vie.com/Sommaire.aspType=SV> Recherchez dans 25 ans d'archives de Science & Vie
- [12] http://www.meteo.fr/metronet/decouvr/a-z/html/141_curieux.htm
- [13]-AA.SFEIRE et G.GUARRACION-Ingénierie des systèmes solaire-Technique et Documentation la voisire - paris-1981.
- [14] http://www.imcce.fr/vt2004/fr/fiches/fiche_n18a_C2.pdf
- [15] http://www.meteo.fr/metronet/decouvr/a-z/html/44_curieux.htm
- [16]Ch.PERRIN de BRICHAMBAUT,Ch.VAUGE; «Le gisement solaire» ;Technique et Documentation LAVOISIRE; paris;1982.
- [17] Energie solaire photovoltaïque le module de professionnelle-MICHEL VILLOZ-Paris, 2003.
- [18] Systèmes photovoltaïques-Dr. Ali Malek-univ de Batna -Session 2002.
- [19] -M. Hamdaoui et K. Kassmi-Mémoire de fin d'études -Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique-Université Mohamed Premier Oujda, Maroc- Promotion: 2007.
- [20] - AFNOR - La maintenance industrielle - Edition AFNOR Paris - 1988.

- [21] - Arquès P - Diagnostic prédictif de l'état des machines - Edition Masson Paris - 1996.
- [22] - Bigret R, Féron J - Diagnostic Maintenance Disponibilité des machines tournantes,
- [23] - Monsieur Robert Pajot - Guide de la maintenance - Edition Nathan - 1987.
- [24] - Boitele D - Guide de la maintenance - Edition Elisabeth Pinard - 1990.
- [25] - Priel V - La maintenance, Techniques modernes de gestion - Edition Entreprise moderne d'édition, Paris - (1974).
- [26] - Milieu Rural - Guides d'exploitation et de maintenance des Kits solaire PV pour l'éclairage.
- [27] Notion d'installation et de maintenance des Kits solaire PV pour l'éclairage domestique programme PPER-MAROC / TOTAL ENERGIE-1992.