

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

Elaboration d'un plan de maintenance préventive
PMP pour une installation solaire à grande
dimensions

Préparé par :

Bouab Hamza et Garn Messaoud

Soutenu publiquement le : 28 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. Khaldi Sabina	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. Benamar Badr	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. Asri Aicha	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. Djamel Mazari	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 – 2022

Remerciement

Avant de commencer la présentation de ce rapport, nous profitons de l'occasion pour remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Nos remerciements en particulier Mr. DJAMEL MAZARI notre encadreur, qui nous a beaucoup aidé et guidé par ses conseils, durant toute la période de ce projet de fin d'étude. Nous tenons à remercier également les membres de jury, pour leurs rapports pédagogiques qui constituent la base de ce travail.

Dédicace

*Nous dédions ce travail A nos
chers Parents en reconnaissance de
leurs dévouements*

*déployés pour notre bonheur, de leurs Patience et
soutient indéfini.*

*A nos frères et aussi nos amis qui n'ont Jamais cessé de
nous encourager et nous soutenir dans les pires
moments.*

*A ceux qui 'ont cédé leur temps et leurs Connaissances
pour satisfaire nos interrogations.*

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : généralité sur la maintenance	
1. Introduction	3
2. Définition	3
3. Maintenance des équipements industriels	4
4. Description de la maintenance	4
5. Objectifs de la maintenance	4
6. Activités de la maintenance	6
7. Types de maintenance	6
7.1. Maintenance préventive.....	7
7.1.1. Maintenance systématique	7
7.1.2. Maintenance conditionnelle	8
7.1.3. Maintenance prévisionnelle	9
7.2. Maintenance corrective	9
7.2.1. Maintenance palliative	9
7.2.2. Maintenance curative	9
8. Opérations de la maintenance	9
8.1. Opérations de la maintenance corrective	9
8.1.1. Dépannage	9
8.1.2. Réparation	10
8.2. Opérations de la maintenance préventive	10
8.2.1. Inspections :.....	10
8.2.2. Visites	10
8.2.3. Contrôles	10
8.2.4. Opérations de surveillance	10
8.2.5. Révision	11
8.2.6. Echanges standards	11
9. Niveaux de maintenance	11
10. Caractéristique des activités de maintenance	11
11. Temps de maintenance	11
11.1. Classification des temps de la maintenance	11
11.1.1. Temps machines :	13
11.1.2. Temps d'activité	14
12. Nature des durées des interventions de maintenance	14
12.1. Temps de maintenance corrective	14
12.2. Temps de maintenance préventive	14

Sommaire

13. Courbe en baignoire.....	14
13.1. Phase de jeunesse	14
13.2. Phase de maturité	15
13.3. Phase de vieillesse	15
14. La méthodologie AMDEC	15
14.1. Présentation générale	15
14.2. Les Buts de l'AMDEC	16
14.3. Les concepts d'AMDEC	16
14.4. Différents types d'AMDEC.....	17
14.5. La démarche AMDEC.....	18
15. Méthode de Pareto (« ABC » OU « 20/80 »)	18
15.1. Définition	18
15.2. L'objectif de digramme de Pareto	19
Conclusion	20
CHAPITRE I I : Les installations photovoltaïques	
1. Introduction.....	22
2. Historique.....	22
3. Le fonctionnement des panneaux solaires	23
3.1. Le dopage des semi-conducteurs	24
3.2. Dopage N	25
3.3. Dopage P :	26
3.4. La jonction P-N.....	27
4. Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	27
5. La cellule photovoltaïque	28
6. La Technologie Photovoltaïque	29
6.1. Procédé de fabrication des cellules photovoltaïques.....	29
6.2. Différentes technologies de cellules photovoltaïques	29
6.2.1. Technologies de la première génération à base de silicium cristallin	30
6.2.2. Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince	31
6.2.3. Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »	32
7. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	35
7.1. Courant de court-circuit I_{cc}	35
7.2. Tension de circuit ouvert V_{co}	35
7.3. Puissance maximale	35
8. Les différents composants d'un système solaire photovoltaïque	36
9. LES DIFFERENTES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES.....	37
9.1. Les installations sur site isolé	37

Sommaire

9.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public	38
9.2.1 Solution avec injection totale	38
9.2.2. Solution avec injection de surplus	39
10. Les différents types d'implantations des installations solaires	39
10.1. Les toitures inclinées	39
10.2. Les toitures terrasses	40
10.3. Les ombrières de parking	41
10.4. Les centrales au sol	42
10 .5. LES AUTRES TYPES D'INSTALLATION :	42
11. Montage et maintenance d'une installation photovoltaïque	43
11.1. Normes de sécurité	43
11.1 Montage de l'installation	43
12. Maintenance	43
12.1. Préparez et organisez votre travail	43
12.2. Procédure de maintenance du panneau solaire	43
12.3. Mesures et vérification du fonctionnement	44
13. Nettoyage des batteries	44
Conclusion	44
CHAPITRE III : Elaboration d'un plan de maintenance	
1. Étude de cas (une installation solaire "système photovoltaïque")	46
1.1 Présentation et localisation de URAER (CDER) :	46
1.1. Description du système étudié:	47
1.2. Exploitation de l'historique	47
1.2.1. L'historique de panne (système photovoltaïque)	47
1.3. L'historique	48
2. L'application Pratique des méthodes d'analyse	49
2.1. Application de la méthode PARETO sur le système	49
2.1.1. Explication de la courbe	50
2.2 Les défauts et leurs conséquences les plus fréquents rencontrés dans un système ..51	
Photovoltaïque	51
2.2.1. Défauts dans le générateur Photovoltaïque	51
2.2.2. Défauts dans la boîte de jonction	52
2.2.3. Défauts dans le système de câblage	53
2.2.4. Défauts dans l'onduleur	53
2.3. Méthodes d'analyse prévisionnelle AMDEC	54
2.3.1. Décomposition de système	54
2.3.2. Création du tableau AMDEC	55

Sommaire

2.3.3. Tableaux de récapitulatif	59
2.3.4. Plan de maintenance préventive	59
Conclusion	61
Conclusion générale	64

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Objectifs de la maintenance.....	05
Figure I.2 : Activités de la maintenance.....	06
Figure I.3 : Différents types de maintenance	07
Figure I.4 : Cycle de maintenance préventive systématique.....	08
Figure I.5 : Equilibre maintenance curative/préventive.....	13
Figure I.6 : Courbe en baignoire du taux de défaillance.....	15
Figure I.7 : Structure basique d'une cellule solaire	19

CHAPITRE II

Figure II.1 : Fonctionnement d'une cellule PV	23
Figure II.2 : dopage des semi-conducteurs.....	24
Figure II.3 : Semi-conducteur de type N	25
Figure II.4 : Semi-conducteur de type P.....	25
Figure II.5 : Jonction PN à l'équilibre.....	26
Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.	27
Figure II.7 : Structure basique d'une cellule solaire.....	28
Figure II.8 : Cellule monocristalline.....	29
Figure II.9 : Cellule poly cristalline.....	30
Figure II.10 : Les cellules amorphes.....	31
Figure II.11 : Modèle de cellule photovoltaïque idéale.....	32
Figure II.12 : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle.....	33
Figure II.13 : Courbe caractéristique P-V	35
Figure II.14 : les différents composants d'une installation photovoltaïque.....	36
Figure II.15 : Installation sur site isolé.....	37
Figure II.16 : Exemple des installations photovoltaïques.....	37
Figure II.17 : l'injection d'énergie dans les réseaux.....	38
Figure II.18 : les toitures inclinées.....	39
Figure II.19 : les toitures terrasses.....	40
Figure II.20 : Les centrales au sol.....	41

CHAPITRE I I I

Figure III.2: Interface élémentaire d'URAER	46
Figure III.1: Emplacement d'URAER.....	46
Figure III.2 : système photovoltaïque	47
Figure III.3 : digramme de Pareto	50
Figure III.5 : Décomposition d'un système photovoltaïque.....	55

Liste des tables

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.....	12
Table I.2 : Cotation d'un mode de défaillance.....	17

CHAPITRE I I I

Table III.1 : Historique	48
Table III.2 : d'analyse .ABC.....	49
Table III.3 : d'analyse des zones ABC.....	50
Table III.4 : Défaits/conséquences générateurs.....	51
Table III.5 : Défaits/conséquences - boîte de jonctions.....	51
Table III.6 : Défaits/conséquences système câblage.....	53
Table III.7 : défauts /conséquences onduleurs.....	54
Table III.8 : Etude AMDEC d'un système photovoltaïque.....	56
Table III.9 : Tableaux de récapitulatif. .../.....	59
Table III.10 : plan de maintenance de système photovoltaïque.....	60

Nomenclature

I_{cc} : Courant continu de la cellule.

I_s : Courant de saturation de la diode.

η : Le rendement

C : la vitesse de la lumière

λ : la longueur d'onde

R_s : La résistance série

R_p : La résistance

h : la constante de Planck,

P : La puissance électrique, fournie par un générateur,

S : la surface de la cellule exprimée en m²

P_{max} : la puissance électrique maximale générée par la cellule

U : tension électrique

I : intensité du courant électrique

E_{cj} : Energie totale consommée

P_{tot} : La puissance totale

N_{pv} : nombre des panneaux photovoltaïque

P en watt (W)

U en volt (V)

I en Ampère (A)

I_o: Le courant de saturation inverse de la diode [A].

V_d : La tension aux bornes de la diode [V].

V_t : Potentielle thermique.

Introduction générale

Introduction générale

Le développement économique qu'a connu la dernière décennie a engendré une concurrence intense entre les secteurs industriels. Cette concurrence s'est propagée sur le plan international et s'est caractérisée par l'implantation des entreprises partout dans le monde et parfois dans le même pays et ce, pour des raisons économiques et logistiques). Dans le domaine de l'industrie, l'évolution technique a contribué à l'amélioration de la situation des entreprises industrielles en termes de fiabilité et de réduction du nombre d'interventions. Cette amélioration s'accompagne par une bonne gestion des outils et moyens techniques et une exigence en personnels de plus en plus spécialisés. Malgré le niveau de fiabilité atteint, le «zéro panne» reste impossible. De ce fait, avec un nombre important de dysfonctionnements, les entreprises industrielles doivent à la fois produire, améliorer leurs outils de production et assurer le maintien en condition opérationnelle de leurs équipements. C'est ainsi que des solutions pratiques sont indispensables. En effet, afin d'assurer une remise en état des équipements en panne, des solutions aussi bien stratégiques et méthodologiques que techniques sont nécessaires. À cet égard, il est essentiel de prendre un critère d'efficacité de ces méthodes qui dépendra du gain, aussi bien économique qu'au niveau de fiabilité. Ces critères agiront par conséquent sur le coût de la maintenance et sur la disponibilité de production et de productivité. Des techniques et des disciplines impliquées dans les données sont là pour répondre à la nécessité de contrôler la sécurité et la production de service, tout en optimisant les coûts et les durées de maintenance. Dans ce contexte, ces secteurs nécessitent des ateliers de maintenance possédant des compétences scientifiques et techniques, et la mise en œuvre des stratégies de maintenance adaptées aux équipements et aux installations à entretenir.

Le maintien des équipements de production est un enjeu clé pour la productivité des usines aussi bien que pour la qualité des produits. C'est un défi industriel impliquant la remise en cause des structures figées actuelles et la promotion de méthodes adaptées à la nature nouvelle des matériels. Dans l'industrie, l'optimisation de la maintenance est basée sur la connaissance de la fiabilité des équipements et des politiques de maintenance adaptées. Les applications de ces politiques ont montré une grande amélioration au niveau de la performance triangulaire des systèmes industriels (Coût, Qualité, Délai).

L'utilisation des systèmes photovoltaïques pour la production de l'énergie électrique est devenue actuellement un choix indispensable de point de vue économique et environnemental. Alors que les systèmes photovoltaïques sont devenus un important fournisseur d'énergie électrique Par conséquent, la maintenance préventive est devenue un facteur majeur pour maintenir le rendement et la production dans les domaines des systèmes photovoltaïques pour la production d'énergie électrique.

Introduction générale

Dans le premier chapitre on définit les principes de la maintenance et ses grandeurs de bases.
Dans le deuxième chapitre, on définit les panneaux solaires et leurs dispositifs techniques.
Dans le troisième chapitre, nous étudions une installation solaires a grand démontions et nous faisons un plant de maintenance préventif PMP.

CHAPITRE I

I.1. Introduction :

Le terme « maintenance », forgé sur les racines latines ‘manus’ et ‘tenere’, est apparu dans la langue française au XIIe siècle. L’étymologiste « Wace » a trouvé la forme ‘mainteneur’ (celui qui soutient), utilisée en 1169 : c’est une forme archaïque de «mainteneur». Anecdotiquement, c’est avec plaisir que j’ai retrouvé l’usage du mot «maintenance» sous la plume de « François Rabelais », qui vers 1533, parlait de la «maintenance de la loy» dans Pantagruel. Les utilisations anglo-saxonnes du terme sont donc postérieures. À l’époque moderne, le mot est réapparu dans le vocabulaire militaire : «Maintien dans des unités de combat, de l’effectif et du matériel à un niveau constant».

Définition intéressante, puisque l’industrie l’a repris à son compte en l’adaptant aux unités de production affectées à un « combat économique » [1].

I.2. Définition :

Selon l’AFNOR : La maintenance est l’ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d’un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Le rôle principal d’un service maintenance est de maintenir les capacités opérationnelles des moyens de production, ainsi que leurs valeurs patrimoniales. Ces capacités opérationnelles sont nécessaires pour servir une commande, non pas lorsque l’entreprise peut l’honorer, mais au moment où le client la demande. La valeur patrimoniale peut s’envisager comme l’allongement de la durée de vie utile des machines et équipements, ce qui repousse ou annule la nécessité d’un nouvel investissement. Formulé ainsi, il apparaît évident que ce rôle ne peut s’envisager que de manière dynamique et proactive.

- Si l’on attend une panne pour réagir, la capacité opérationnelle n’est plus maintenue.
- Si l’on attend une dégradation pour réagir, la valeur patrimoniale est déjà amoindrie. [2]

I.3. Maintenance des équipements industriels :

Longtemps, la maintenance été vue comme un mal nécessaire, aujourd’hui elle est devenue une réelle préoccupation dans les entreprises. Elle est perçue comme un processus industriel à part entière et elle est identifiée comme une des activités principales de l’exploitation industrielle. [3]

I.4. Description de la maintenance :

La maintenance ne consiste pas seulement à réparer ou dépanner au moindre coût ou remettre en état dans les plus brefs délais des équipements. Elle n'est pas faite pour 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 que l'équipement soit apte à être entretenu (notion de maintenabilité) et, apte à produire avec une utilisation facile et une sécurité maximale. Pendant toute la durée de vie de production, la maintenance surveille le matériel, suit ses dégradations et le remet à niveau avec un contrôle de ses performances avec une surveillance des coûts et une disponibilité. A la fin de vie du matériel, la maintenance analyse d'abord une diminution de ses performances compatibles avec les possibilités de sa dégradation et de son renouvellement.

I.5. Objectifs de la maintenance :

On peut distinguer plusieurs types d'objectifs de la fonction de maintenance :

Assurer la production prévue (quantité) : Il faut faire constamment des compromis entre les besoins de production et les arrêts nécessaires à la maintenance avant défaillances.

Maintenir la qualité du produit fabriqué (qualité) : Il faut savoir les tolérances admissibles en qualité et les surveiller afin de rectifier les situations problématiques.

Respecter les délais (temps) : Nous discutons ici tant des délais d'intervention que les délais de fabrication. Comme les programmes et calendriers de production ont été réalisés en collaboration entre la production et la maintenance, il est essentiel que le service maintenance respecte ses prévisions de temps d'intervention dans une maintenance préventive ou corrective.

Rechercher les coûts optimaux (rentabilité) : élaborer des devis précis de réparation reposant sur les diagnostics en profondeur touchant la cause de la détérioration ou de la défaillance et non seulement les symptômes.

Respecter les objectifs humains (sécurité) : Les conditions sécuritaires de travail doivent être l'obsession du service maintenance. La maintenance est parfois une fonction à haut risque, pour son propre personnel lors de l'intervention, que pour le reste des employés après la fin des travaux si l'équipement ou l'environnement n'est pas remis en bon état pour la production.

Préserver l'environnement (environnement) : La maintenance doit souvent utiliser ou travailler en fonction de la présence de matières polluantes ou nuisibles pour l'environnement ou pour le personnel de l'entreprise. Les contraintes d'intervention doivent respecter la préservation d'un environnement de travail sain.

Respecter le cadre législatif (lois) :

Les opérations de maintenance doivent respecter le cadre législatif à tous les niveaux.

Les objectifs de la maintenance schématisés dans la figure I.1, sont nombreux :

- Assurer la qualité et la quantité des produits fabriqués tout en respectant les délais.
- Optimiser les actions de maintenance (exemple : réduire la fréquence des pannes).
- Contribuer à la création et au maintien de la sécurité au travail.
- Consolider la compétitivité de l'entreprise (exemple: améliorer la productivité).

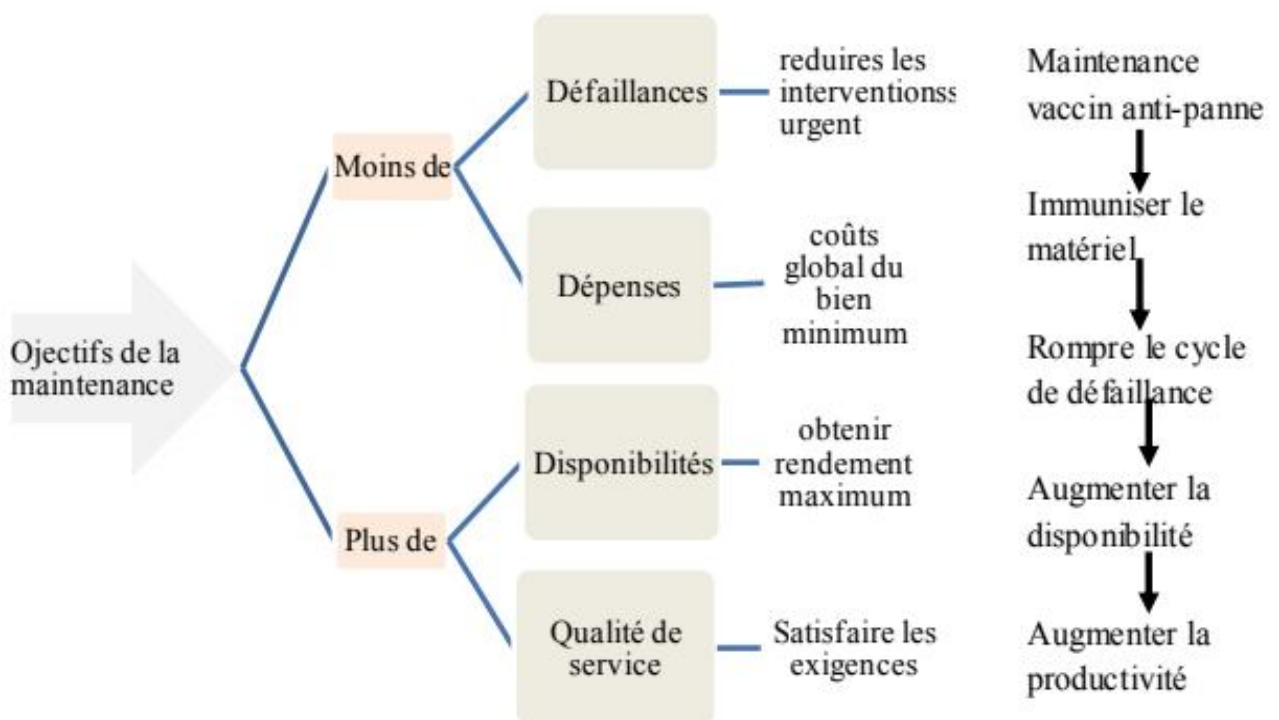


Figure I.1 : Objectifs de la maintenance. [4]

I.6. Activités de la maintenance :

La fonction maintenance peut être présentée comme un ensemble des activités regroupées en deux sous-ensembles: les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion. Ces différentes activités sont représentées dans la figure 2.1. Selon la définition AFNOR, la maintenance vise à maintenir ou à rétablir un bien dans un état spécifié afin que celui-ci soit en mesure d'assurer un service déterminé. La maintenance regroupe ainsi toutes les actions de dépannage et de réparation, de réglage, de révision, de contrôle et de vérification des équipements matériels (machines, véhicules, objets manufacturés, ...etc.) ou même immatériels (logiciels).

Un service de maintenance peut également être amené à participer à des études d'amélioration du processus industriel, et doit, comme d'autres services de l'entreprise, prendre en considération de nombreuses contraintes comme la qualité, la sécurité, l'environnement, le coût.

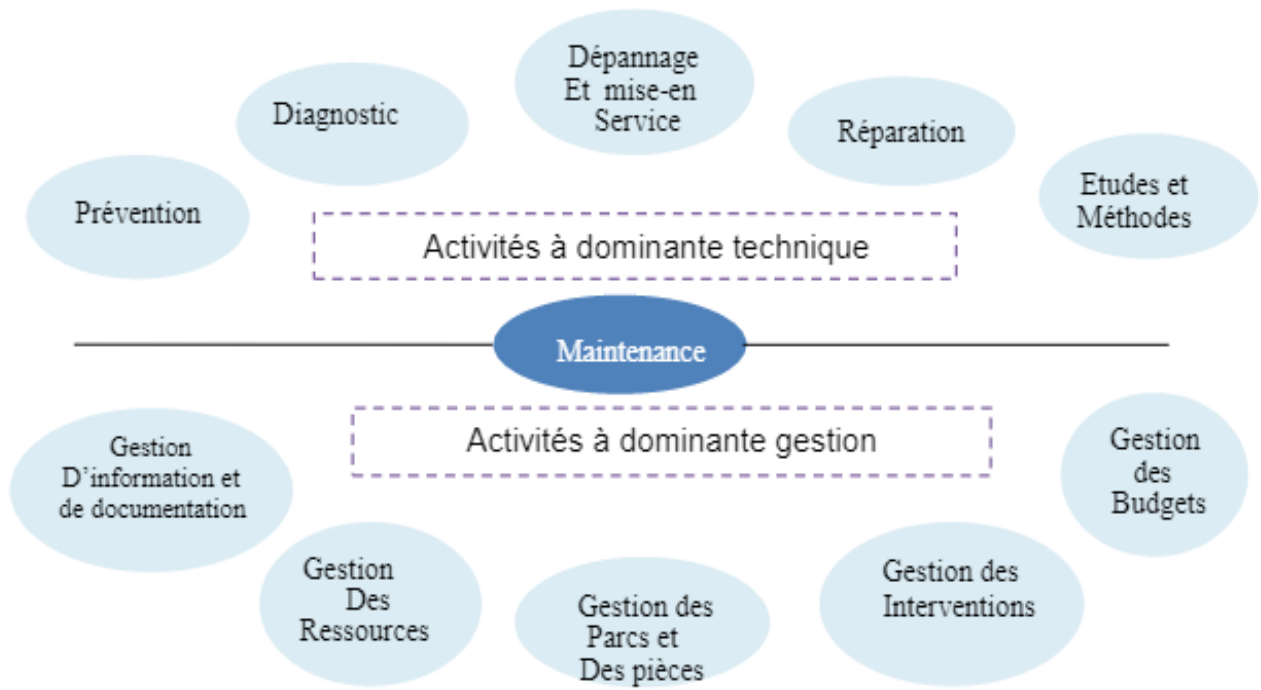


Figure I.2 : Activités de la maintenance. [4]

I.7. Types de maintenance :

Le choix entre les méthodes de maintenance s'effectue dans le cadre de la politique de la maintenance au niveau de l'entreprise et doit s'opérer en accord avec sa direction. Ce choix est à la fois technique, social, environnemental et économique. Il doit répondre aux besoins des utilisateurs des équipements Maintenance Activités.

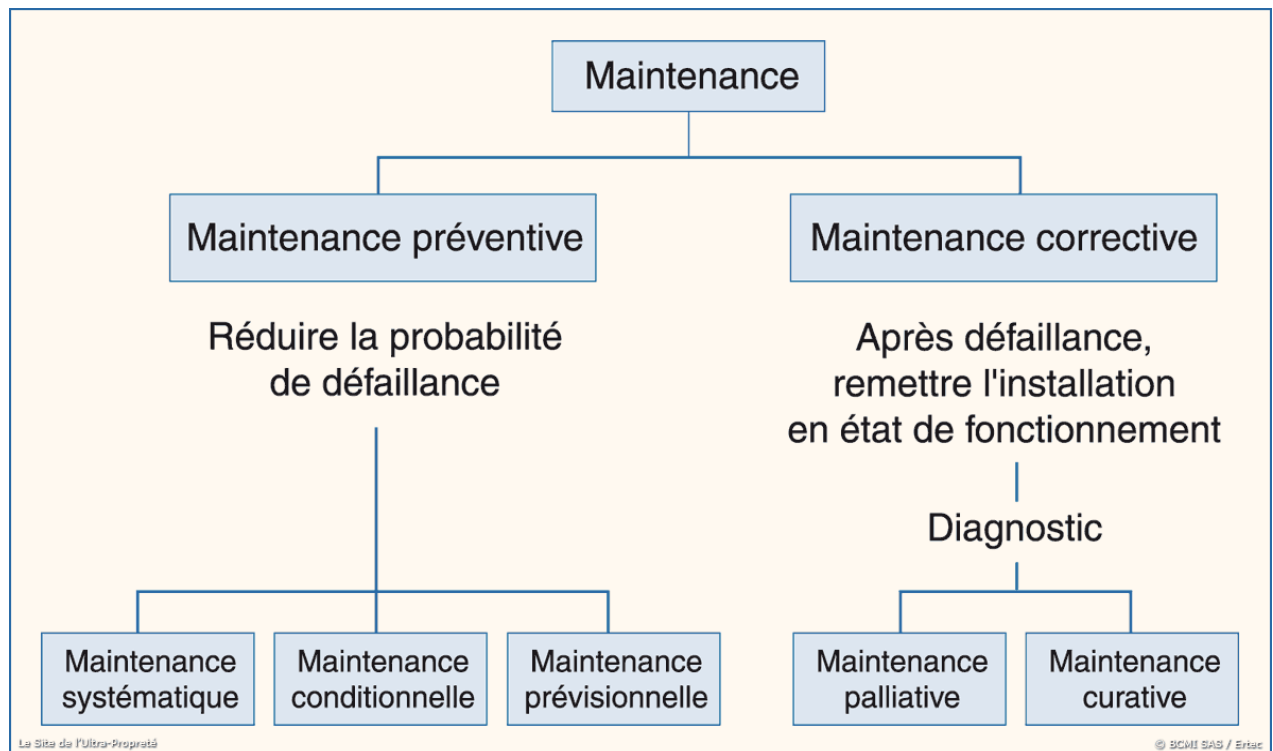


Figure I.3 : Différents types de maintenance. [5]

I.7.1. Maintenance préventive (Extraits norme NF EN 13306 X 60-319)

C'est une maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité des défaillances ou des dégradations d'un bien ou d'un service rendu. Elle doit permettre d'éviter les défaillances des matériels en cours d'utilisation.

La maintenance préventive peut être définie comme :

- Maintenance systématique.
- Maintenance conditionnelle.
- Maintenance prévisionnelle.

I.7.1.1. Maintenance systématique :

C'est une maintenance préventive effectuée suivant un échancier et établi selon le temps ou le nombre des unités d'usage. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité de produits fabriqués, la longueur de produits fabriqués, la distance parcourue, la masse de produits fabriqués, le nombre de cycles effectués, ...etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle. Cette méthode de maintenance nécessite de connaître:

- Le comportement du matériel.

- Les modes de dégradation.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries.

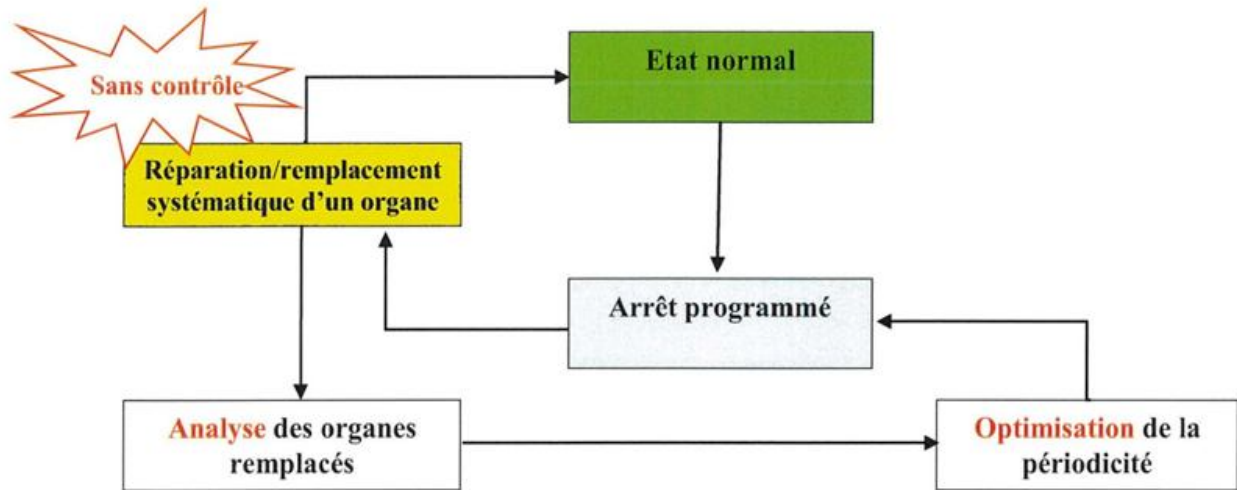


Figure I.4 : Cycle de maintenance préventive systématique [6]

Remarque : de plus en plus, les interventions de la maintenance systématique se font par échanges standards.

I.7.1.2. Maintenance conditionnelle :

C'est une maintenance préventive est subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.). La maintenance conditionnelle est une maintenance dépendante de l'expérience et fait intervenir des informations recueillies en temps réel. On l'appelle aussi maintenance prédictive. La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. Tous les matériels sont concernés par ce type de maintenance. Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité des matériels électriques.
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

Certaines méthodes comme l'analyse vibratoire, l'analyse d'huile...etc. sont très riches quant aux informations recueillies. Leur compréhension autorise la prise des décisions qui sont à la base d'une

maintenance préventive conditionnelle. La surveillance est soit périodique, soit continue

I.7.1.3. Maintenance prévisionnelle :

La maintenance préventive prévisionnelle est subordonnée à l'analyse de l'évolution surveillée des paramètres significatifs de dégradation, permettant de retarder et de planifier les interventions. La maintenance préventive prévisionnelle peut s'appliquer à tous les matériels.

Son efficacité est grandement accrue par l'utilisation de l'outil informatique, mais elle est en général coûteuse [7].

I.7.2. Maintenance corrective :

Il s'agit de la maintenance effectuée après la détection d'une panne, elle a pour objectif

De remettre un matériel défaillant à un état lui permettant d'accomplir une fonction requise, il peut être utilisé en complément d'une maintenance préventive pour l'élimination d'une avarie.

Le fonctionnement de la maintenance corrective est divisé en deux parties :

I.7.2.1. Maintenance palliative :

La maintenance palliative est une maintenance qui s'attache à la correction de tout incident identifié, et empêche la poursuite de celui-ci, c'est une intervention rapide pour pallier au plus urgent, en attendant de trouver une solution ou une correction définitive plus rassurante. La maintenance palliative permet de :

- Localiser l'incident.
- Mettre en place une solution provisoire permettant de poursuivre l'exploitation.

I.7.2.2. Maintenance curative :

La maintenance curative est une maintenance qui s'attache à corriger tout incident identifié, il s'agit d'une intervention en profondeur et définitive pour réparer un équipement de façon définitive. La maintenance curative permet de :

- Localiser l'incident.
- Développer une solution.
- Permettant de rendre la machine conforme.

I.8. Opérations de la maintenance :**I.8.1. Opérations de la maintenance corrective :****I.8.1.1. Dépannage :**

C'est une action en vue de remettre le matériel en état de fonctionnement. Compte tenu de son objectif, c'est une action de dépannage qui s'accommode avec les résultats provisoires

(maintenance palliative) et avec des conditions de réalisation, elle sera suivie de la réparation. Le dépannage n'a pas de conditions d'applications particulières. La connaissance du comportement du matériel et des modes de dégradation sont à la base d'un bon diagnostic et permettent souvent de gagner du temps. Souvent, les opérations de dépannage sont de courtes durées mais peuvent être nombreuses. De ce fait, les services de maintenance soucieux d'abaisser leurs dépenses tentent d'organiser les actions de dépannage. Certains indicateurs de maintenance prennent en compte le problème du dépannage. Ainsi, le dépannage peut être appliqué par exemple sur des équipements fonctionnant de façon continue dont les impératifs de production interdisent toute visite ou intervention à l'arrêt

I.8.1.2. Réparation :

C'est une intervention définitive et limitée de la maintenance corrective après une panne ou une défaillance. L'application de la réparation peut être décidée soit immédiatement à la suite d'un incident ou d'une défaillance, soit après un dépannage, soit après une visite de maintenance préventive conditionnelle ou systématique. Remarque : la réparation correspond à une action définitive. L'équipement réparé doit assurer les performances pour lesquelles il a été conçu

I.8.2. Opérations de la maintenance préventive :

I.8.2.1. Inspections :

Des activités de surveillance consistant à relever périodiquement les anomalies et exécuter des réglages ne nécessitant pas des outillages spécifiques, ni d'arrêt de l'outil de production ou des équipements.

I.8.2.2. Visites :

Des opérations de surveillance qui, dans le cadre de la maintenance préventive systématique, s'opèrent selon une périodicité déterminée. Ces interventions correspondent à une liste des opérations définies préalablement qui peuvent entraîner des démontages des organes et une immobilisation du matériel. Une visite peut entraîner une action de maintenance corrective. Projet réalisé

I.8.2.3. Contrôles :

Des vérifications de conformité par rapport à des données préétablies et suivies d'un jugement. Le contrôle peut : •Comporter une activité d'information. •Inclure une décision : acceptation, rejet, ajournement. •Les visites sur des opérations de maintenance corrective.

I.8.2.4. Opérations de surveillance :

C'est des contrôles, visites et inspections nécessaires pour maîtriser l'évolution de l'état réel du

matériel. Elles sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

I.8.2.5. Révision :

Ensemble des actions d'examens, de contrôles et des interventions, effectuées en vue d'assurer le matériel contre toute défaillance majeure ou critique, pendant un temps ou pour un nombre d'unités d'usage donné. Il faut distinguer, suivant l'étendue des opérations à effectuer, les révisions partielles et les révisions générales. Dans les deux cas, cette opération nécessite la dépose des différents sous-ensembles. Le terme révision ne doit en aucun cas être confondu avec les termes visites, contrôles, inspections. Les deux types d'opérations définis (révision générale ou partielle) relèvent du 4eme niveau de maintenance.

I.8.2.6. Echanges standards :

Reprise d'une pièce d'un organe ou d'un sous-ensemble usagé. Ainsi la vente au même client d'une pièce, d'un organe ou d'un sous-ensemble identique, neuf ou remis en état, conformément aux spécifications du constructeur, moyennant le paiement dont le montant est déterminée selon le coût de remise en état

I.9. Niveaux de maintenance : [8].

Niveau 1

Définition : Ce sont des actions simples nécessaires à l'exploitation du bien. Elles ne nécessitent pas d'outil ou de procédure spécifique.

Par qui : Généralement réalisées par les opérateurs machines.

Exemple : Contrôle de niveau, voyants, nettoyage d'une partie accessible de la machine, etc...

La maintenance de niveau 1 est l'affaire de tous et généralement suivie avec du management visuel.

Niveau 2

Définition : Ce sont des actions simples qui nécessitent des procédures simples.

Par qui : Des personnes formées et/ou habilitées (opérateurs, mainteneurs, etc...) suivant l'opération. Ces qualifications sont précisées dans les modes opératoires.

Exemple : Contrôle et appoint de niveau, remplacement d'élément par échange standard...

Niveau 3

Définition : Ce sont des actions qui nécessitent des procédures complexes et/ou du matériel dont la mise en œuvre est complexe.

Par qui : Des techniciens spécialisés.

Exemple : Diagnostique de panne, remplacement de composant ou remise en état de petits sous-ensembles, nécessitant la mise en application de modes opératoires plus complexes et l'utilisation d'outils, d'appareils de mesure, de contrôle etc...

Niveau 4

Définition : Ce sont des actions qui impliquent la maîtrise d'une technique ou technologie et/ou du matériel spécifique.

Par qui : Une équipe technique avec l'encadrement d'un responsable.

Exemple : Travaux importants de maintenance come la remise en géométrie d'une machine, remplacement de gros sous-ensembles, etc...

Niveau 5

Définition : Ce sont des opérations dont les procédures impliquent un savoir-faire qui fait appel à des techniques ou technologies particulières, des processus et/ou des équipements de soutien industriel.

Par qui : Il s'agit d'actions lourdes généralement réalisées par le constructeur, l'intégrateur ou un prestataire spécialisé.

Exemple : Réparations importantes ou démontage complet d'une machine, reconstruction rétrofit de machine

Niveau	Personnel d'Intervention	Moyens
1 ^{er}	Exploitant, sur place.	Outillage léger défini dans les instructions d'utilisation
2 ^{eme}	Technicien habilité, sur place	Idem, plus pièces de rechanges trouvées à proximité, sans délai.
3 ^{eme}	Technicien spécialisé, sur place ou en local de maintenance	Outillage prévu plus appareils de Mesure, banc d'essais, contrôle...
4 ^{eme}	Equipe encadrée par un Technicien spécialisé, en atelier central	Outillage général plus spécialisé, Matériel d'essais, contrôle...
5 ^{eme}	Equipe complète, polyvalente, en atelier central	Moyens proches de la fabrication par le constructeur

Tableau I.1 : Les ressources nécessaires pour chaque niveau de maintenance.

I.10. Caractéristique des activités de maintenance : [10]

Dans le milieu industriel, en général, une maintenance mixte est appliquée aux systèmes. En effet, la maintenance préventive est destinée à réduire la probabilité de défaillance, mais il subsiste une part de maintenance corrective incompressible. Il est donc nécessaire de considérer des stratégies qui combinent les deux : maintenance corrective et maintenance préventive.

De plus l'optimisation de la maintenance consiste à trouver la balance optimale entre maintenance préventive et corrective tout en respectant les objectifs fixés. L'entreprise doit rechercher un compromis afin d'optimiser les relations entre les coûts de maintenance liés à l'investissement humain et matériel, et les pertes consécutives aux arrêts de la production.

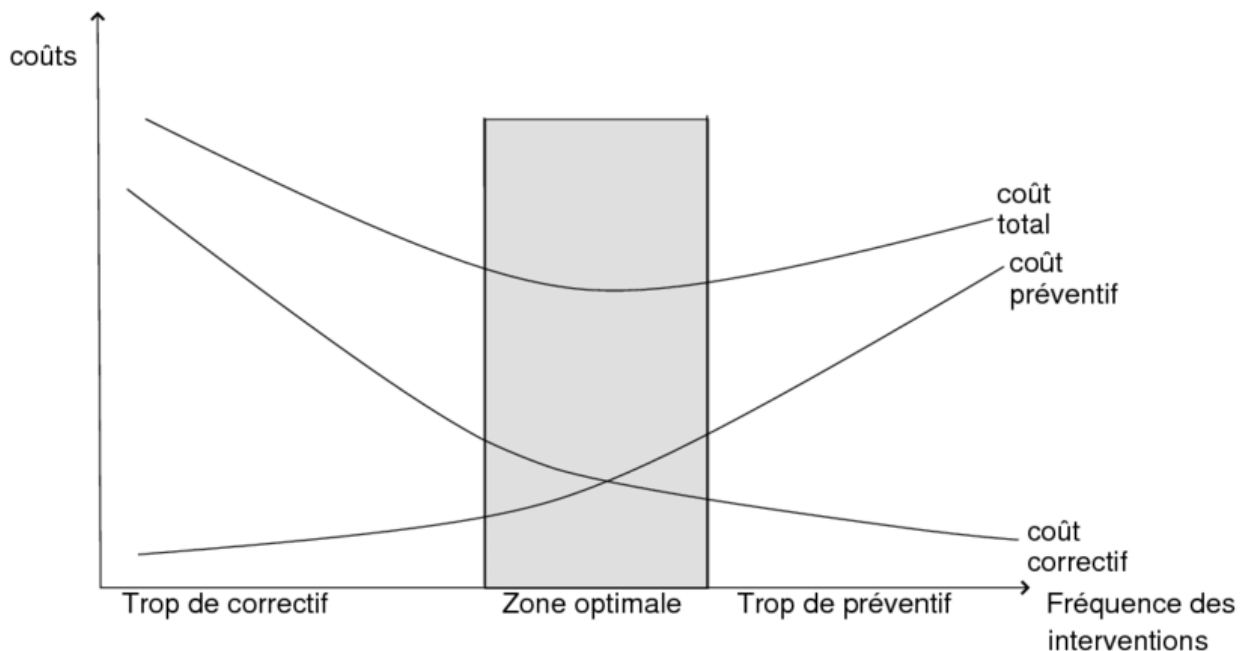


Figure I.5 : Equilibre maintenance curative/préventive. [11]

I.11. Temps de maintenance :

I.11.1. Classification des temps de la maintenance :

La maintenance a pour devoir de maîtriser à la fois les temps machines (alternances des temps de bon fonctionnement et des temps d'arrêts) et les temps d'activité des techniciens d'intervention.

I.11.1.1. Temps machines :

Ils concernent les états successifs caractérisant la disponibilité et la non disponibilité des systèmes. Pour ces temps, des saisies automatiques des dates et des durées, ou des relevés de compteurs

associés à des systèmes d'imputation des causes d'arrêts seront nécessaires.

I.11.1.2. Temps d'activité :

Comme ces temps relèvent des interventions humaines, ils se posent un problème de saisie délicat. Comme leur connaissance est aussi indispensable que la connaissance des temps machines, un effort d'explication destiné aux techniciens est souvent nécessaire. La maîtrise des temps, résulte de la performance intrinsèque de l'équipement (fiabilité) et de la performance humaine associée aux arrêts (maintenabilité), ce qui va donc permettre de gérer la maintenance d'un équipement à partir des causes d'indisponibilité à l'aide d'indicateurs de maintenance

I.12. Nature des durées des interventions de maintenance :

Les temps de maintenance comprennent les temps de la maintenance préventive et les temps de la maintenance corrective. Il sera nécessaire pour améliorer le temps d'une intervention coûteuse ou considérée anormalement longue, d'obtenir une décomposition détaillée du temps comme suit :

I.12.1. Temps de maintenance corrective :

Parmi les temps actifs de la maintenance corrective on trouve :

- Le temps de localisation de la défaillance.
- Le temps de diagnostic.
- Le temps de dépannage ou de réparation.
- Le temps de contrôle et d'essais finaux.

Parmi les temps annexes de la maintenance corrective on trouve :

- Les temps administratifs (temps de saisie, traitement de documents).
- Les temps logistiques ou durées d'attente des ressources nécessaires à l'exécution de la maintenance.
- Les temps techniques annexes (ex : phase de refroidissement d'un équipement).
- Les temps de préparation du travail (études, méthodes, ordonnancement)

I.12.2. Temps de maintenance préventive :

- Temps logistiques.
- Temps de préparation.

I.13. Courbe en baignoire

I.13.1. Phase de jeunesse :

La première (I) correspond à la jeunesse de l'équipement. Les défaillances sont dues à des défauts de fabrication ou à des phénomènes à évolution rapide. Le taux de défaillance décroît avec l'âge. Cette période a une durée variable suivant le rodage du produit. Elle s'échelonne entre quelques

heures et quelques centaines d'heures.

I.13.2. Phase de maturité :

La deuxième (II) présente un taux de défaillance sensiblement constant. Elle correspond à l'apparition de défaillances provenant de causes très diverses. Cette période correspond à la vie utile. Sa durée s'étend de quelques milliers d'heures pour les pièces mécaniques à plusieurs centaines de milliers d'heures pour les composants électroniques.

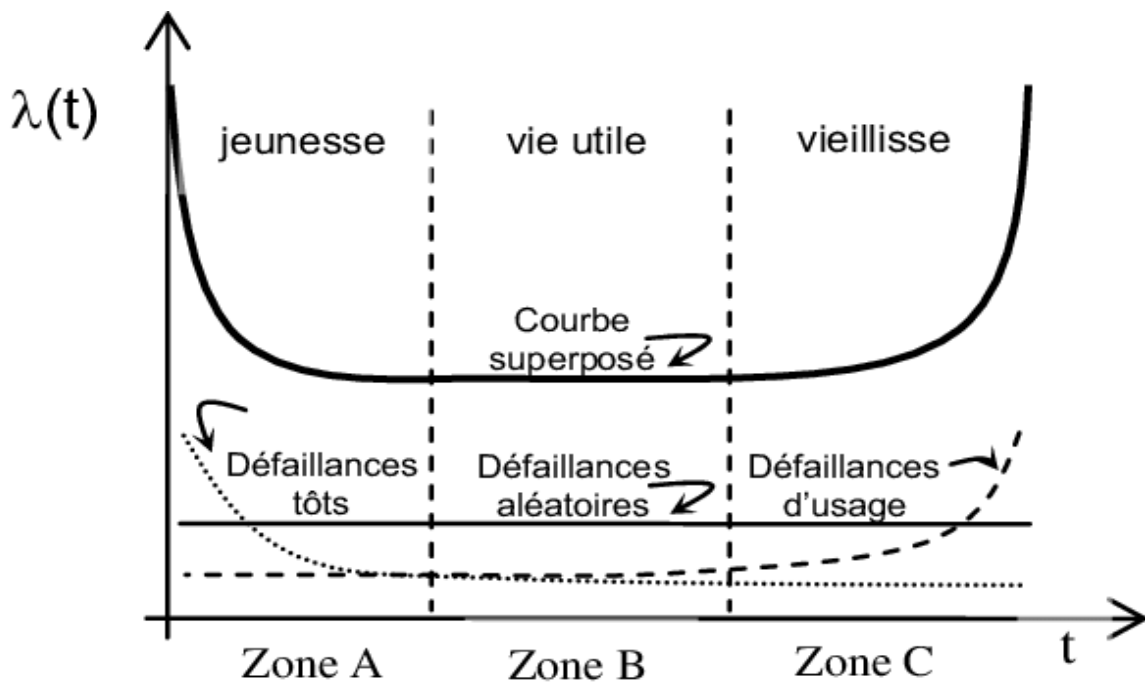


Figure I.6 : Courbe en baignoire du taux de défaillance. [12].

I.13.3. Phase de vieillesse :

La dernière (III) est caractérisée par un taux de défaillance croissant. Elle correspond à l'accroissement des défaillances due à l'usure ou à la fatigue (fin de vie).

La courbe de la figure 2.6 représente le taux de défaillance en fonction de l'âge. On distingue trois périodes.

I.14. La méthodologie AMDEC :

I.14.1. Présentation générale :

L'AMDEC est la traduction de l'anglais FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, littérairement : "Analyse des modes, des effets et de la criticité (gravité) des défaillances"). C'est une méthode d'analyse préventive de la fiabilité d'un produit, d'un processus, ou d'un moyen de production ou d'un flux d'information. Elle permet d'hierarchiser les défaillances redoutées pour

définir des actions correctives pertinentes et efficaces. C'est un outil d'optimisation qui peut être utilisé au cours des phases de conception et d'exploitation d'un SGMAO [12].

I.14.2. Les Buts de l'AMDEC :

«Rendre apte un produit, un processus de fabrication ou une organisation à remplir sa fonction et à atteindre ses objectifs ». Cela se fait par : l'identification des problèmes potentiels, la déterminant les mesures qui permettront de se prémunir contre ces problèmes potentiels et ensuite incorporer ces mesures aux pratiques de travail. L'AMDEC est une méthode qui permettra d'obtenir la qualité par une action préventive plutôt que curative. Elle s'applique soit en phase de conception (innovation), soit en phase de maîtrise.

L'AMDEC est utilisée tout au long du processus de conception dans plusieurs secteurs industriels : les automobiles, aéronautique et du ferroviaire ... etc. Une méthode dérivée de l'AMDEC est aussi utilisée dans les industries agro-alimentaires, chimique et pharmaceutique : le HACCP. Cette méthode s'intéresse plus particulièrement à la fabrication. Ainsi, l'AMDEC est un outil très intéressant pour la sûreté de fonctionnement ; mais, elle ne permet pas cependant d'avoir une vision croisée des pannes possibles et de leurs conséquences, si deux pannes surviennent en même temps sur deux sous-systèmes, l'AMDEC ne donnera pas la conséquence sur le système entier. Par exemple, dans l'aéronautique, les accidents d'avions sont très rarement liés à une seule défaillance ; ils le sont en général à plusieurs qui se manifestent simultanément. De plus, l'outil AMDEC ne doit pas devenir une fin en soi, ou que des acteurs considèrent que les problèmes notés dans l'AMDEC sont des problèmes résolus.

I.14.3. Les concepts d'AMDEC :

Les concepts de l'AMDEC sont basés sur les notions comme :

- La défaillance : cessation ou altération d'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. (Fonction principale ou secondaire)
- La cause de défaillance (amont) : circonstances associées à la conception, à la fabrication ou à l'utilisation, qui ont entraîné une défaillance.
- Effet d'une défaillance (aval) : symptôme par lequel est décelée l'altération ou la cessation d'une fonction requise, et qui en est la conséquence.
- Mode de défaillance : manière dont le bien vient à ne plus remplir la fonction requise.

Une défaillance intervient avec la combinaison de 3 éléments indépendants qui sont : la probabilité

de présence d'une cause de défaillance, l'absence de détection de la défaillance et la façon dont est atteint l'utilisateur par cette défaillance, c'est-à-dire sa gravité. L'originalité de la méthode AMDEC consiste à noter chaque mode de défaillance identifié selon 3 axes : la fréquence d'apparition (F), la gravité de l'effet pour le client (G) et enfin la probabilité de détection (D). On définit alors un « niveau de priorité de risque » NPR ou criticité C : $NPR = F \cdot G \cdot D$.

En adoptant le tableau suivant de cotation d'un mode de défaillance, dès que le NPR dépasse 100, il faut déclencher une action corrective afin de le ramener en dessous de la limite. Chaque action doit préciser : quel type d'action envisagée, qui est responsable de l'action, la note espérée à l'issue de l'action, le délai. [12]

Cotations	Fréquences	Gravité	Détection
1 à 3	Jamais ou presque	Sans conséquence	100% ou presque
4 à 6	Possible	Mécontentement	Non optimale
7 à 9	Souvent	Très mécontent/panne critique	Inexistante/incertaine
10	Toujours	Problème de sécurité	Impossible

Table I.2 : Cotation d'un mode de défaillance [12]

I.14.4. Différents types d'AMDEC

On peut distinguer trois types d'AMDEC [12] :

- AMDEC moyens de production (moyen ou machine) : analyse des défaillances à la conception et/ou à l'utilisation d'un outil de production par rapport à la sûreté de son fonctionnement et à la conformité du produit à fabriquer.
- AMDEC produit ou service : analyse de la conception du produit ou du service afin de déterminer les défaillances potentielles à partir de l'analyse fonctionnelle de ce produit ou de ce service.
- AMDEC processus : analyse des défauts qui peuvent affecter le produit (output) et qui sont imputable au processus.

I.14.5. La démarche AMDEC

- **Initialisation de l'étude AMDEC** : son but est de préciser le sujet étudié ainsi que les objectifs et les causes limites de l'étude, ensuite planifier les tâches à faire et distribuer les rôles du groupe de travail.

- **Préparation de l'analyse** : préparer un cahier de charges fonctionnelles détaillé pour la démarche.
- **Identification des causes de défaillance** : identifier les modes de défaillance potentiels de la machine, du produit ou du processus étudié. La méthode utilisée est le « déballage d'idées » ou brainstorming. On exprime pour chaque type d'AMDEC les défaillances possibles en les catégorisant ; comme par exemple : la fonction ne se réalise pas, cesse de se réaliser, réalise mais de manière dégradée ou bien la fonction se réalise de façon intempestive. Quel que soit le type d'AMDEC, chaque mode sera déclinée en : effet, causes, détection.. L'identification des causes de défaillance constitue l'ossature de l'AMDEC. La recherche de la cause consiste à mettre en évidence les causes, sous causes ... (la chaîne causale) qui entraînent le défaut jusqu'à la cause maîtrisable, il faut donc identifier l'arbre de défaillance.
- **Évaluation et hiérarchisation des causes de défaillance** : il faut évaluer chaque mode de défaillance en termes de criticité et veiller à l'homogénéité de la notation.
- **Recherche des actions correctives** : diminuer la probabilité d'apparition de la cause ou de mettre en place un contrôle pour diminuer le risque lié à la détection. Pour chaque action corrective, il faut préciser le triplet : une action, une personne, un délai.
- **Mise en œuvre des solutions : les décisions sont prises en tenant compte** : de l'analyse AMDEC, des orientations stratégiques et économiques du produit, des coûts et délais des différentes solutions. Un calendrier des actions à réaliser doit être établi.
- **Suivi des actions et bouclage si nécessaire** : Après la mise en œuvre des solutions, il est impératif de vérifier si les objectifs visés sont atteints. Dans le cas contraire, il faut reboucler sur l'étude AMDEC.

I.15. Méthode de Pareto (« ABC » OU « 20/80 ») :

I.15.1. Définition :

Le principe ou loi de Pareto (loi du 80-20, ou 20-80) est une théorie selon laquelle 20% des causes sont responsables de 80% des effets. Applicable à différents domaines et secteurs, celle-ci figure notamment parmi les méthodes de maintenance les plus connues dans le monde industriel. Que ce soit en BTS maintenance, en école d'ingénieur ou tout simplement au sein même des services méthodes maintenance des entreprises, l'analyse des pannes est directement associée aux diagrammes de Pareto, dont le but est d'établir une hiérarchie des causes d'une phénomène [13].

I.15.2. L'objectif de digramme de Pareto :

L'objectif de la distribution de Pareto est de classer les interventions de maintenance en fonction de leur nombre, puis de les hiérarchiser selon leur priorité. Voici les quelques étapes nécessaires à la création d'un diagramme de Pareto :

- 1) Définir l'ensemble des interventions en fonction du type de panne
- 2) Triez ces groupes par ordre croissant
- 3) Calculez le nombre total d'interventions ou le temps mis en fonction du type de carte de Pareto que vous souhaitez analyser
- 4) Calculer le pourcentage pour chaque groupe: nombre d'intervention / total ou temps passé / total
- 5) Réalisation du dessin

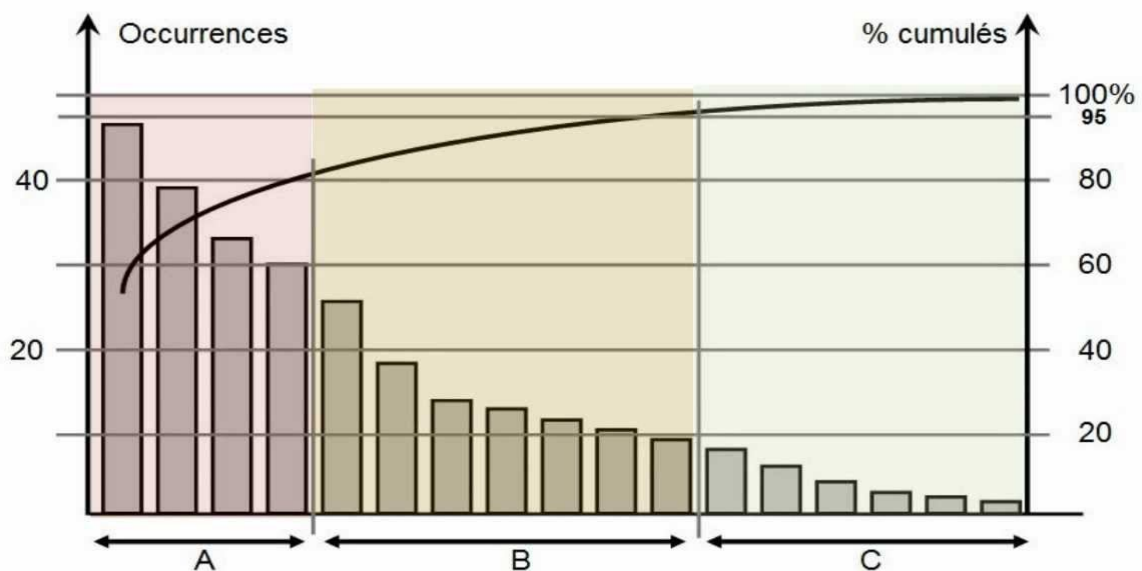


Figure I.7 : Courbe de PARETO [14].

Il s'agit de déterminer les aires obtenues à partir de la forme de la courbe sur la courbe. à Généralement, la courbe comporte deux ruptures, ce qui permet de définir trois régions a, b et c

- Région A: C'est la première partie de la courbe qui échoue le plus.
- Zone B: C'est la deuxième partie de la courbe qui définit modérément l'échec.
- Région C: C'est la troisième partie de la courbe avec le moins de défauts.

L'étude se concentre d'abord sur les éléments qui composent la zone A en priorité. Si les décisions et ajustements apportés aux éléments de la zone A ne sont pas satisfaisants, l'étude se poursuivra sur les premiers éléments de la zone B jusqu'à satisfaction. L'appartenance à la région C peut être négligée, car elle a peu d'influence sur le critère considéré

Conclusion :

La maintenance est une fonction complexe qui, selon le type du processus, peut être déterminante pour la réussite d'une entreprise. Les fonctions qui la composent et les actions qui la réalisent doivent être soigneusement analysées pour que les performances globales de l'outil de production soient optimisées. Actualisez régulièrement la fonction « Maintenance » c'est dresser un panorama complet de cette activité au niveau de ses aspects techniques (méthodes et outils) et au niveau de ses enjeux en matière de gestion humaine (sélection et performance).

CHAPITRE II

II.1. Introduction

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancée sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. Pour définition le mot " photovoltaïque " vient de la grec " photo " qui signifie lumière et de "voltaïque" qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [15, 16].

II.2. Historique

Le terme « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec « phos » qui signifie « lumière ») et du mot « volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité) [17], appelé aussi module photovoltaïque ou PV il permet la transformation directe de la lumière solaire en électricité par un processus appelé « l'effet photovoltaïque » au moyen de cellules généralement à base de silicium.

Le développement des cellules photovoltaïque a commencé en 1839 lorsque Henri Becquerel a observé le comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière [17].

En 1883, Charles Fritts met au point la première cellule fonctionnelle. Elle est à base de sélénium et d'or, elle présente un rendement d'environ 1% [18].

En 1905, Albert Einstein explique l'effet photoélectrique. L'application directe de cette découverte majeure en physique n'a eu lieu qu'au milieu du 20ème siècle avec la mise au point de la première cellule solaire à base de silicium cristallin avec un rendement énergétique de 6% au laboratoire Bel (Etats Unis d'Amérique) en 1954 [19].

Toutefois, la commercialisation des cellules photovoltaïques a échoué en raison de leurs coûts prohibitifs.

Quelques années plus tard commence la conquête de l'espace, ce qui permet aux cellules solaires à base de semi-conducteurs comme le silicium de voir le jour en tant qu'applications commerciales.

En 1958 une cellule avec un rendement de conversion de 9% est mise au point et les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

Cependant, jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre ce qui a retardé cette nouvelle source d'énergie de s'imposer en dehors du domaine spatial.

Ce n'est qu'au début des années 80 que la technologie photovoltaïque a connu une période de plein

essor partout dans le monde, de nombreuses possibilités d'exploitation sont alors étudiées en dépit des difficultés, les méthodes de fabrication se sont alors améliorées réduisant les coûts de production et permettant ainsi une augmentation des volumes de production.

Aujourd'hui la technologie du silicium domine le marché de la conversion photovoltaïque avec autour de 90% de la production des panneaux solaires [20].

La plupart des modules commerciaux actuellement ont un rendement crête compris entre 13 et 16%, alors que les rendements record dans les laboratoires sont compris entre 20 et 25% pour les différents types de matériaux cristallins [21]

Néanmoins la purification du silicium et l'utilisation de produits hautement toxiques constituent aujourd'hui un obstacle majeur au développement de l'énergie Photovoltaïque [22].

Dans ce contexte de nouvelles filière prometteuse en cours de développement ont vu le jour comme le photovoltaïque à concentration, les pérovskites mais n'ont pas encore fait leurs preuves dans le domaine industriel [23].

II.3. Le fonctionnement des panneaux solaires :

LE PRINCIPE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

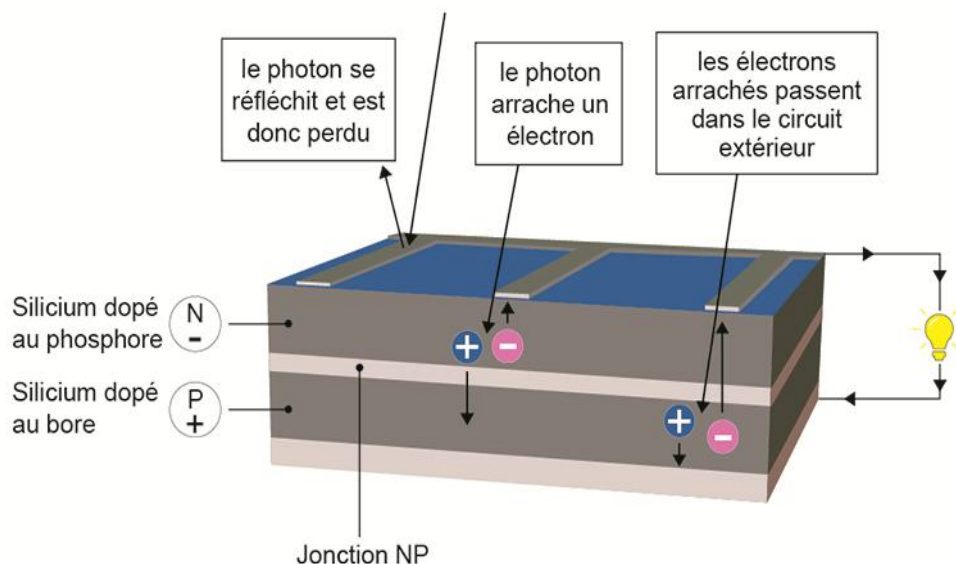


Figure II.1 : Fonctionnement d'une cellule PV

a). Fonctionnement de la cellule photovoltaïque. La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants [25] :

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

II.3.1. Le dopage des semi-conducteurs :

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve. Afin d'améliorer la conduction de ce dernier, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers (impuretés), qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur (silicium).

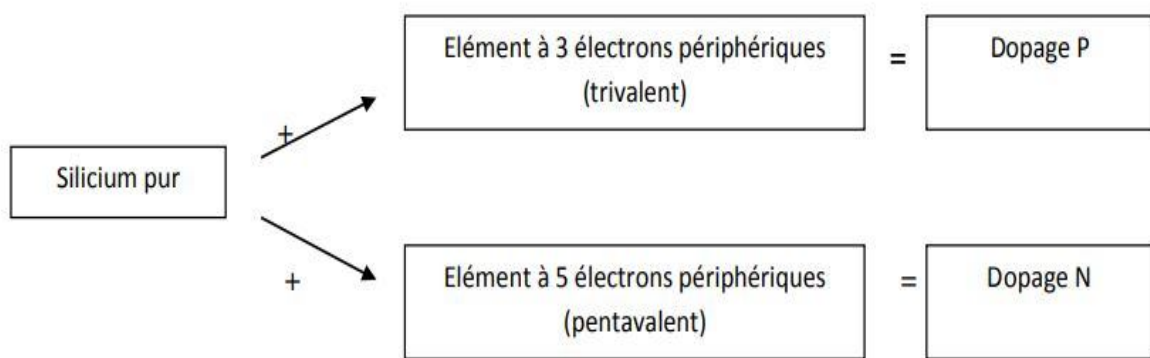


Figure II.2 : dopage des semi-conducteurs

II.3.2. Dopage N :

Le dopage N consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédant 5 électrons périphériques (pentavalentes) tel que le Phosphore. Quatre de ces électrons vont participer à la structure cristalline, et un électron supplémentaire va se retrouver libre et pouvoir se déplacer dans le cristal. Le semi-conducteur devient de type N, c'est-à-dire que les porteurs majoritairement présents dans la maille cristalline sont des électrons. Nous parlons de charges mobiles. Les ions + sont fixes car ils font partie de la structure atomique cristalline de la plaquette de silicium.

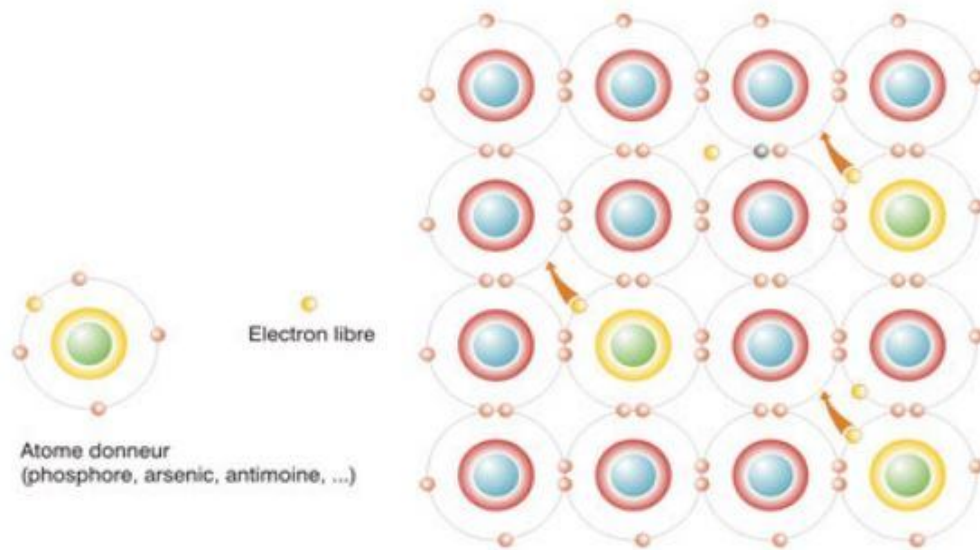


Figure II.3 : Semi-conducteur de type N.

II.3.3. Dopage P :

Le dopage P consiste à ajouter au semi-conducteur des atomes possédant 3 électrons périphériques (trivalentes) tel que le Bore. Ces trois électrons participent à la structure cristalline, mais un “trou” est créé par chaque atome étranger puisqu’il lui manque un électron périphérique. C’est-à-dire que les charges mobiles majoritaires sont des trous (positifs) dans cette région du silicium.

Les “porteurs de charges électriques” mobiles sont responsables de la conduction d’une plaquette de silicium dopée.

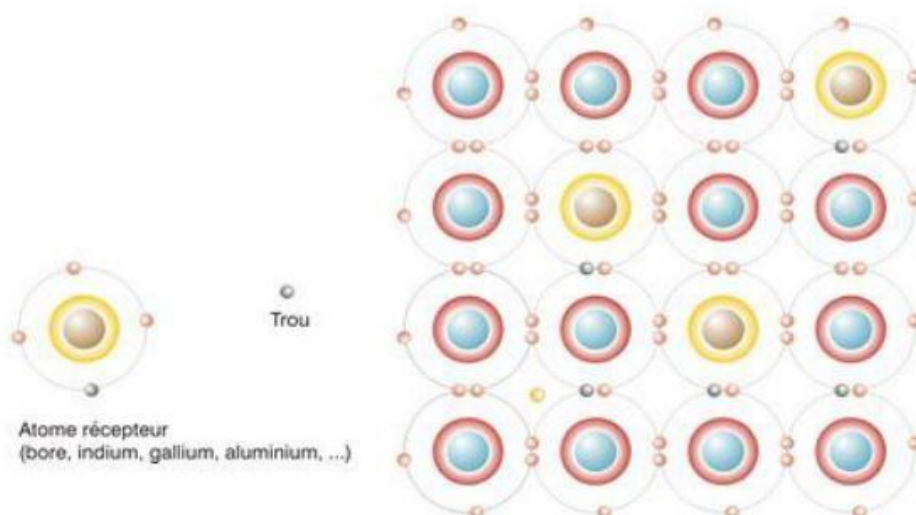


Figure II.4 : Semi-conducteur de type P. [26]

II.3.4. La jonction P-N

Lorsque les deux zones sont misent en contact, certains électrons de semi-conducteur de type N passent vers le matériau de type P tandis que les trous du semi-conducteur de type P se déplacent au même moment dans la direction opposée. Le mouvement de ces charges majoritaires forment des paires électron-trou neutre, nous obtenons alors une région appelée jonction PN dans laquelle la conductibilité passe progressivement du type P au type N.

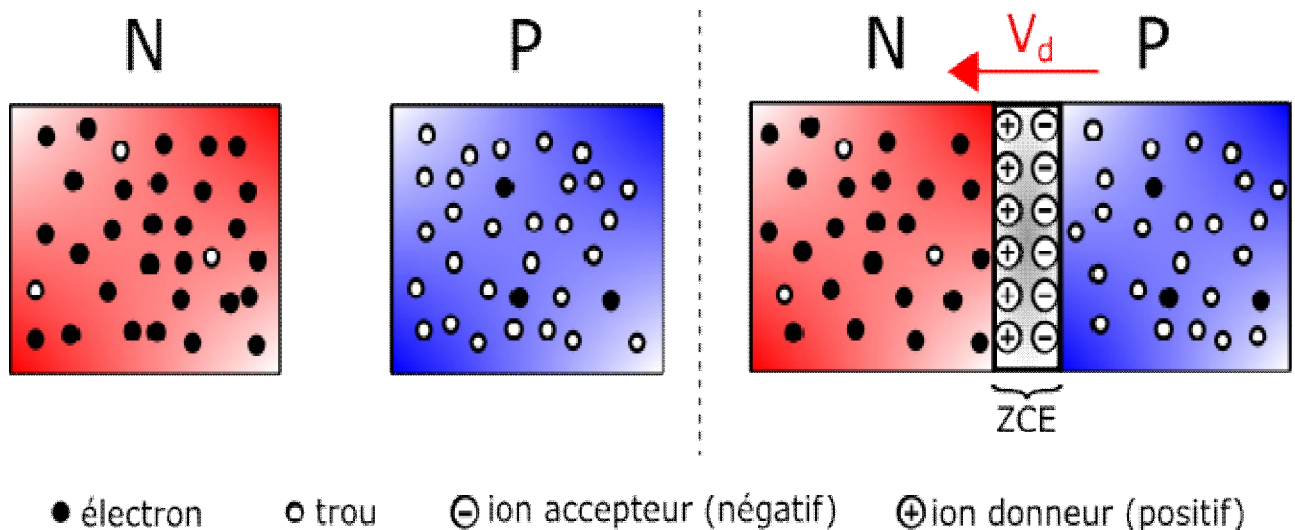


Figure II.5 : Jonction PN à l'équilibre. [27]

II.4. Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Le principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est relativement simple : il s'agit de convertir le rayonnement du soleil en électricité.

Cette opération repose sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce mécanisme a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel mais il n'a été expliqué que près d'un siècle plus tard par Albert Einstein, ce qui lui a valu le Prix Nobel de physique en 1921. De façon très schématique, l'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent).

Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le

trou de la face antérieure

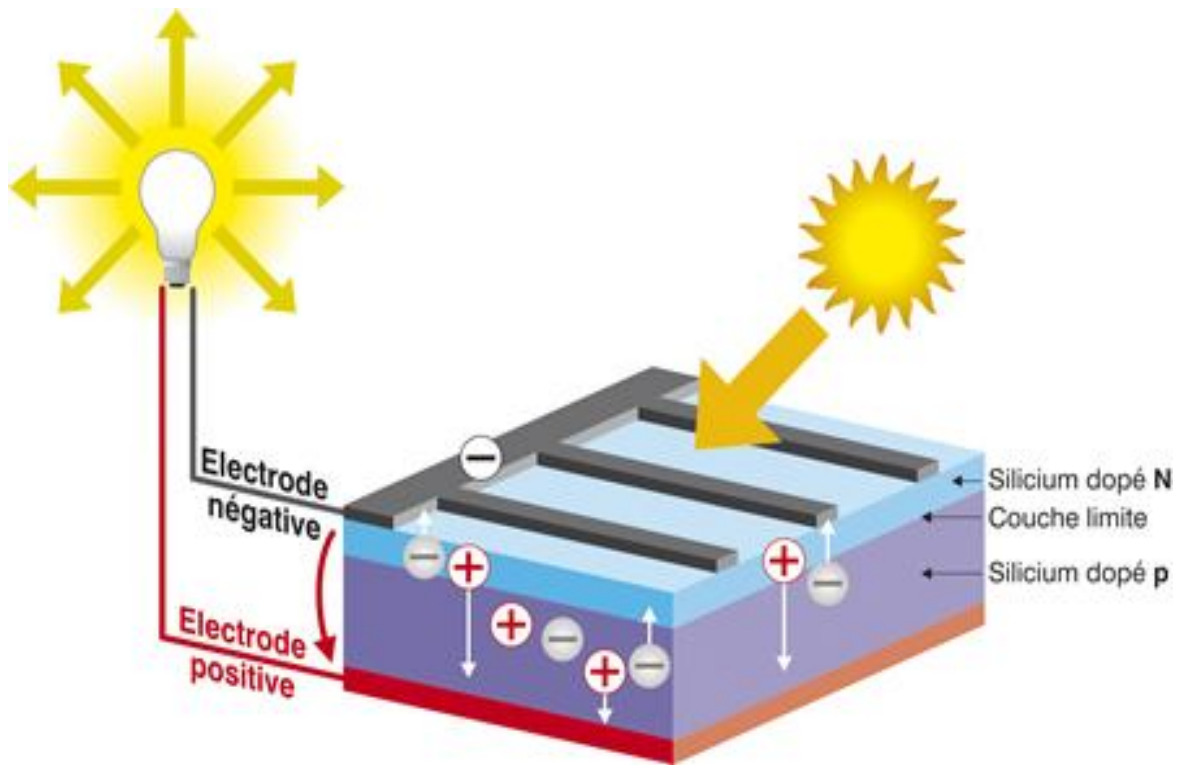


Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [28]

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un de ces matériaux, généralement du silicium, et conçue de telle façon que les électrons émis soient récupérés pour former un courant électrique. Les cellules sont assemblées pour créer un courant suffisamment élevé pour être exploité, cet assemblage de cellules est appelé module photovoltaïque ou, plus souvent, panneau solaire. [29]

5. La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, elle est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température et du vieillissement de la cellule. Composée de matériaux semi-conducteurs les cellules photovoltaïques sont constituées de :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est

possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

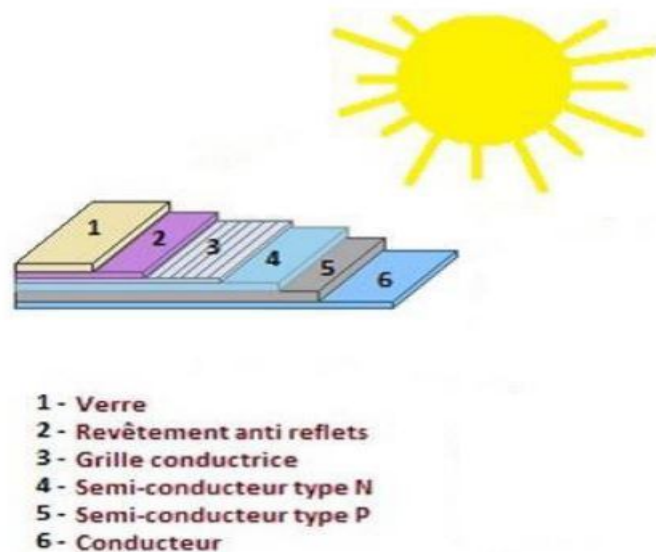


Figure II.7 : Structure basique d'une cellule solaire. [30]

II.6. La Technologie Photovoltaïque :

II.6.1. Procédé de fabrication des cellules photovoltaïques:

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers

sont métallisés: des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques. [31]

II.6.2. Différentes technologies de cellules photovoltaïques :

Une grande variété de cellules photovoltaïques existe et peut être partagée en trois grandes familles selon les technologies utilisées. La première génération existe depuis plusieurs dizaines d'années, elle offre de loin le meilleur rendement pour un rapport qualité/ prix assez satisfaisant. La deuxième génération, récemment apparue regroupe les technologies dites « couches minces », leurs rendement est encore inférieur à celui des cellules cristallines mais tend à s'améliorer pour un coût inférieur. La dernière et troisième génération, celle des cellules organiques est en cours de développement et vise de hauts rendements avec des coûts de productions de plus en plus bas. [32]

II.6.2.1. Technologies de la première génération à base de silicium cristallin :

Considérée comme la technologie photovoltaïque la plus efficace et la plus dominante la première génération comprend le monocristallin et le poly cristallin. Le silicium monocristallin reste encore plus cher que le silicium poly cristallin mais permet d'obtenir un rendement plus élevé, avec près de 19.8% contre 24.7% de rendement en laboratoire [32].

II.6.2.1.1 Cellule monocristalline :

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Cependant pour arriver à ce résultat la fabrication est complexe et coûteuse en énergie, les rendements de conversion obtenue varient entre 14 et 16% [32].

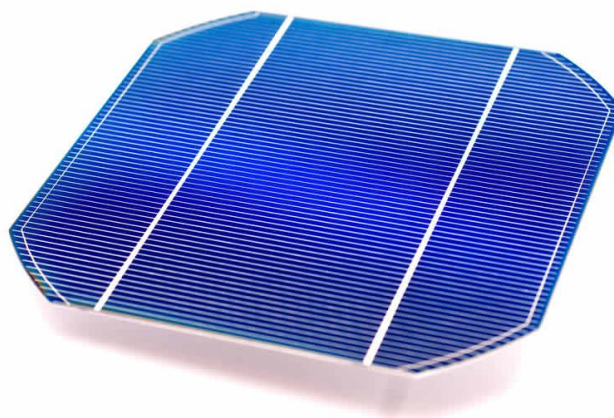


Figure II.8 : Cellule monocristalline. [33]

II.6.2.1.2. Cellule polycristalline :

Contrairement à la cellule monocristalline, la cellule polycristalline n'a pas besoin d'un silicium aussi pur et ordonné. Pour fabriquer ce matériau, on refond tous les déchets provenant du tirage des monocristaux, on obtient des lingots qu'il faut ensuite scier en plaquettes. Les rendements de conversion industrielle qui étaient de l'ordre de 8 à 10% avant 1980 sont actuellement de 16 à 17%. Il s'agit de la technologie la plus représentée sur le marché du photovoltaïque car elle allie à la fois des rendements de conversion élevés avec un coût de production faible par rapport à la filière silicium monocristallin.



Figure II.9 : Cellule poly cristalline. [34]

II.6.2.2. Technologie de la deuxième génération à base de couche-mince :

Les premiers essais de couches minces remontent au milieu du XX^{ème} siècle avec de fins dépôts sur cristaux massifs puis finalement des structures complètement à base de couches minces. Ces technologies reposent sur des matériaux possédant un fort coefficient d'absorption du spectre solaire, et promettent un avenir prometteur vu leurs croissance importante ces dernières années.

II.6.2.2.1. Les cellules amorphes :

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphe : forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux. Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2 μm . Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est-il pas nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 % [35]



Figure II.10 : Les cellules amorphes. [36]

II.6.2.2.2 Le tellure de Cadmium (CdTe) :

Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire). De part une bande interdite de 1,45eV parfaitement adaptée au spectre solaire et un très fort coefficient d'absorption, seule une couche de 2 μm est nécessaire pour obtenir un matériau très opaque et absorbant une grande partie du spectre solaire. Cependant la limite principale au déploiement de grande ampleur de cette technologie reste la toxicité du cadmium.

II.6.2.2.3. Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS) :

Cette filière présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grandes quantités.

II.6.2.3. Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques » :

Apparues dans les années 1990, les cellules organiques font aujourd'hui l'objet d'un sujet d'étude très actif en laboratoire, ce sont des cellules photovoltaïques dont, au moins, la couche active est constituée de molécules organiques. Il en existe principalement deux types : les cellules photovoltaïques organiques moléculaires et les cellules photovoltaïques organiques en polymères.

Les progrès de ces technologies sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment annoncés (actuellement près de 6%). Le principal frein à ces technologies est actuellement la

stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (actuellement environ 1000 heures d'exposition).

Les nanosciences ouvrent cependant de nouvelles voies à leurs améliorations. Leur avenir industriel n'est pas encore établi mais ces technologies ouvriraient la voie à des modules à très bas coût, biodégradables et pouvant être intégrés à toutes formes de surface.

Pratiquement, ces technologies ne sont utilisées commercialement aujourd'hui que dans le secteur de l'électronique de consommation (chargeur de GSM/ baladeur MP3) où la durée de vie de la cellule et du produit associé sont approximativement égales (2 ans). En améliorant la durée de vie ou en réduisant les coûts de production, d'autres applications devront voir le jour dans les années à venir.

II.6.2.3.1. Cellule photovoltaïque idéale :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. D'après la loi de nœuds:

$$I = I_{ph} - I_d \quad \text{II.1}$$

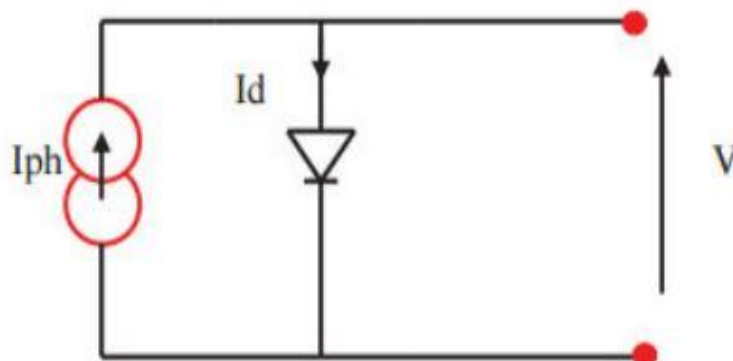


Figure II.11 : Modèle de cellule photovoltaïque idéale. [37]

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad \text{II.2}$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_o \cdot (\exp(V_d/V_t) - 1) \quad \text{II.3}$$

I_o: Le courant de saturation inverse de la diode [A].

V_d : La tension aux bornes de la diode [V].

V_t : Potentielle thermique.

Donc la relation devient :

$$I_d = I_{ph} - I_o \cdot (\exp(V_d/V_t) - 1) \quad \text{II.4}$$

II.6.2.3.2. Cellule photovoltaïque réelle :

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est illustré sur la figure I.17. Ce schéma comprend un générateur de courant photo-généré I_{ph} , des résistances série R_s et shunt R_p ainsi qu'une diode (la jonction).

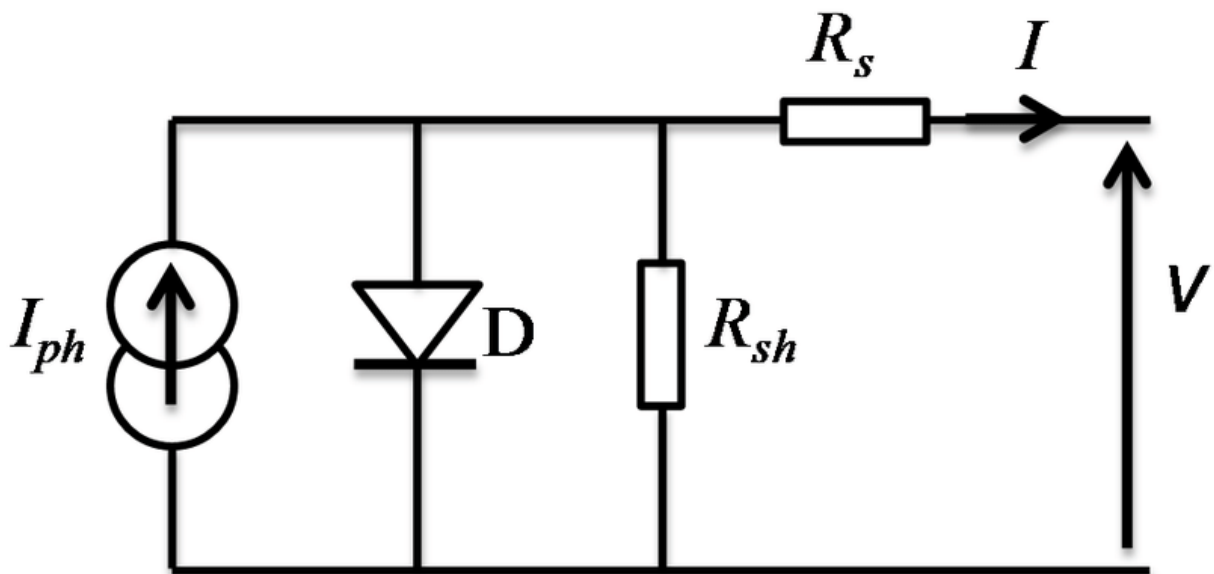


Figure II.12 : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle. [38]

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad \text{II.5}$$

$$I_p = (+R_s \cdot I) / R_p \quad \text{II.6}$$

$$I_d = I_o \cdot (\exp((+R_s \cdot I) / R_p) - 1) \quad \text{II.7}$$

I: Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G).

I_o : Le courant de saturation de la diode.

R_s : Résistance en série.

R_p : Résistance en parallèle.

$$I = I_{ph} - I_o \cdot (\exp((+R_s \cdot I) / R_p) - 1) - (+R_s \cdot I) / R_p \quad \text{II.8}$$

II.7. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{cc} , V_{co} , FF, η) extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

II.7.1. Courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit I_{cc} est le courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul ($V = 0$). C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Il dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température. [39]

II.7.2. Tension de circuit ouvert V_{co} :

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts de la couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclairement de la cellule.

$$V_{co} = \ln(nkt/q) \quad \text{II.9}$$

n : Facteur d'idéalité de la diode.

K : constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23}$ Joule/Kelvin).

T : Température de la jonction p-n des cellules.

q : Charge d'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).

E : Eclairement reçu.

E0 : Eclairement de référence.

Il peut aussi être calculé par :

$$V_{co} = (nkt/q) \cdot \ln((I_{cc}/I_s) + 1) \quad \text{II.10}$$

I_{cc} : Courant continu de la cellule.

I_s : Courant de saturation de la diode.

II.7.3. Puissance maximale

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, etc..), la puissance électrique (P) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni (I) par une tension continue donnée (V) :

$$P = I \times V \quad \text{II.11}$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt).

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

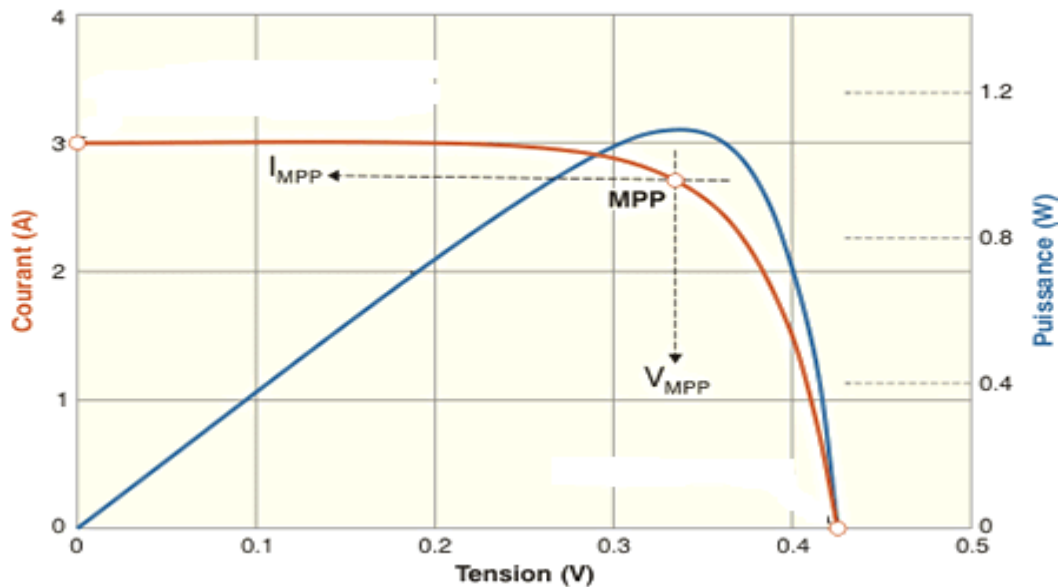


Figure II.13 : Courbe caractéristique P-V [40]

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum $P_{\max_idéale}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{\max_idéale} = V_{co} \times I_{cc} \quad \text{II.12}$$

P_{max idéale}: Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt).

V_{co} : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I_{cc} : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV (Ampère).

Par simplification, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard (STC). Ce paramètre n'est autre que la puissance maximale mesurée sous ces conditions (en général un ensoleillement de 1000 W/m^2 et une température de 25°C).

II.8. Les différents composants d'un système solaire photovoltaïque :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- chargeur/régulateur DC/DC
- Système de stockage (batteries , condensateurs, ...)
- Eventuellement un onduleur si la consommation est alimentée en courant alternatif.

- Eventuellement un groupe électrogène en appoint
- Facultatif : système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

En système photovoltaïque **connecté au réseau** les principaux composants sont :

- Panneaux photovoltaïques (+ structure de support)
- Coffret de coupure et de protection courant continu DC
- Onduleurs
- Coffret de coupure et de protection courant alternatif AC
- Facultatif : système de monitoring/supervision pour enregistrer les données et éventuellement y accéder à distance ou via un portail web

Remarque : Le coffret de protection peut être de type AC/DC en intégrant les protections continues (entrée onduleur DC) et alternatives (sortie onduleur AC).

La structure de support peut-être un élément très important en cas d'intégration au bâtiment. [41]

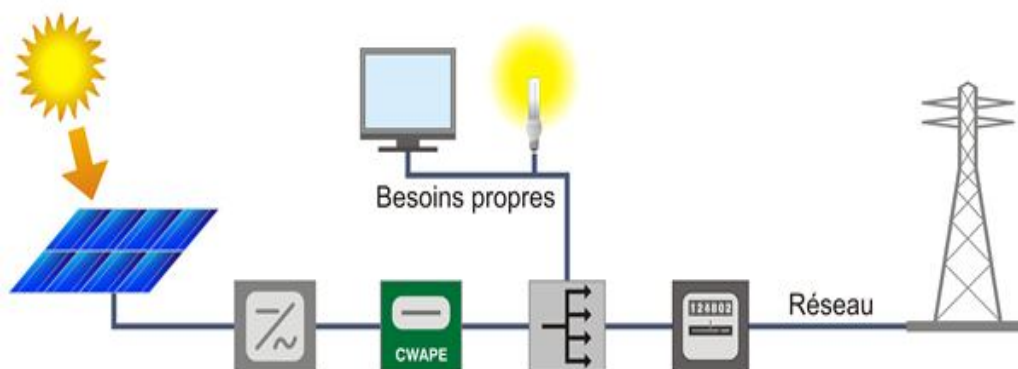


Figure II.14 : les différents composants d'une installation photovoltaïque [42]

II.9. LES DIFFÉRENTES INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES

II.9.1. Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

Les panneaux photovoltaïques produisent l'électricité en courant continu.



Figure II.15 : Installation sur site isolé

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection. L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC. Les batteries sont chargées le jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps. Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes. [43]



Eclairage public

Chalet isolé

horodateur

Figure II.16 : Exemple des installations photovoltaïques

II.9.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public :

II.9.2.1 Solution avec injection totale.

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution. Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production).
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau,

dispose de deux compteurs :

- L'un pour la production,
- L'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé). [44]

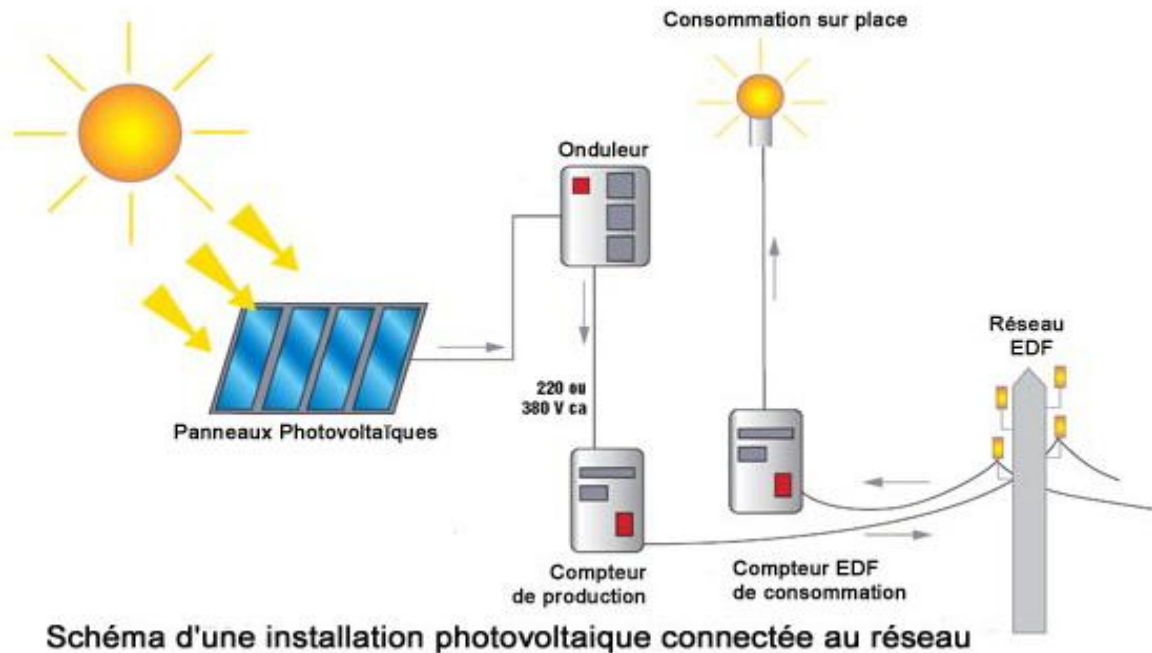


Figure II.17 : l'injection d'énergie dans les réseaux. [45]

II.9.2.2. Solution avec injection de surplus.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant.

II.10. Les différents types d'implantations des installations solaires :

II.10.1. Les toitures inclinées :

Il existe deux types d'implantation sur toiture inclinée :

- L'intégration au bâti : les panneaux viennent remplacer la couverture existante (tuile, ardoise, bac acier...) et assurer l'étanchéité de la toiture. Des primes existent encore aujourd'hui pour ce type d'intégration mais elles disparaîtront en janvier 2019 du fait des problèmes de fuites récurrents.

Cette solution a néanmoins l'avantage de ne pas engendrer de surcharge sur la toiture et peut éviter ainsi des renforcements de la charpente (étude structure obligatoire pour les ERT/ERP).

- La surimposition : les panneaux sont fixés par-dessus la couverture existante.

L'installation est donc facilitée (coût plus faible) et l'étanchéité respectée. Mais la charpente doit pouvoir supporter la surcharge (environ 20 kg/m²).



Figure II.18 : les toitures inclinées

II.10.2. Les toitures terrasses :

Les toitures terrasses sont nombreuses et souvent inexploitées. Elles offrent pourtant des opportunités non négligeables de production d'électricité.

Dans le cas de l'installation de modules PV sur une toiture terrasse, il n'y a pas de risque de perçage de l'étanchéité. Cependant, la durée de vie d'une installation PV étant de 25 à 30 ans, il est préférable de l'installer en même temps que la réfection de l'étanchéité, pour éviter de devoir démanteler les panneaux.

Plusieurs implantations existent :

- Plein sud : permet un maximum de production, mais les modules ont besoin d'être espacés suffisamment pour ne pas se faire de l'ombre (1,20 m environ). La surface utilisable sur la toiture est donc plus petite. [46].

- A plat : permet de maximiser le nombre de panneaux mais réduit de 15% la production par rapport à une installation inclinée.
- Est-Ouest : cette exposition permet de capter l'énergie le matin et le soir, ce qui la rend particulièrement adaptée à l'autoconsommation.



Figure II.19 : les toitures terrasses

II.10.3. Les ombrières de parking :

Les ombrières de parking assurent une double fonction : la production d'électricité et la protection des véhicules contre le soleil et les intempéries. Elles utilisent un espace qui a déjà une fonction, et possèdent une architecture adaptée au milieu urbain.

Il existe plusieurs types d'ombrières avec des charpentes métalliques ou en bois lamellé-collé. Il faut compter environ 10m² de panneaux photovoltaïques pour couvrir une place de parking.

En général, ce type d'installation trouve une rentabilité économique seulement à partir de 250 kWc (environ 150 places de parking), étant donné le coût de la structure.

Une étude de sol et des réseaux existants est nécessaire pour prévoir les travaux adéquats. De nombreux hypermarchés raccordent leur ombrières de parking en autoconsommation afin de couvrir une partie de leurs besoins énergétiques [46].

II.10.4. Les centrales au sol :

De quelques kiloWatts-crêtes (kWc) chez un particulier, à plusieurs MégaWatts-crêtes (MWc), les centrales au sols(CAS) ont l'avantage de pouvoir s'implanter sur de nombreux types de terrain, et

ainsi de permettre de choisir les meilleures orientations et inclinaisons pour les panneaux. Les panneaux doivent être espacés pour éviter les ombrages. Il faut compter environ un terrain d'une superficie total d'1ha pour une centrale de 500 kWc.

Bien qu'il soit préférable de privilégier des terrains pollués ou anthropisés, la possibilité d'installer une centrale au sol dépend de la puissance et des règles d'urbanismes de la localité. D'un point de vue administratif :

- Pour les installations inférieures à 3 kWc, aucune demande de Permis de Construire (PC) ou de Déclaration Préalable (DP) n'est requise.
- Pour les installations inférieures à 250 kWc, une DP est nécessaire.
- Au-dessus, un PC et une étude d'impact sont obligatoires.



Figure II.20 : Les centrales au sol

II.10.5. Les autres types d'installation :

Il existe encore d'autres types d'installation photovoltaïque, moins développés pour des raisons techniques et/ou économiques, Comme par exemple :

- En façade
- En garde corps
- En pergola
- Flottant

II.11. Montage et maintenance d'une installation photovoltaïque :

II.11.1. Normes de sécurité :

Les normes de sécurité qu'il faut absolument tenir en compte pendant le montage et la maintenance de l'installation photovoltaïque sont présentées ci-après.

- Généralités
- Batterie
- Panneaux
- Régulateur

II.11.1 Montage de l'installation :

Les actions qui doivent être conduites pour le montage approprié de l'installation sont détaillées ci-dessous [53] :

- Étudier un emplacement approprié de l'installation
- Acquisition des équipements
- Construction de l'armature
- Positionnement et connexion des panneaux
- Montage des batteries et du régulateur
- Vérification

II.12. Maintenance :

Les systèmes solaires nécessitent un entretien et une maintenance minimales mais indispensables.

Il y a deux niveaux de maintenance :

- Le premier concerne le petit entretien qui doit être effectué régulièrement par l'utilisateur.
- Le second concerne la maintenance plus poussée que vous devez effectuer en tant que technicien qualifié et équipé d'outils appropriés.

II.12.1. Préparez et organisez votre travail :

- Discutez avec l'utilisateur, avant de commencer tous travaux d'entretien. Consultez le bord du système et vos éventuelles notes
- Ne vérifiez qu'aucun des composants n'a été bricolé ou mal utilisé.

II.12.2. Procédure de maintenance du panneau solaire

- Nettoyez avec de l'eau, tôt le matin ou tard le soir (évitez savon ou détergents).
- Vérifiez d'éventuelle décoloration de cellules, bris de vitres ou corrosion des connexions entre cellules.
- Vérifiez l'absence d'ombre portée (ex : nouveau bâtiment, arbre ayant poussé, antenne TV).

II.12.3. Mesures et vérification du fonctionnement :

Les mesures et vérifications suivantes sont recommandées pour assurer le bon fonctionnement de l'installation :

- Vérifier la tension de la batterie sans charge
- Vérifier le niveau de la dissolution électrolyte
- Vérifier que le régulateur fonctionne bien
- Mesurer les tensions des bornes de la batterie, du régulateur, du générateur photovoltaïque et des consommations.

II.13. Nettoyage des batteries :

- Déconnecter les contacts dans les bornes de différentes batteries.
- Effectuer le nettoyage et la vérification de l'état des bornes et du câblage, en nettoyant les mêmes avec une brosse métallique et en vérifiant l'ajustement correct des bornes à la batterie.
- Connecter à nouveau les batteries, en faisant un ajustement approprié des bornes.

Conclusion :

La performance du système photovoltaïque est liée à de nombreux paramètres qui dépendent des composants du système ainsi que des facteurs environnementaux (température, pollution, etc.).

Dans ce chapitre, nous avons également fait une étude approfondie du système photovoltaïque, de ses propriétés et de ses types.

CHAPITRE III

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons effectuer un plant de maintenance préventive pour les composants d'un système photovoltaïque intégré au réseau en utilisant la méthode ABC et la méthode AMDEC dans l'analyse

III.1. Étude de cas (une installation solaire "système photovoltaïque") :**III.1.1 Présentation et localisation d'URAER :**

Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables est située au centre de la ville Ghardaïa. C'est l'une des plus grandes unités de développement d'énergies renouvelables dans l'Algérie

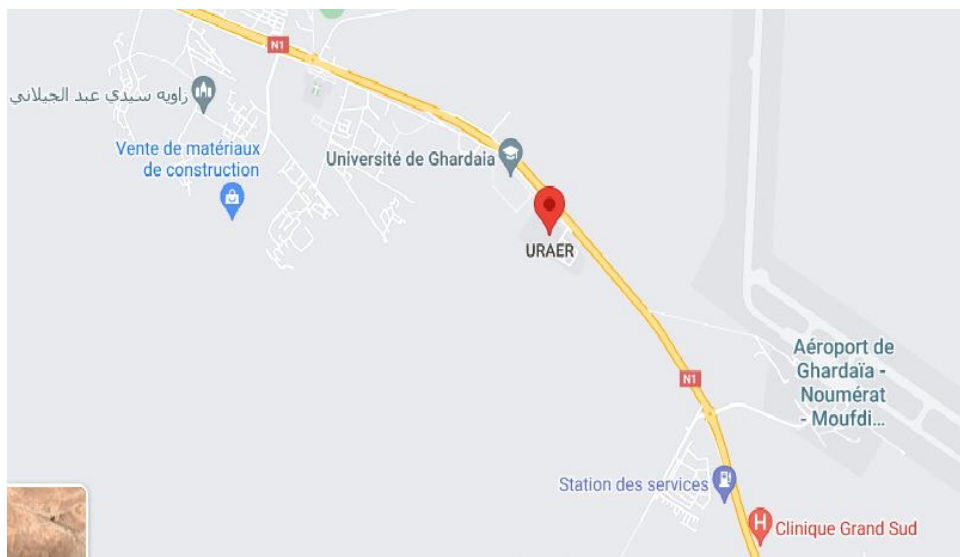


Figure III.1: Emplacement d'URAER



Figure III.2: Interface élémentaire d'URAER

III.1.1. Description du système étudié:

Le système étudié est un système photovoltaïque installé dans une société nationale spécialisée dans la production d'énergie électrique dans la Wilayat de Ghardaïa. Ce système photovoltaïque possède les équipements suivants :

- Module PV
- Batterie
- Câbles
- Régulateur
- Structure
- Boite de jonction
- Fusible
- L'onduleur



Figure III .3 : système photovoltaïque [47]

III.1.2. Exploitation de l'historique :**III.1.2.1. L'historique de panne (système photovoltaïque) :**

Le traitement des données de l'historique passe par :

- Le calcul des Temps d'arrêt (TA) suite à des pannes répétitives qui résultent des différences entre les dates d'arrêt et de démarrage.

III.1.3. L'historique : [55]

Date d'arrêt	Date de démarrage	Temps d'arrêt (h)	Action Corrective
04\01\2020	04\01\2020	6	Changement de fusible
17\01\2020	17\01\2020	8	Réparation de structures
26\01\2020	26\01\2020	8	Réparation de régulateur
11\02\2020	12\02\2020	16	Changement de batterie
17\03\2020	17\03\2020	12	Reparation de Panneaux solaire
14\03\2020	14\03\2020	10	Changement des câbles
29\03\2020	29\03\2020	6	Changement de fusible
04\04\2020	04\04\2020	10	Reparation de câbles
12\04\2020	13\04\2020	8	Reparation de structures
26\04\2020	26\04\2020	12	Reparation de panneaux solaire
15\05\2020	15\05\2020	10	Reparation de câbles
28\05\2020	28\05\2020	4	Reparation de boite de raccordement
07\06\2020	07\06\2020	12	Nettoyer les panneaux solaire
14\06\2020	14\06\2020	4	Changement d'onduleur
27\06\2020	27\06\2020	10	Changement des cables

Table III.1 : Historique [48]

III.2. L'application Pratique des méthodes d'analyse :**III.2.1. Application de la méthode PARETO sur le système :**

Nous adopterons la méthode de Pareto en analysant et selon les étapes suivantes :

1er Étape

- Calcul de la colonne «cumulées» :

$$\text{cumulées2} = \text{Temps d'arrêt} + \text{cumule1}$$

- Calcul de la colonne «Temps d'arrêt en pourcentage » :

$$\text{Temps d'arrêt} \text{ cumulées} * 100 / \text{Somme des composante}$$

Equipement	Temps d'arrêt (h)	Cumul TA (h)	% Cumul TA	Zones
Les câbles	40	40	29,41176471	A
Les panneaux	36	76	55,88235294	A
Batterie	16	92	67,64705882	A
Structure	16	108	79,41176471	A
Fusible	12	120	88,23529412	B
Régulateur	8	128	94,11764706	B
L'onduleur	4	132	97,05882353	C
Boite de raccordement	4	136	100	C

Table III.2 : d'analyse ABC

2ème Étape

- Réalisation du Graph :

Le graph réalisé par Excel

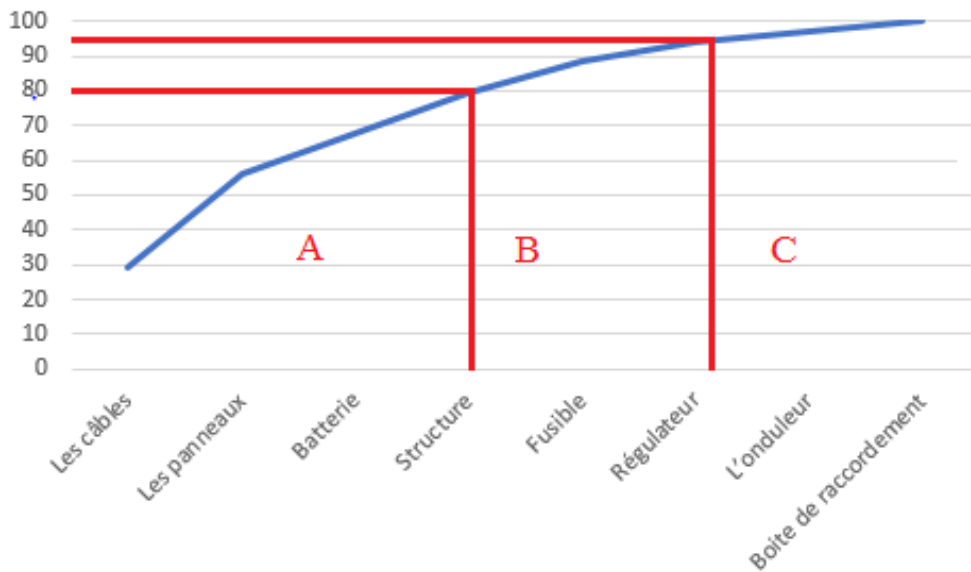


Figure III.4 : digramme de Pareto.

III.2.1.1. Explication de la courbe :

Sur le diagramme de Pareto, il y a trois zones, La première zone est A, qui représente 20% des composants, de 75% à 80% des solutions, et la deuxième zone est B, qui représente de 30% à 20% des composants qui fournissent 15% des solutions dans excès des solutions précédentes. La zone C représente 50% des ingrédients et apporte 5% des solutions restantes.

Zone A	<ul style="list-style-type: none"> ● ELEMENT significative : Les câbles , module pv , batterie et structure ● Action : Maintenance préventive sur défaillance probable et peu probable ● Influence du critère : Fort
Zone B	<ul style="list-style-type: none"> ● ELEMENT significative : Fusible , régulateur ● Action : Maintenance préventive sur défaillance probable ● Influence du critère : Moyen
Zone C	<ul style="list-style-type: none"> ● ELEMENT significative : L'onduleur , boite de raccordement ● Action : pas de maintenance préventive sur les machines ● Influence du critère : Faible

Table III.3 : d'analyse des zones ABC

- ✓ Nous concluons donc que l'entretien du câble et des panneaux et résout 80% des problèmes du système étudié
- ✓ Entretien des batteries et structure, Fusible résout 15% des problèmes.
- ✓ Maintenance des composants restants résout 5% des problèmes.

III.2.2 Les défauts et leurs conséquences les plus fréquents rencontrés dans un système Photovoltaïque : [49]

III.2.2.1. Défauts dans le générateur Photovoltaïque :

Dans le générateur photovoltaïque on trouve les défauts suivants :

N°	DEFAUTS	CONSEQUENCES
1	Dégradation des modules par vandalisme	Diminution des performances et non fonctionnement de l'installation
2	Mauvaise orientation et inclinaison des modules ou inclinaison trop faible	Ombrage, diminution des performances, Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons et problème d'étanchéité.
3	Module mal ou pas ventilé, mal fixé ou non câblée	Echauffement, Déplacement du module, diminution des performances, Perte d'étanchéité et détérioration des cellules.
4	-Corrosion du cadre des modules et tempête - Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, -- - Module arraché et cassé	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, Module arraché et cassé
5	Foudre et foudre sur l'installation	Détérioration et destruction des Modules.
6	Pénétration de l'humidité et ombrage partiel (feuille d'arbre, déjections)	Diminution des performances du Champ.

7	Important courant de fuite et échauffement des modules par la boîte de connexion	Hot spot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre et détérioration des cellules
---	--	---

Table III.4 : Défauts/consequences générateurs.

III.2.2.2. Défauts dans la boîte de jonction :

Les défauts rencontrés dans la boîte de jonction sont :

N°	DEFAUTS	CONSEQUENCES
1	Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre
2	Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
3	Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre
4	Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts et rupture du circuit électrique

Table III.5 : Défauts/conséquences - boîte de jonctions

III.2.2.3. Défauts dans le système de câblage :

Les défauts rencontrés dans le système de câblage sont données comme suite:

N°	DEFAUTS	CONSEQUENCES
1	Mauvais dimensionnement des câbles ou boîte de connexion décollée	Chute de tension > 3%, échauffement et connexion des cellules en série endommagée
2	Connexion desserrée ou cassée et toron	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction de diodes et boucle électromagnétique
3	Principe de câblage en goutte d'eau non respecté et absence de graisse de silicone	Mauvais câblage et humidité
4	Mauvais câblage ou câbles non fixés	Court-circuit, claquage des diodes anti retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur et boucle de câblage
5	Câbles d'arrivée des sous champs entamés lors du dénudé ou câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert et arc électrique. Faux contacts, circuit ouvert et arc électrique
6	Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert et arc électrique

Table III.6 : Défauts/conséquences système câblage

III.2.2.4. Défaits dans l'onduleur :

Les défauts rencontrés dans l'onduleur :

N°	DEFAUTS	CONSEQUENCES
1	Dégradation à cause la chaleur ou défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur et des connexions
2	Faux contact et fusible fondu	Arrêt de l'onduleur
3	Surtension ou onduleur non mis à la terre	Déconnexion de l'onduleur et disjoncteur différentiel non actif
4	onduleur sous dimensionné ou surdimensionné	Destruction de l'onduleur et Perte de puissance avec diminution des performances
5	Onduleur installé dans un lieu non étanche ou mal fixé	Panne et chute de l'onduleur
6	Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances
7	Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible ou perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Pas d'information sur le fonctionnement et perte des données

Table III.7 : défauts /conséquences onduleurs

III.2.3. Méthodes d'analyse prévisionnelle AMDEC :

- **Système étudié :** système photovoltaïque.
- **Objectifs à atteindre :** Amélioration des performances de système photovoltaïque

III.2.3.1. Décomposition de système :

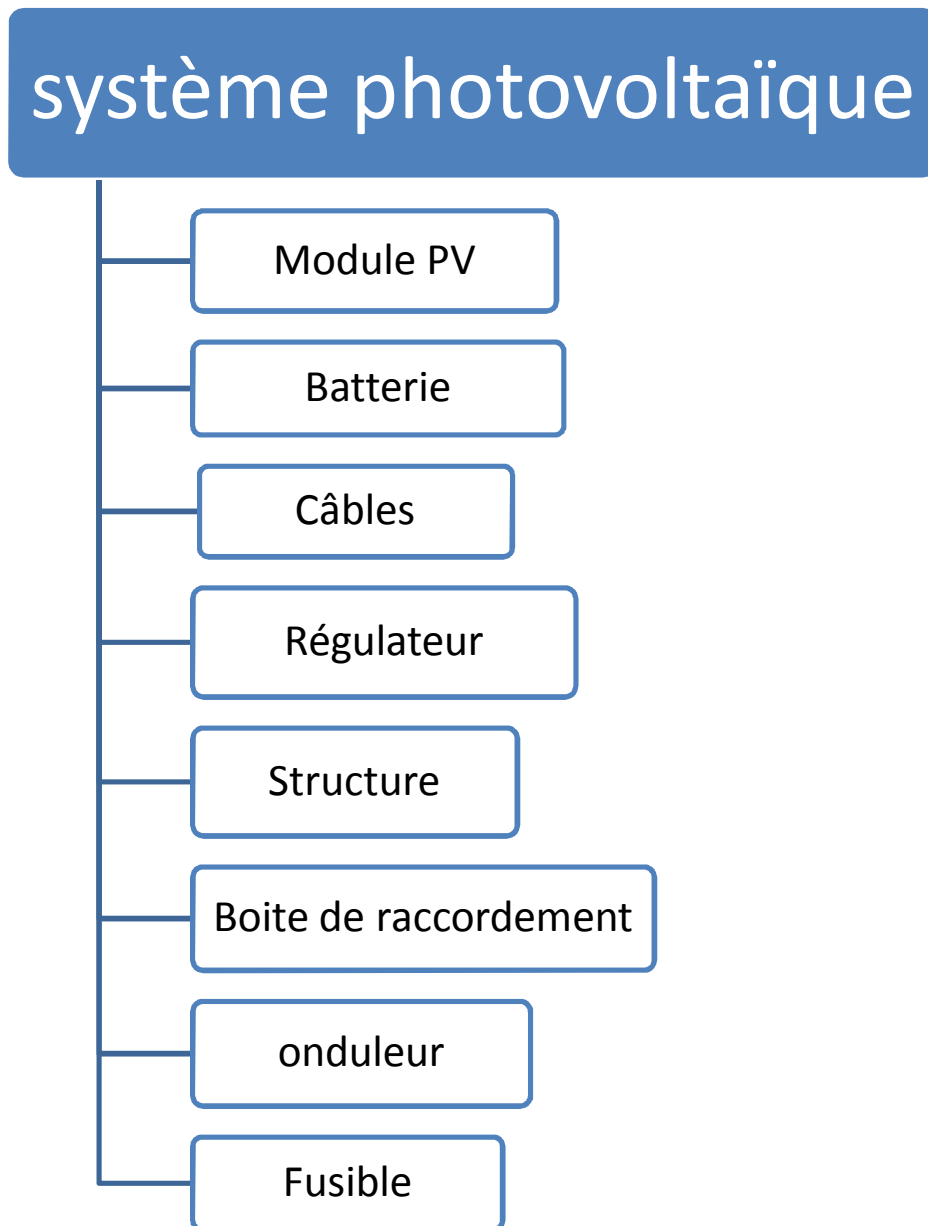


Figure III.5 : Décomposition d'un système photovoltaïque

III.2.3.2. Création du tableau AMDEC :

A la suite de la décomposition de système photovoltaïque en élément il nous faut passer à la phase d'analyse AMDEC. Les tableaux suivants représentent le récapitulatif de cette analyse :

AMDEC MACHINE – ANALYSE DES MODES DE DÉFAILLANCE DE LEURS EFFETS ET DE LEUR CRITICITÉ									
SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE									
ELEMENT	FONCTION	MODES DE DEFAILLANCE	CAUSES	EFFETS DE LA DEFAILLAN CE	CRITICITE				ACTION CORRECTIVE
					O	G	D	C	
Module PV	TRANSFORMER L'ENERGIE SOLAIRE EN ENERGIE ELECTRIQUE	LE MODULE PV NE DELIVRE PAS D'ENERGIE ELECTRIQUE	VITRAGE CASSEE	LE SYSTEME NE PRODUIT PAS D'ENERGIE ELECTRIQUE	3	4	2	24	VERIFICATON SERRAGESYSTEME MONTAGE /SYSTEMATIQUE
			DEFAILLANCE DE LA BOITE CONNEXION		3	3	4	36	CHANGEMET/ CURATIVE
			POINT CHAUD		2	4	2	16	REPLACEMENT/ CURATIVE
			DEFAILLANCE DE DIODE BY- BASS		2	4	2	16	CHANGEMET/ SYSTEMATIUE
			DELAMINATION		2	4	3	24	VERIFICATION CIRCUIT ET CABLAGE
		LE MODULE PV DELIVRE UN PUISSANCE DEGRADEE A LA PUISSANE MAX	CELLULES CASSEE	LE SYSTEME PRODUIT MOIN OU PAS D'ENERGIE ELECTRIQUE	4	2	3	24	CHANGEMENT/ CURATIVE
			DEFAILLANCE DE LA SOUDURE DES RUBANS		3	2	4	24	REPARATION OU CHANGEMENT URGENT /SYSTEMATIQUE
			INTERCONNECTI ON CASSEES		3	4	3	36	REPARATIONOU CHANGEMENT SYSTEMATIQUE

			DECOLORATION DE L'ENCAPSULANT		4	4	3	48	CHANGEMENT RAPID/ PREVISIONNELLE
			CORROSION		3	4	3	36	NETOYAGE /SYSTEMATIQUE
BATTERIE	DELIVRE L'ENERGIE ELECTRIQUE QUANT IL YA INSUFFISANCE	PROBLEME DE L'ELECTROLYTE	STRATIFICATION DE L'ELECTRODE	PAS D'ENERGIE A LA SORTIE DE LA BATTERIE	2	3	3	18	CHANGEMENT /CURATIVE
		DETERIORATION DES ELECTRODES	SULFATATION		3	4	2	24	SYSTEMATIQUE
			CORROSION		4	2	2	16	NETOYAGE / SYSTEMATIQUE
			NON COHESION DES MASSES ACTIVES		4	3	2	24	SYSTEMATIQUE
ONDULEUR	TRANSFORMER L'ENERGIE ELECTRIQUE CONTENUE EN ALTERNATIVE	L'ONDULEUR NEDELIVRE PAS D'ENERGIE ELECTRIQUE ALTERNATIVE	PANNE DE RELAIS DE SORTIE	PAS D'ENERGIE A LA SORTIE DE L'ONDULEUR	2	2	2	6	SYSTEMATIQUE STOCK SUR MAGASIN
			FAUX CONTACTE		1	3	2	6	SYSTEMATIQUE
			FUSIBLE FONDUE		1	2	2	4	SYSTEMATIQUE STOCK SUR MAGASIN
			DEFAILLANCE mppt		2	3	2	12	CURATIVE
		L'ONDULEUR DELIVRE UNE	CORROSION		1	4	2	8	NETOYGE SYSTEMATIQUE

		ENERGIE ELECTRIQUE ALTERNATIVE DEGRADEE	OXYDATION DES BOUTONS DE COMMANDE ET DE VISSERIES		1	3	2	6	NETOYAGE SYSTEMATIQUE
REGULATEUR	PROTEGER LA BATTERIE CONTRE LES SURCHARGES ET LES DECHARGES PROFONDE	PROBLEME DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES	DEFAILLANCE DE LA RESISTANCE	PAS DE REGULATION DELA TENSION DE LA BATTERIE	1	4	3	12	CHANGEMENT CURATIVE
			DEFAILLANCE DE LA DIODE		1	4	4	16	CURATIVE
			DEFAILLANCE DU TRANSISTOR		1	4	3	12	CURATIVE
Câbles et Boite de raccordement	Connecter l'alimentation	-Mauvais dimensionnement des câbles ouboîte de connexion décollété -Mauvais câblage ou câbles non fixés	POINT CHAUD	PAS DE FONCTIONNEMENT	1	4	5	20	CHANGEMENT CURATIVE
			Mauvais câblage		1	4	5	20	CURATIVE
			humidité		1	4	5	20	CURATIVE

Table III.8 : Etude AMDEC d'un système photovoltaïque

III.2.3.3. Tableaux de récapitulatif :

A partir du tableau AMDEC et l'échelle de criticité (chapitre 1) on a considéré 3 niveaux de criticité selon le tableau suivant :

Niveaux de criticité	Elements	Actions engagées
$1 \leq C < 12$	Onduleur	Aucune modification de conception
$12 \leq C < 16$	Régulateur	Amélioration de la disponibilité des équipements par une maintenance préventive systématique
$16 \leq C < 20$	Câbles	Surveillance particulière, maintenance préventive conditionnelle
	Batterie	
	Module PV	

Table III.9 : Tableaux de récapitulatif

III.2.3.4. Plan de maintenance préventive :

Période	Partie concernée	Opération
Tout les jours	Les câbles	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier l'installé les fils - Vérifier le branchement - Fixés les câbles
	Module PV	<ul style="list-style-type: none"> - Nettoyage des modules - vérifier visuellement l'état général des modules
	Batterie	<ul style="list-style-type: none"> - vérifier le serrage des bornes - vérifier la tenue des câbles et l'état des fusibles - pour les batteries ouvertes, vérifier l'état et le niveau de l'électrolyte
Chaque 15 à 30 jours	Structure	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier le cadre - Vérifier le serrage des vise
	Fusible	<ul style="list-style-type: none"> - Vérification du passage du courant électrique - contrôler l'état des fusibles
Chaque 1 à 3 mois	Régulateur	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier le serrage et l'état des câbles - Vérifier le bon fonctionnement de l'appareil
	L'onduleur	<ul style="list-style-type: none"> - vérifier visuellement l'état général de l'onduleur - vérifier le fonctionnement des Led témoins et

		des affichages - contrôlez la pile - Vérifier la tension nominale d'entrée - Vérifier le serrage et l'état des câbles
chaque 3 à 6 mois	Boite de jonction	- Vérifier les tensions de branche DC - Contrôler l'état des fusibles - Vérifier le serrage des connexions - Contrôler l'état des parafoudres (des voyants, mécaniques ou luminescents, indiquent l'état des parafoudres : par exemple vert = en bon état, rouge = hors service). - Tester les dispositifs d'arrêt d'urgence

Table III.10 : plan de maintenance de système photovoltaïque.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué une analyse de Pareto et analyse AMDEC d'un système photovoltaïque et nous avons fait un plant de maintenance pour ce système sur la base des résultats analytiques obtenus.

Conclusion générale

Les opérations de maintenance ont un intérêt critique dans l'évaluation de la faisabilité et l'analyse de la durée de vie d'un système PV. Dans cette étude, que nous avons menée sur un système intégré au réseau, qui a été installé dans une société nationale spécialisée dans la production d'énergie électrique dans la Wilayat de Ghardaïa.

Nous avons essayé dans cette mémoire, à partir d'un exemple d'AMDEC et Pareto, de montrer quelques avantages d'une telle analyse. En effet, l'exemple a prouvé que l'AMDEC permet essentiellement d'améliorer la disponibilité de la machine par réduction des temps d'arrêt, considérés comme étant un des facteurs qui contribue au respect des échéances souhaitées par le service de production, et par voie de conséquent, permet le respect des délais de livraison surtout pour une entreprise où l'énergie électrique est indispensable comme les hôpitaux ou toute endroit d'assemblage publique ou bien dans un contexte de concurrence nationale ou internationale dans le domaine de production d'autre part, la méthode offre une garantie pour la fiabilité de la machine facilitant la prise des décisions adéquates pour corriger les défaillances critiques, et pour mettre en œuvre des méthodes préventives assurant une bonne maintenabilité de dispositif ou de la machine.

Nous avons également discuté sur le travail et le concept de maintenance, ses types et les plus importants Les méthodes et techniques qui sont utilisées dans les opérations de maintenance, et nous avons fourni une explication détaillée de chaque des méthodes PARETO et de la méthode AMDEC Puisque je suis le but de ce travail de clarifier l'impact des méthodes de maintenance sur la maintenance des systèmes photovoltaïques.

Nous avons choisi d'appliquer la méthode PARETO dans la maintenance du système étudié, et les résultats analytiques de la méthode PARETO disaient que:
La maintenance de 20% des composants résout 80% des problèmes du système, et de l'ensemble des batteries, les panneaux et les fils étaient dans les 20 % ; et lors de l'exécution de la procédure de maintenance sur eux, nous avons résolu 80 % des problèmes.
Problèmes pouvant perturber le système. Et à la fin on dit ça. Devrait prêter une attention particulière à Opérations préventives afin d'éliminer les causes de dysfonctionnements fréquents de Composants en général et batteries et panneaux photovoltaïques en particulier.

Résumé :

L'énergie photovoltaïque est une possibilité de développement efficace et durable. C'est pour cela que les recherches scientifiques se développent dans le sens de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires est basée sur des critères de dimensionnement et de maximisation de la puissance générée pour avoir un bon rendement. De nombreuses méthodes ont été entreprises afin de mettre au point un système photovoltaïque pour alimenter les consommateurs.

L'analyse effectuée sur cette installation a mis en évidence le nombre de problèmes qui ont causé le bon fonctionnement des panneaux solaires et des batteries utilisées pour perturber il est devenu nécessaire de maintenir et de diagnostiquer le système. Dans ce contexte, une étude a été menée sur les méthodes d'analyse fonctionnelle et structurelle d'une étude (AMDEC), une technique qui vise à analyser l'intégrité du fonctionnement des systèmes par l'analyse du risque de pannes, permettant d'atteindre les objectifs de l'étude.

mots clés : L'énergie photovoltaïque, AMDEC, généralisé, la puissance générée

ملخص :

الطاقة الكهروضوئية هي فرصة للتنمية الكفؤة والمستدامة. هذا هو السبب في أن البحث العلمي يتطور بمعنى تعميم وتحسين تشغيل الأنظمة الشمسية. يستند تحسين الأنظمة الشمسية إلى معايير تحجيم وتعظيم الطاقة المولدة للحصول على أداء جيد. تم اتباع العديد من الطرق لتطوير نظام كهروضوئي لتزويد المستهلكين بالطاقة. سلط التحليل الذي تم إجراؤه على هذا التركيب الضوء على عدد المشكلات التي تسببت في الأداء السليم للألواح الشمسية والبطاريات المستخدمة لتعطيلها والتي أصبحت ضرورية لصيانة النظام وتشخيصه. وفي هذا السياق، أجريت دراسة عن أساليب التحليل الوظيفي والهيكلية لدراسة ما (AMDEC)، وهي تقنية تهدف إلى تحليل سلامة تشغيل النظم من خلال تحليل مخاطر الإخفاقات.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الكهروضوئية ، امداك ، التعميم ، الطاقة المولدة

Summarizes :

Photovoltaic energy is an opportunity for efficient and sustainable development. This is why scientific research is developing in the sense of generalizing, improving and optimizing the operation of solar systems. The optimization of solar systems is based on criteria of sizing and maximization of the generated power to have a good performance. Many methods have been undertaken to develop a photovoltaic system to power consumers.

The analysis carried out on this installation has highlighted the number of problems that have caused the proper functioning of the solar panels and batteries used to disrupt it became necessary to maintain and diagnose the system. In this context, a study was conducted on the methods of functional and.

Key words: Photovoltaic energy, FMECA, generalized, generated power

**Références
bibliographiques**

Références Bibliographiques

- [1] F. Monchy, J. P. Vernier, méthodes et organisations pour une meilleure productivité]. Edition Dunod, Paris 2012, ISBN 978-2-10-057967-9.
- [2] L. Jeremy, Mise en place d'un plan de maintenance - Dumas - CNRS, 2014.
- [3] S. Bassetto, S. Hubac, méthode employant les connaissances d'experts, thèse, Colloque C2EI Nancy 1-2 décembre 2004.
- [4] F. Monchy, J. P. Vernier, méthodes et organisations pour une meilleure productivité]. Edition Dunod, Paris 2012, ISBN 978-2-10-057967-9.
- [5] <https://www.ultraproprete.com/dossiers-techniques/exploitation/maintenance-des-installations-de-genie-climatique-en-salle-propre.html> le : 12-05-2022
- [5] F. Monchy, J. P. Vernier, méthodes et organisations pour une meilleure productivité]. Edition Dunod, Paris 2012, ISBN 978-2-10-057967-9.
- [6] Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique
Jérémy Llaurens
- [7] S. Bassetto, S. Hubac, méthode employant les connaissances d'experts, thèse, Colloque C2EI Nancy 1-2 décembre 2004.
- [8] <https://www.tribofilm.fr/les-5-niveaux-de-maintenance/> le : 10-05-2022
- [9] Jérémy Llaurens Mise en place d'un plan de maintenance préventive
- [10]. https://www.researchgate.net/figure/La-necessite-de-controler-lequilibre-entre-maintenance-preventive-et-maintenance_fig1_30514721 le : 12-05-2022
- [11]. Google image
- [12] Mahfoudi K. (2008) Support technique : Gestion et organisation de la maintenance
Projet de mise à niveau de la formation professionnelle en Algérie, financé par l'union européenne, 2008.
- [13] file:///C:/Users/HP15/Desktop/3/Nouveau%20dossier/v3/621.042-076.pdf
- [14] <https://i.ytimg.com/vi/0rUvWxE44nE/maxresdefault.jpg> le : 03-05-2022
- [15] C. Bernard « station solaire autonome pour l'alimentation station pompage » l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006].
- [16] : A. Hammidat Hadj arab et M.T BOUKADOUM « performance et cout des systèmes de pompage PV en ALGERIE » (2005).
- [17] Serge Poignant : «L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE», Rapport D'information, 2009, Assemblée Nationale Constitution du 4 Octobre 1958 Treizième Législature.
- [18] A. Labouret, M. Viloz : « Energie solaire photovoltaïque ». Edition le Moniteur, Dunod, 2ème Edition, 2005.

Références Bibliographiques

- [19] Fritts. On a new form of selenium photocell. American Journal of Science, 97, 1883.
- [20] G, Gomard. Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultramine. Thèse de Doctorat. Université de Lyon. 2012.
- [21] M, Urien. Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux 1.2008
- [22] M.A. Green, K. Emery, D.L. King, S. Igari and W. Warta, Progress in Photovoltaics, 13, 1 (2005) 49.
- [23] <https://lejournal.cnrs.fr/articles/quel-futur-pour-lenergie-solaire>.
- [24] Kaabi A.; " Etude et modélisation de deux distillateurs solaires symétrique et asymétrique à effet de serre ". Mémoire de doctorat, Université de Constantine, 2014, Page 16.
- [25]. <https://www.planete-energies.com/sites/default/files/thumbnails/image/schema-cellule-photovoltaïque-030419.jpg> le : 13-05-2022
- [26] <https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/Ph27.png> le : 11-05-2022
- [27] <https://fais-tes-effets-guitare.com/wp-content/uploads/2019/07/jonctionPN0.png> le : 11-05-2022
- [28] https://bcltnergie.com/_home/wp-content/uploads/2017/05/effet-photovoltaïque-2.jpg
- [29] <https://dspace.univ> le : 16-05-2022
- [30] <https://www.researchgate.net/profile/Hocine-Abdelhak-/publication/329980090/figure/fig3/AS:708975540596737@1546044349310/Structure-basique-dune-cellule-solaire-7.jpg> le : 13-05-2022
- [31] Boussalia Amar; " Contribution à l'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux". Mémoire de Magister, Université Mentouri-Constantine, 27/06/2010, Page 14.
- [32] Zhao J., Wang A., Alter matt P.P., Wenham S.R., Green M.A. "24% efficient silicon solar cells". Photovoltaic Energy Conversion Conference Record of the Twenty Fourth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - IEEE First World Conference, Volume 2,5-9 Dec. 1994 Page(s):1477 - 1480 vol.2.
- [33] <http://fr.solarpedia.net/wiki/images/a/a8/Monocristallin.png> le : 15-05-2022
- [34] <https://jadetech-95c4.kxcdn.com/wp-content/uploads/2019/05/panneau-solaire-polycristallin-ou-monocristallin-avec-cadre.jpg> le : 15-05-2022
- [35] Philippe Guibert : «TP Energie Solaire » Université pierre et marie curie : Master Energétique et Environnement.
- [36] https://asset.conrad.com/media10/isa/160267/c1/-/fr/110492_LB_00_FB/image.jpg?x=400&y=400 le : 15-05-2022

Références Bibliographiques

- [37] <https://www.researchgate.net/profile/Hocine-Abdelhak-Azzeddine/publication/329980090/figure/fig5/AS:708975540592645@1546044349360/Schema-equivalent-dune-cellule-ideale-Les-equations-retenues-de-ce-modele-sont.ppm>
- [38] <https://www.researchgate.net/profile/Mhammed-Guisser/publication/326260490/figure/fig2/AS:646093796814849@1531052173355/Schema-du-circuit-electrique-equivalent-dune-cellule-solaire.png>
- [39] http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/doc_num.php?explnum_id=3363
- [40] http://www.dekloo.net/wp-content/uploads/tension_courant_puissance_photovoltaique_mpp.jpg
- [41] <https://photovoltaique-energie.fr/composants-d-un-systeme-photovoltaique.html> le : 19-05-2022
- [42] https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/RTEmagicC_Ph36_horiz.png.png le : 19-05-2022
- [43]. Mémoire sur la Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance Énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie
- [44]. <https://www.vattenfall.fr/le-mag-energie/electricite/toutes-les-techniques-pour-produire-de-l-electricite>
- [45] <https://somabe.com.tn/nos-services/installation-photovoltaique-raccorde-au-reseau/> Le : 19-05-2022
- [46] Ingénieurs Sans Frontières, « Énergie solaire photovoltaïque et coopération au développement », IEPALA, 1999, Madrid
- [47] <http://uraer.cder.dz/>
- [48] Fichier fournisseur par URAER Unité de Recherche Appliquée aux Energies Renouvelables.
- [49] Analyse des Modes de Défaillance des Systèmes Photovoltaïques installés dans le sudAlgérien DE master en électrotechnique option : énergies renouvelables Thème