



Faculté : Technologie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Étude et simulation d'un système de pompage solaire

Présentées par :

- DERFOUL YOUSRA
- MAHKOUR SOUNDOUS

Encadrante : **KELAIAIA MOUNIA SAMIRA** Grade: **Pr** Université: **Badji Mokhtar**
-Annaba-

Jury de Soutenance :

ABD ELGHANI CHINE	MAA	BADJI Mokhtar -Annaba-	Président
KELAIAIA MOUNIA SAMIRA	Pr	BADJI Mokhtar -Annaba-	Encadrante
ABDALLAH ABDERREZAK	Pr	BADJI Mokhtar -Annaba-	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciements

Tout d'abord, On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

*Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement du Pr. **KALAIAlA MOUNIA SAMIRA**, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnelle, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous tenons à exprimer toutes nos gratitudes aux membres du jury : Pr. **ABD ELGHANI CHINE** et Pr. **ABDALLAH ABDERREZAK**.*

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.



Dédicaces

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassées, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

À mon père, qui a été ma source d'inspiration et mon modèle de détermination, merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir poussé à aller au-delà de mes limites.

À ma mère, dont le soutien infaillible et les encouragements chaleureux ont été mes piliers tout au long de ce parcours académique, je vous suis profondément reconnaissante.

À mon seul petit frère, mon bras droit, qui a toujours été là pour moi, prêt à me motiver, merci d'avoir été mon plus grand allié.

À ma binôme SOUNDIOUS, avec qui j'ai partagé des heures de travail acharné, de réflexions et de collaboration, nous avons surmonté les défis ensemble et cette réussite est le fruit de notre étroite coopération.

Avec toute ma gratitude,

Derfoul Yousra



Dédicaces

Un grand merci à l'ensemble de la famille et plus particulièrement mes parents.

A ma tendresse ... mon soleil ... ma confiance A toi ... ma chère maman qui a consacré sa vie à bâtir la mienne, pour ces sacrifices quelle est endurés pour faire de moi ce que je suis aujourd'hui, ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.

A mon enseignant ... mon soutien ... ma force A toi ... mon cher papa. Et à vous mes chers frères et ma seule et mon modèle ma sœur pour leur amour, leur confiance, leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel qui m'a permis de réaliser les études pour lesquels je me destine et par conséquent ce mémoire.

Je voudrais exprimer mes remerciements les plus sincères à ma chère binôme et amie YOUSRA qui a eu la gentillesse de me prodiguer soutien, suggestions et encouragements pour l'accomplissement du présent travail.

A mes bougies ... mes amies Lis de mon printemps.

Aux brins de lumière ... A tous qui ont laissé une empreinte de joie dans ma vie.

Mahkour Soundous

Rapport sur le travail de mémoire de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Intitulé du mémoire :

Etude et simulation d'un système de pompage solaire

Résumé :

De nombreuses populations vivant dans les zones rurales des pays en développement sont confrontées à d'importants problèmes liés à l'eau. Ces difficultés sont particulièrement exacerbées dans les régions désertiques et semi-désertiques. La pénurie d'eau dans les zones arides et semi-arides constitue une question cruciale pour ces populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces régions est étroitement liée à la recherche de solutions adaptées à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) est considéré comme la solution idéale pour l'approvisionnement en eau lorsque le réseau électrique traditionnel est inexistant.

Mots clés : énergies renouvelables, photovoltaïque, simulation, moteur, pompe.

ملخص:

يواجه العديد من السكان الذين يعيشون في ريف البلدان النامية مشاكل كبيرة تتعلق بالمياه. تتفاقم هذه الصعوبات بشكل خاص في المناطق الصحراوية وشبه الصحراوية. ندرة المياه في المناطق القاحلة وشبه القاحلة هي قضية حاسمة بالنسبة لهؤلاء السكان. يرتبط تحسين الظروف المعيشية في هذه المناطق بالبحث عن حلول مناسبة لهذه المشكلة. يعتبر الضخ الشمسي الكهروضوئي (PV) الحل الأمثل لإمداد المياه عندما تكون شبكة الكهرباء التقليدية غير موجودة.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة ، الكهروضوئية ، المحاكاة ، المحرك ، المضخة

Abstract:

Many populations living in rural areas of developing countries face significant water related problems. These difficulties are particularly exacerbated in desert and semi-desert regions. Water scarcity in arid and semi-arid areas is a crucial issue for these populations. The improvement of living conditions in these regions is closely linked to the search for appropriate solutions to this problem. Photovoltaic (PV) solar pumping is considered the ideal solution for water supply when the traditional electricity grid is non-existent.

Keywords: renewable energies, photovoltaic, simulation, engine, pump.

Résumé	1
Introduction Générale	2

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des énergies renouvelables.....	3
I.2.1 énergie éolienne	4
I.2.1.1 les différents types d'éoliennes.....	4
I.2.1.2 principe de fonctionnement.....	5
I.2.1.3 Avantages et inconvénients de l'éolienne	6
I.2.2 L'énergie hydroélectrique	7
I.2.2.1 Définition	7
I.2.2.2 Les centrales hydroélectriques	7
I.2.2.3 L'énergie des marées	8
I.2.2.4 les hydroliennes	9
I.2.3 L'énergie de la biomasse	9
I.2.3.1 Définition.....	9
I.2.3.2 les sources de la biomasse	10
I.2.3.3 les avantages de la biomasse	10
I.2.3.4 les inconvénients.....	11
I.2.4 L'énergie géothermique	11
I.2.4.1 Définition.....	11
I.2.4.2 types de l'énergie géothermique.....	12
I.2.4.3 les principes de la géothermique	12
I.2.5 L'énergie solaire.....	13
I.2.5.1 types d'énergie solaire	13
I.2.5.2 Rayonnement solaire	15
I.2.5.3 situation de l'Algérie.....	18
I.2.5.4 potentiel solaire en Algérie.....	19
I.3 Conclusion	21

Chapitre II : Énergie solaire photovoltaïque

II.1 Introduction	22
II.2 La cellule photovoltaïque.....	22
II.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	22
II.4 Différentes structures des cellules PV	23
II.4.1 Les cellules solaires au silicium	23
II.5 Modèle et circuit équivalent d'une cellule PV	24
II.6 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque	26
II.6.1 Caractéristique courant - tension (I-V).....	26

II.6.2 Caractéristique puissance - tension (P-V)	27
II.6.3 Paramètres externes	27
II.7 Association des cellules PV (le module PV)	28
II.7. 1 Association des cellules en série	29
II.7.2 Association des cellules en parallèle	31
II.7.3 Association mixte des cellules	32
II.8 Différents systèmes photovoltaïques	33
II.8.1 Systèmes autonomes	33
II.8.2 Systèmes hybrides.....	33
II.8.3 Systèmes connectés au réseau.....	34
II.9 Influence des paramètres de PV.....	35
II.9.1 Influence de l'éclairement	35
II.9.2 Influence de la température	37
II.10 Conclusion.....	38

Chapitre III : Convertisseur DC-DC : Le hacheur

III. 1 Introduction	39
III. 2 Convertisseur DC/DC	39
III.3 Type des hacheurs	39
III.3.1 Hacheur abaisseur « Buck ».....	40
III.3.1.1 Définition.....	40
III.3.1.2 Schéma du hacheur abaisseur.....	41
III.3.1.3 Phases de fonctionnement	42
III.3.2 Hacheur élévateur « Boost ».....	43
III.3.2.1 Définition.....	43
III.3.2.2 Schéma d'un hacheur élévateur.....	43
III.3.2.3 Phases de fonctionnement.....	44
III.3.3 Hacheur abaisseur-élévateur «Buck- Boost».....	46
III.3.3.1 Définition.....	46
III.3.3.2 Schéma du hacheur abaisseur-élévateur.....	47
III.3.3.3 Phases de fonctionnement.....	48
III.4 Conclusion	50

Chapitre IV : Techniques MPPT

IV.1 Introduction.....	51
IV.2 Commande MPPT.....	51
IV.3 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	51
IV.4 Différents types de commandes MPPT.....	52
IV.4.1 Méthode de Perturbation and Observation Perturb and Observe (P&O)..53	
IV.4.1.1 Principe de la méthode P&O.....	53
IV.4.1.2 L'inconvénient de P&O.....	55
IV.4.2 Méthode d'incrémentation de la conductance (IncCond)	55

IV.5 Simulation	57
IV.5.1 Simulation du Méthode de Perturbe et observe (P&O).....	57
IV.5.2 Simulation du Méthode de Incremental conductance (IncCond).....	62
IV.6 Conclusion.....	65

Chapitre V : Système de pompage photovoltaïque

V.1 Introduction	66
V.2 Les pompes	66
V.2.1 Définition.....	66
V.2.2 Classification des pompes	67
V.2.3 Fonctionnement d'une pompe	67
V.2.3.1 Pompe volumétrique	67
V.2.3.2 Turbopompe	68
V.2.4 Les caractéristiques d'une pompe	69
V.2.4.1 Les courbes caractéristiques de la pompe	69
V.3 Moteur DC	71
V.3.1 Définition	71
V.3.2 Constitution	71
V.3.2.1 L'inducteur (ou circuit d'excitation).....	72
V.3.2.2 L'induit (circuit de puissance).....	73
V.3.2.3 Le collecteur et les balais.....	73
V.3.3 Principe de fonctionnement en moteur.....	74
V.3.4 Force contre électromotrice.....	75
V.3.5 Différents types de moteurs selon l'inducteur.....	75
V.3.5.1 Moteurs à inducteur à aimant permanent.....	75
V.3.5.2 Moteurs à inducteur bobiné.....	76
V.3.5.2.1 Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu	76
V.3.6 Variation de vitesse	81
V.3.7 Les avantages et les inconvénients	81
V.3.8 Bilan de la puissance	82
V.3.9 Le rendement	82
V.3.10 Utilisation de la machine à courant continu.....	82
V.4 Batterie	83
V.4.1 Les deux principales caractéristiques des batteries.....	83
V.4.2 Les différents types de batteries.....	83
V.4.3 Les avantages.....	84
V.4.4 Les inconvénients.....	84
V.5 Conclusion.....	85

**Chapitre VI : Dimensionnement et Simulation du système de
pompage photovoltaïque**

VI.1 Introduction.....	86
VI.2 Description du site	86
VI.3 Sélection des composants du système.....	87
VI.4 Évaluation des besoins en eau.....	87
VI.5 Calcul de la puissance requise.....	87
VI.6 Estimation de la production d'énergie solaire.....	88
VI.7 Dimensionnement des batteries de stockage.....	89
VI.8 Simulation	89
VI.9 Conclusion	95
Conclusion Générale	96
Références Bibliographiques	97

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

- Figure I.1 : les types d'énergies renouvelables.
Figure I.2 : conversion d'énergie cinétique du vent.
Figure I.3 : Eoliennes axes vertical.
Figure I.4 : Eoliennes axes horizontal.
Figure I.5 : Principe de fonctionnement de l'éolienne.
Figure I.6 : L'énergie hydrique.
Figure I.7 : production de l'électricité par la force motrice de l'eau.
Figure I.8 : production de l'électricité par les barrages et les prises d'eau.
Figure I.9 : l'hydrolienne.
Figure I.10 : l'énergie de la biomasse.
Figure I.11 : les différentes sources de la biomasse.
Figure I.12 : l'énergie géothermique.
Figure I.13 : la production de l'énergie géothermique.
Figure I.14 : fonctionnement de l'énergie géothermique.
Figure I.15 : mouvement de la terre.
Figure I.16 : énergie solaire passive.
Figure I.17 : énergie solaire photovoltaïque.
Figure I.18 : énergie solaire thermique.
Figure I.19 : spectre du rayonnement solaire.
Figure I.20 : structure et compositions de l'atmosphère.
Figure I.21 : composant du rayonnement solaire.
Figure I.22 : utilisation du rayonnement solaire.
Figure I.23 : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle.
Figure I.24 : potentiel solaire économique des pays les actifs.
Figure I.25 : potentiel solaire technique en Algérie.
Figure I.26 : le coût du potentiel solaire dans le monde.

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque

- Figure II.1: Structure schématique d'une cellule solaire.
Figure II.2: Types de cellules solaires.
Figure II.3: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.
Figure II.4: Caractéristique courant - tension (I-V).
Figure II.5: Caractéristique puissance - tension (P-V).
Figure II.6: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque.
Figure II.7: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série.
Figure II.8: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série.
Figure II.9: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série.
Figure II.10: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle.
Figure II.11: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.
Figure II.12: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle..
Figure II.13: Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie.
Figure II.14: Système photovoltaïque directement relié au réseau.
Figure II.15: Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.
Figure II.16: l'influence des paramètres de PV.

Figure II.17 : Courbes P(PV) D'un panneau à divers ensoleillements à $T = 298.15K(25^{\circ}C)$

Figure II.18 : Courbes I(PV) d'un panneau à divers ensoleillements à $T = 298.15K(25^{\circ}C)$

Figure II.19 : Courbes P(PV) d'un GPV pour différentes températures à $G=1000W/m$

Figure II.20 : Courbes I(PV) d'un GPV pour différentes températures à $G=1000W/m$

Chapitre III : Convertisseur DC-DC : Le hacheur

Figure III.1 : Symbole et signaux du convertisseur DC-DC.

Figure III.2 : Schéma de convertisseur abaisseur « Buck ».

Figure III.3 : Formes d'onde de Courant et de Tension d'un convertisseur abaisseur.

Figure III.4 : Convertisseur Buck durant l'état On.

Figure III.5 : Convertisseur Buck durant l'état Off

Figure III.6 : Schéma de convertisseur élévateur « Boost ».

Figure III.7 : Formes de tension et de courant d'un hacheur élévateur 'Boost' .

Figure III.8 : Schéma équivalent de la phase 1.

Figure III.9 : Circuit équivalent pour T_{OFF} .

Figure III.10 : Schéma électronique de convertisseur Buck-Boost.

Figure III.11 : Formes des tensions et des courants d'un hacheur élévateur-abaisseur .

Figure III.12 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.

Figure III.13 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.

Chapitre IV : Techniques MPPT

Figure IV.1 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

Figure IV.2: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal.

Figure VI.3: Illustration de la méthode P&O.

Figure IV.4 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O.

Figure IV.5 : Divergence de la méthode P&O .

Figure IV.6 : Caractéristique de tension-puissance du panneau.

Figure IV.7 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.

Figure IV.8 : Schéma de simulation de la Méthode du P&O .

Figure IV.9 : Variation échelonnée de l'éclairement

Figure IV.10 : Variation des caractéristiques du panneau pour un éclairement variable

Figure IV.11 : Variation des caractéristiques d'hacheur pour un éclairement variable

Figure IV.12 : Schéma de simulation (Méthode Incrémental)

Figure IV.13 : Variation des caractéristiques du panneau pour un éclairement variable

Figure IV. 14: Variation des caractéristiques de l'hacheur pour un éclairement variable

Chapitre V : Système de pompage photovoltaïque

Figure V.1: schéma d'une pompe hydraulique

Figure V.2: Pompe centrifuge

Figure V.3: Pompe volumétrique à disque excentré
Figure V.4 : Fonctionnement de quelques types de pompe volumétrique
Figure V.5: évolution de la vitesse et de la pression dans la pompe
Figure V.6 : Courbe caractéristique hauteur en fonction du débit
Figure V.7: Courbes caractéristiques : rendement et puissance en fonction de débit
Figure V.8 : Courbes caractéristiques de NPSH en fonction de débit
Figure V.9 : Différents types de fonctionnement du MCC
Figure V.10 : moteur à courant continu
Figure V.11 : l'inducteur de la machine à courant continu
Figure V.12 : L'induit de la machine à courant continu
Figure V.13 : Collecteur
Figure V.14 : Balai
Figure V.15 : Loi de Laplace.
Figure V.16 : Moteur à aimant permanent
Figure V.17: Différents modes d'excitations
Figure V.18 : Caractéristique de vitesse d'un moteur série
Figure V.19 : Caractéristique de couple d'un moteur série
Figure V.20: Schéma de MCC à excitation shunt
Figure V.21 : Schéma de MCC à excitation composée
Figure V.22: Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée
Figure V.23: Le couple en fonction de courant d'alimentation
Figure V.24: Bilan de la puissance
Figure V.25: types de batteries

Chapitre VI : Dimensionnement et Simulation du système de pompage photovoltaïque

Figure VI.1 : Description du site de pompage photovoltaïque
Figure VI.2 : Besoin en eau
Figure VI.3 : Profile d'éclairement
Figure VI.4 : Simulation pompage photovoltaïque
Figure VI.5 : Tension de panneaux solaires
Figure VI.6 : Courant de panneaux solaires
Figure VI.7 : Tension boost de l'hacheur
Figure VI.8 : Courant boost de l'hacheur
Figure VI.9 : Courant de batterie
Figure VI.10: Courant du moteur a courant continu
Figure VI.11: vitesse du moteur a courant continu
Figure VI.12: Couple du moteur a courant continu
Figure VI.13: Couple résistant du pompe
Figure VI.14: Débit de la pompe
Figure VI.15: les puissances du système

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Tableau I.1 : classification des turbines éoliennes.

Tableau I.2 : potentielle solaire en Algérie.

Chapitre III: Convertisseur DC-DC :Le hacheur

Tableau III.1 : différents types d'hacheur.

Chapitre V : Système de pompage photovoltaïque

Tableau V.1 : Domaine d'application et caractéristiques du MCC à excitation série.

Tableau V.2: Domaine d'application du MCC à excitation shunt.

Tableau V.3 : Domaine d'application du MCC à excitation composée.

Tableau V.4: Domaine d'application du MCC à excitation séparée.

Introduction générale

L'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus importants au monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majorité du territoire national, soit près de 1700KWh/m^2 /an au Nord et 2263 kWh/m^2 /an au Sud du pays. L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non polluante, son utilisation offre un approvisionnement en énergie inépuisable.

Etant donné que l'approvisionnement en eau pour les besoins domestiques et d'irrigation reste le souci quotidien des habitants des zones isolées et sahariennes, les systèmes de pompage photovoltaïque sont particulièrement bien adaptés pour l'alimentation en eau à partir des sources de cette dernière. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse.

Dans ce travail, nous avons tout d'abord présenté dans le 1^{er} chapitre des généralités sur les différentes sources d'énergies renouvelables existantes.

Dans le 2^{ème} chapitre nous focalisons notre attention sur la production d'électricité par énergie solaire photovoltaïque ainsi que l'effet photovoltaïque, ensuite nous rappellerons le principe de la conversion photovoltaïque, le fonctionnement d'une cellule, la constitution d'un GPV et influence de ses performances par les conditions météorologiques (température, éclairage).

Nous avons présentée dans le 3^{ème} et 4^{ème} chapitres les modèles mathématiques (modélisation) et la simulation du convertisseur de la chaîne du pompage photovoltaïque (le hacheur), les méthodes de la commande MPPT des générateurs photovoltaïques, pour mieux gérer la puissance délivrée par ce dernier.

Dans le 5^{ème} chapitre nous avons mis en évidence les notions théoriques : Du moteur à courant continu, de la pompe centrifuge et des batteries de stockage.

Après avoir compris les principes de base du pompage solaire, on a clôturé notre mémoire par un 6^{ème} chapitre qui résume l'objectif principale de cette étude basée sur le dimensionnement du système en fonction des besoins spécifiques de chaque site on utilisant les outils de simulation (MATLAB SIMULINK) qui nous ont permis de modéliser et d'évaluer les performances du système dans différentes conditions.

Ce mémoire vise à explorer et à analyser en profondeur le système de pompage solaire, en mettant l'accent sur son étude, dimensionnement et sa simulation. En combinant la théorie et la pratique, nous espérons apporter une contribution significative à l'utilisation durable de l'énergie solaire dans le domaine de l'approvisionnement en eau, en fournissant des bases solides pour la conception et la mise en œuvre de systèmes de pompage solaire efficaces et fiables.

Chapitre I:

Généralités sur les énergies renouvelables

I.1 Introduction :

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20 à 30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie. Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à une échelle de temps compatible avec l'histoire de l'humanité. Ce n'est pas le cas des combustibles fossiles et nucléaires.

I.2 Définition des énergies renouvelables:

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à échelle humaine de temps. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement, cycle d'évaporation, photosynthèse, biocarburants...).

Les énergies renouvelables sont issues de l'activité du vent (énergie éolienne) et par les cycles renouvelés de l'eau (énergie hydraulique), ou de la biomasse (bois, biogaz, biocarburants...), ou de la chaleur (énergie géothermie), soleil sous forme de rayonnement direct (énergie solaire).

On distingue plusieurs types d'énergie renouvelable :

- L'énergie éolienne ;
- L'énergie hydraulique ;
- La biomasse ;
- La géothermique ;
- L'énergie solaire.

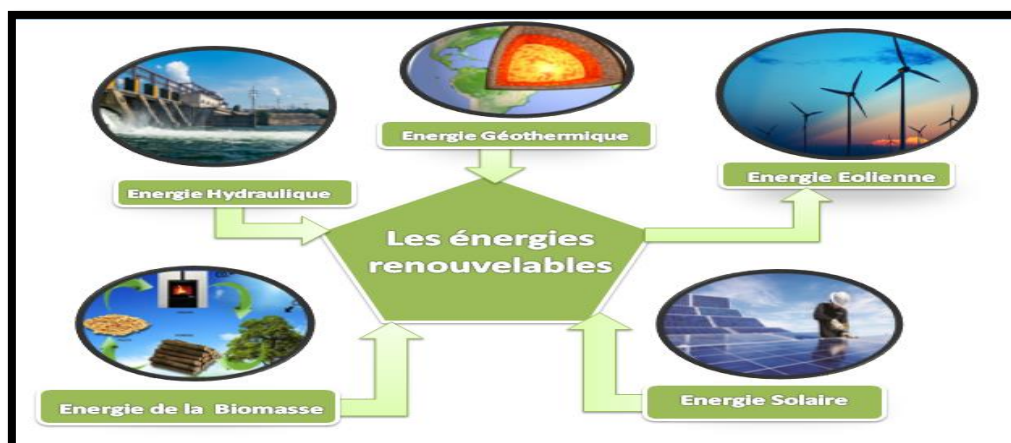


Figure I.1 :Les types d'énergies renouvelables.

I.2.1 Énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est généralement utilisée pour produire de l'électricité et entre dans la Catégorie des énergies renouvelables [1].

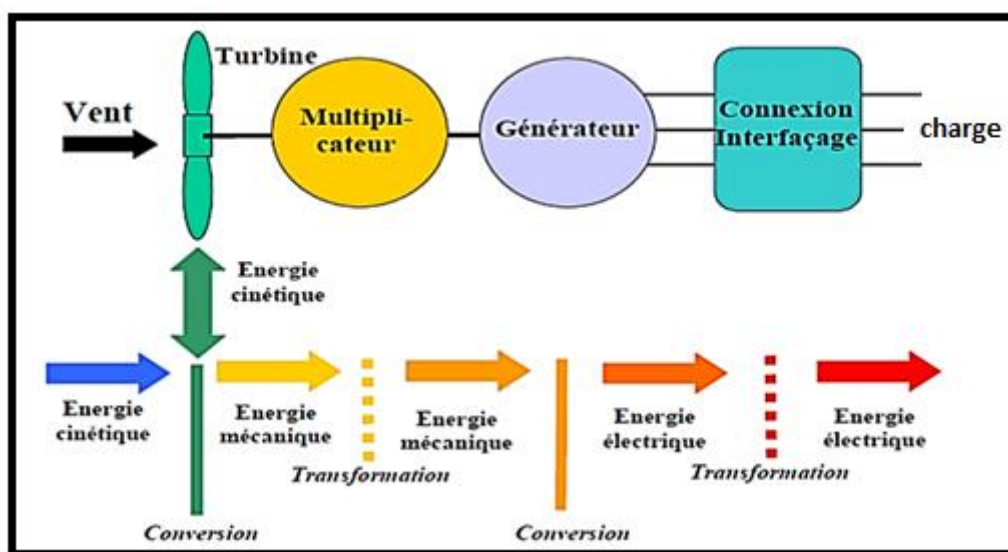


Figure I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.2.1.1 Les différents types d'éoliennes :

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



Figure I.3 : Eoliennes à axe vertical.

Figure I.4 : Eoliennes à axe horizontal.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12m à 45m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46m et plus	1MW et plus

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes [1]

I.2.1.2 Principe de fonctionnement :

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité.

Elle est composée des principaux éléments suivants :

- **Un mât**, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts;
- **Une nacelle**, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;
- **Le rotor**, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice.
- **Une éolienne** produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entraîner la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas. Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison. Il

y est élevé à une tension supérieure (20 000 V) afin d'être injecté sur le réseau national.

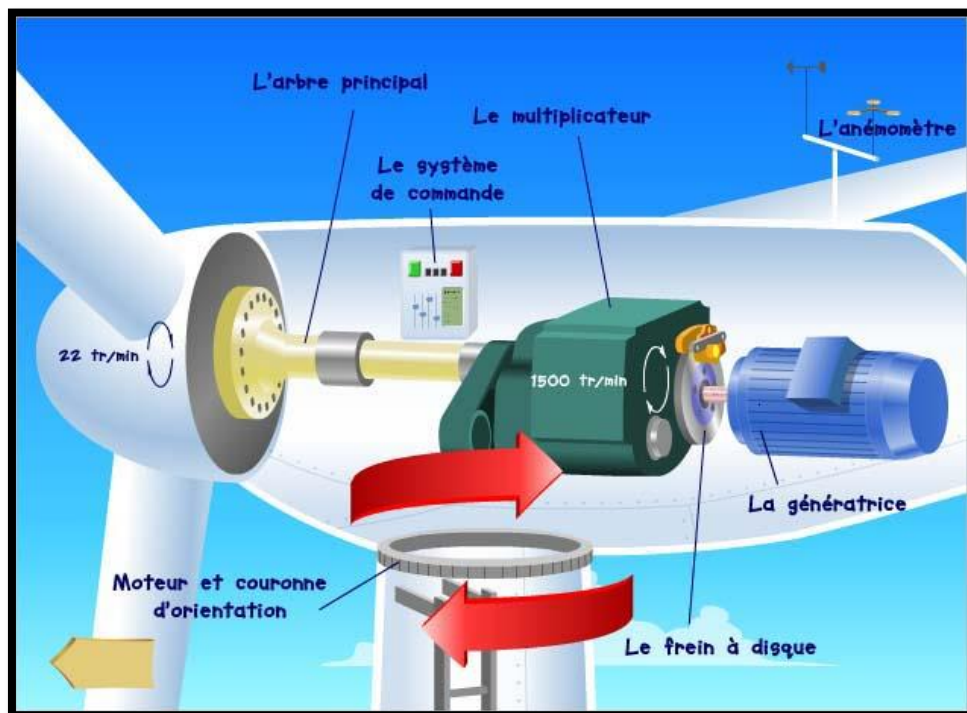


Figure I.5 : Principe de fonctionnement de l'éolienne.

I.2.1.3 Avantages et inconvénients de l'éolienne :

A. Les avantages :

- Forme d'énergie durable et propre.
- Elle ne produit aucun rejet, émission ou déchet.
- Les éoliennes permettent l'électrification en site isolé.
- Énergie ne nécessitant aucun carburant.

B. Les inconvénients :

- Projets de longue durée.
- Faible disponibilité (20 à 30%).
- Difficultés de raccordement au réseau.
- Surface au sol.
- Bien qu'elles soient de plus en plus silencieuses, certains estiment que les éoliennes émettent des nuisances sonores [1].

I.2.2 L'énergie hydraulique :

I.2.2.1 Définition :

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité.

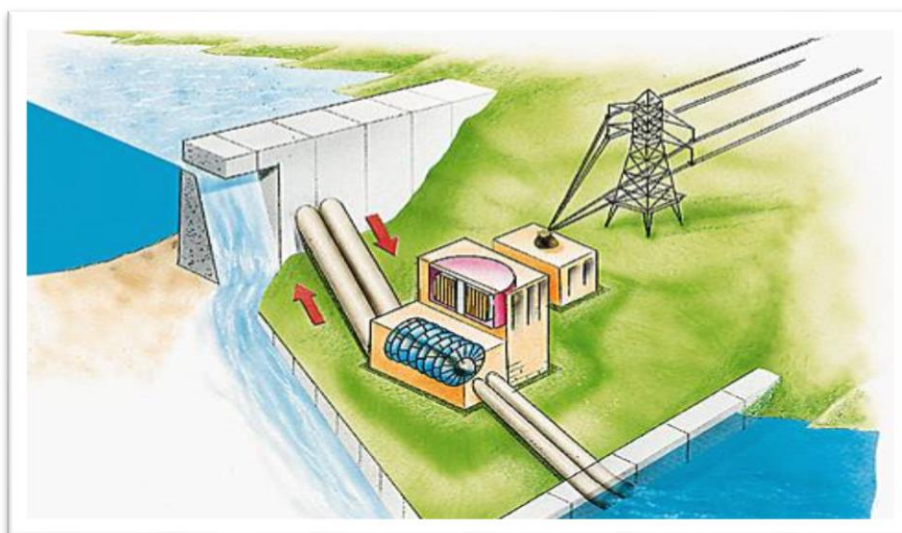


Figure I.6 :L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, appelée hydroélectricité, dans les centrales hydroélectriques.

Son utilisation permet de compenser en partie les fluctuations de production occasionnées par l'exploitation croissante des énergies solaire et éolienne tributaires de la météo, garantissant ainsi une alimentation stable en électricité issue de sources d'énergie renouvelables.

Il existe trois principales méthodes pour créer de l'énergie:

I.2.2.2 Les centrales hydroélectriques: qui utilisent l'énergie produite par une chute d'eau (barrages hydroélectriques).

- Il s'agit de capter la force motrice de l'eau pour produire de l'électricité.
- L'eau accumulée dans les barrages ou dérivée par les prises d'eau constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice.

L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie cinétique puis en énergie mécanique.

Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

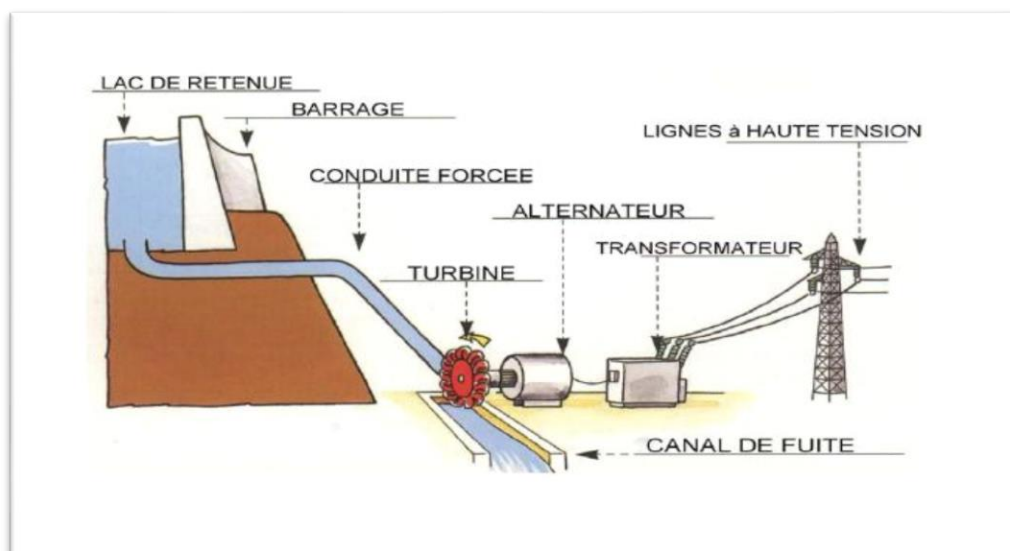


Figure I.7 : Production de l'électricité par la force motrice de l'eau

I.2.2.3 L'énergie des marées: qui est utilisée dans les centrales marémotrices.

L'énergie marémotrice est issue des mouvements de l'eau créés par les marées.

Le principe de fonctionnement d'une usine marémotrice est connu ; c'est une usine hydroélectrique comprenant un barrage séparant la mer de deux ou plusieurs bassins entre lesquels on crée une différence de niveau des eaux utilisée pour mouvoir une ou des turbines générant de l'électricité.

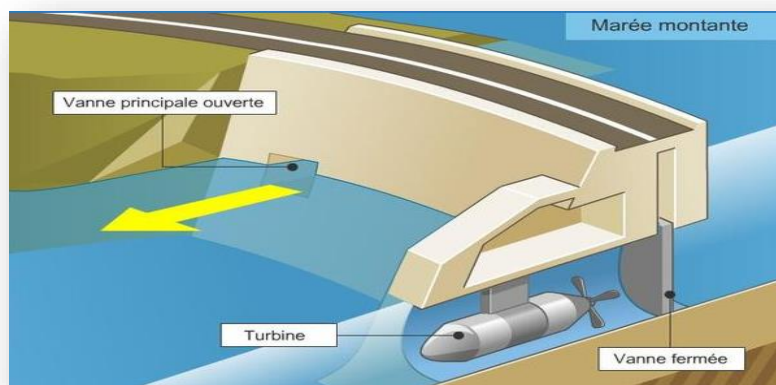


Figure I.8 : Production de l'électricité par les barrages et les prises d'eau

I.2.2.4 Les hydroliennes: qui sont placées sous l'eau et utilisent la force des courants marins.

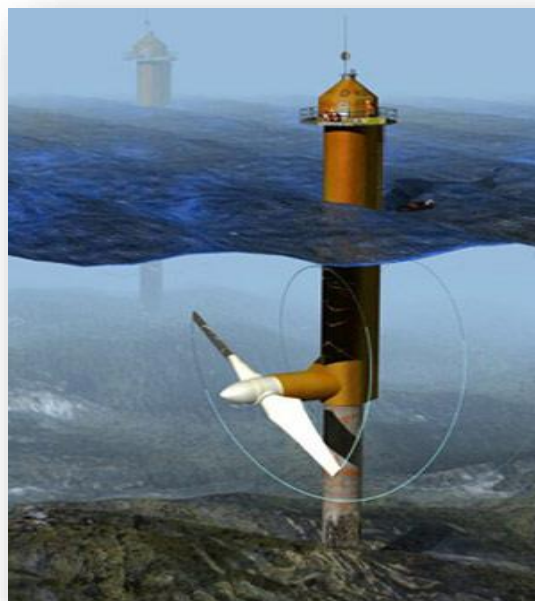


Figure I.9 : l'hydrolienne

Une hydrolienne fonctionne comme une éolienne terrestre, elle utilise la force du courant (énergie cinétique) pour faire tourner une pale, entraînant une turbine qui actionnera un alternateur qui convertira l'énergie mécanique de l'hélice en énergie électrique qui sera transportée juste qu'à terre pour son utilisation.

I.2.3 L'énergie de la biomasse :

I.2.3.1 Définition :

La biomasse est un combustible varié. Au sens large, elle comprend « l'ensemble des êtres vivants, animaux ou végétaux, ainsi que leurs productions, sous-produits ou déchets ».

La biomasse forme les différents écosystèmes de la planète et participe à leurs équilibres naturels. Elle a d'abord été cultivée et élevée par l'homme pour son alimentation, mais elle fournit également des matériaux de construction et est utilisée comme matière première pour certains procédés industriels et pour la production d'énergie, on parle alors de bioénergie [2].

La biomasse (matière végétale) est une source d'énergie renouvelable. Grâce au processus de photosynthèse, les plantes captent l'énergie du soleil. Quand les plantes sont brûlées, elles libèrent l'énergie du soleil qu'elles contiennent. De cette façon, la biomasse fonctionne comme une sorte de stock naturel de l'énergie solaire. Tant que la biomasse est produite de manière durable et que l'utilisation n'excède pas l'exploitation, le stock est inépuisable.

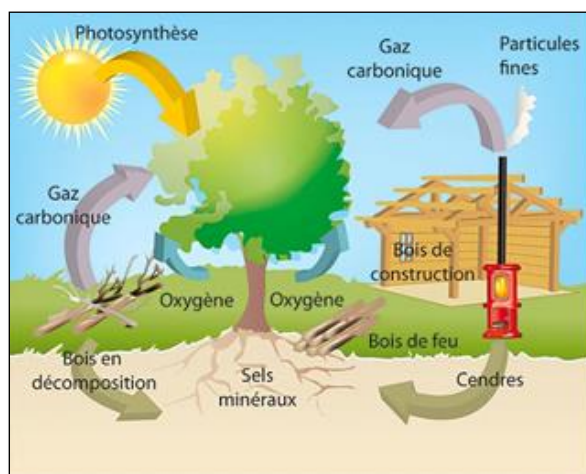


Figure I.10 : L'énergie de la biomasse

I.2.3.2 Les sources de la biomasse :

La biomasse est la source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale par exemple :

- Eaux usées
- Résidus agricoles et de cultures
- Cultures et résidus forestiers
- Résidus d'animaux



Figure I.11 : Les différentes sources de la biomasse

I.2.3.3 Les avantages de la biomasse :

- Le plus grand avantage de l'énergie de la biomasse, c'est qu'elle est renouvelable.
- En effet, en utilisant la biomasse, on élimine et on revalorise nombre de déchets organiques.
- On réduit la pollution en évitant la destruction pure et simple des déchets tout en produisant de l'énergie.

- La biomasse, utilisée à une échelle raisonnable, est une énergie illimitée et qui ne pollue pas.

I.2.3.4 Les inconvénients :

- L'inconvénient majeur de la biomasse est que le bois devient surexploité par les industriels: cela entraîne des déforestations et à des effets nocifs sur la biodiversité.
- La revalorisation des déchets est également trop utilisée. En effet, brûler des déchets n'est pas aussi efficace que faire brûler du charbon...
- Le biocarburant est toujours moins utilisé que l'essence.
- Le biocarburant coûte également plus cher.
- Les coûts de transport et de mobilisation seront trop élevés [2].

I.2.4 L'énergie géothermique :

I.2.4.1 Définition :

Le mot géothermie est composé de deux parties:

Géo: qui veut dire Terre et **Thermie :** qui veut dire chaleur.

'Géothermie' un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter.

L'énergie géothermique est la chaleur qui se trouve **sous la surface de la Terre.**

L'origine de cette chaleur est double : dans une petite mesure, elle vient du **soleil** qui réchauffe la surface de la terre, mais principalement, c'est **le magma**, qui se situe au cœur de la planète, qui chauffe la croûte terrestre [3].

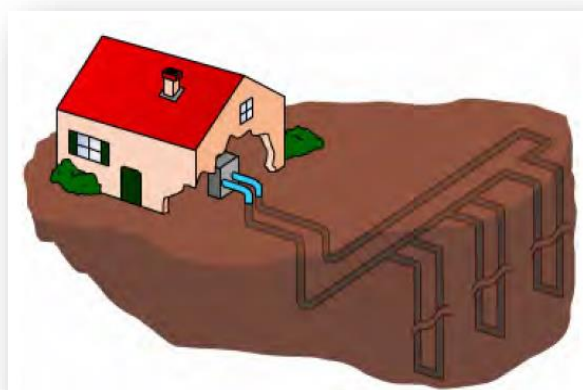


Figure I.12 :L'énergie géothermique

I.2.4.2 Types de l'énergie géothermique :

Sur Terre, le sol est chauffé par le soleil et le sous-sol par le magma, au cœur de la terre. Cette chaleur se traduit en quatre types de géothermie : la géothermie de très basse énergie la géothermie de basse énergie, géothermie moyenne et la géothermie haute énergie.

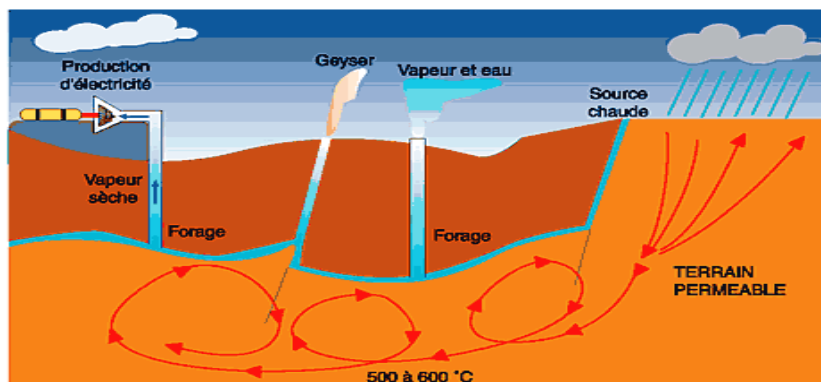


Figure I.13 : La production de l'énergie géothermique [3]

- La géothermie de très basse énergie (de surface) :

Dans ce type de production, la chaleur ne provient pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie. Il suffit de creuser jusqu'à maximum 80 mètres pour aller la chercher. La température reste inférieure à 30°C.

- La géothermie à basse énergie :

Les ressources géothermiques de basse énergie se trouvent à 1000 mètres de profondeur, dans des bassins souterrains de très grande dimension et présents à de nombreux endroits du globe. la température est entre 30° et 50°C

- La géothermie moyenne :

Exploite la chaleur de gisements d'eau qui se trouvent à des centaines de mètres de profondeur, parfois jusqu'à 2000 mètres. L'eau souterraine atteint alors les 50°C.

- La géothermie à haute énergie (profonde) :

Utilise de l'eau chaude présente à une grande profondeur. À certains endroits, cette eau chaude remonte naturellement à la surface. Elle est alors utilisée pour alimenter des sources thermales, chauffer des maisons ou même produire de l'électricité.

La température est très haute : de 150 à 250°C. Et il s'agit ici de creuser particulièrement loin, sur plusieurs kilomètres de profondeur.

I.2.4.3 Le principe de la géothermie :

On transforme l'énergie géothermique avec de l'eau :

- soit on utilise de l'eau froide que l'on chauffe en l'envoyant sous terre,
- soit on récupère l'eau naturellement chaude dans le sous-sol.

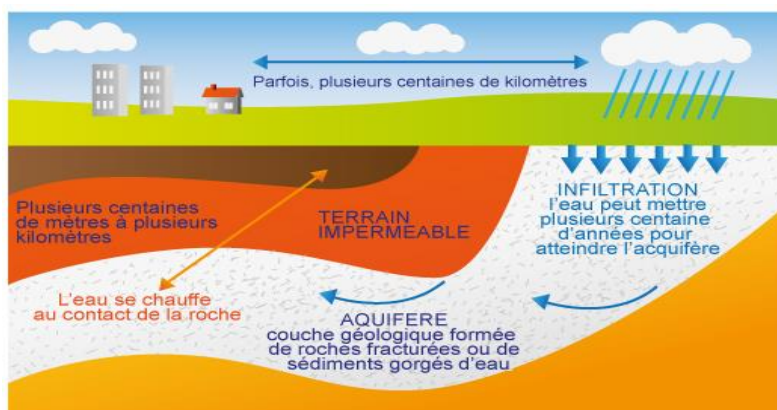


Figure I.14 : Fonctionnement de l'énergie géothermique

I.2.5 L'énergie Solaire :

Le soleil est une étoile, située à environ 150 millions Km de la terre. Le soleil a un diamètre de 1 399 000 Km, soit plus de 100 fois notre planète.

Il est composé d'hydrogène et d'hélium. La terre décrit autour du soleil dans un plan dit "plan de l'écliptique", la terre tourne sur elle-même, selon un axe incliné de 23°27' sur le plan de l'écliptique [4].

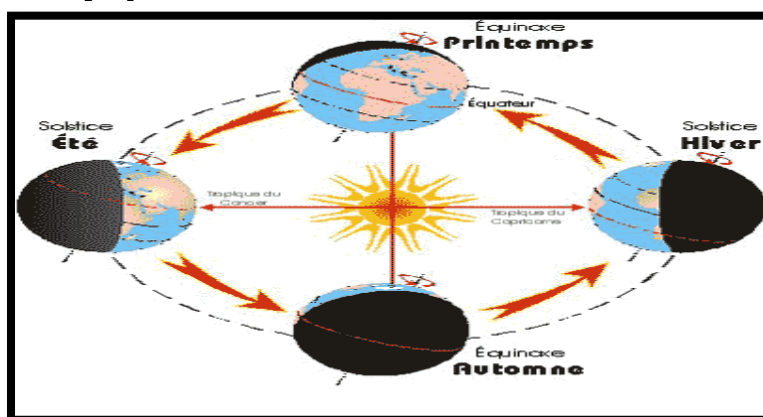


Figure I.15 : Mouvement de la terre.

I.2.5.1 Types d'énergie solaire :

Actuellement, il y a essentiellement trois façons de tirer parti de l'énergie solaire.

A. L'énergie solaire passive :

L'énergie solaire passive est la méthode la plus ancienne pour exploiter le rayonnement solaire. C'est la méthode déjà utilisée par les cultures anciennes comme c'est expliqué dans l'histoire de l'énergie solaire dans ce site.

Ce système consiste à exploiter le rayonnement solaire sans l'utilisation d'un dispositif ou d'un dispositif intermédiaire, selon le lieu, l'agencement et l'orientation des bâtiments, en utilisant les propriétés des matériaux et des éléments architecturaux de celui-ci correctement: les isolats, le type de couvertures, les protections, etc. L'application de critères d'architecture bioclimatique peut réduire considérablement le besoin de climatiser les bâtiments et de les éclairer.

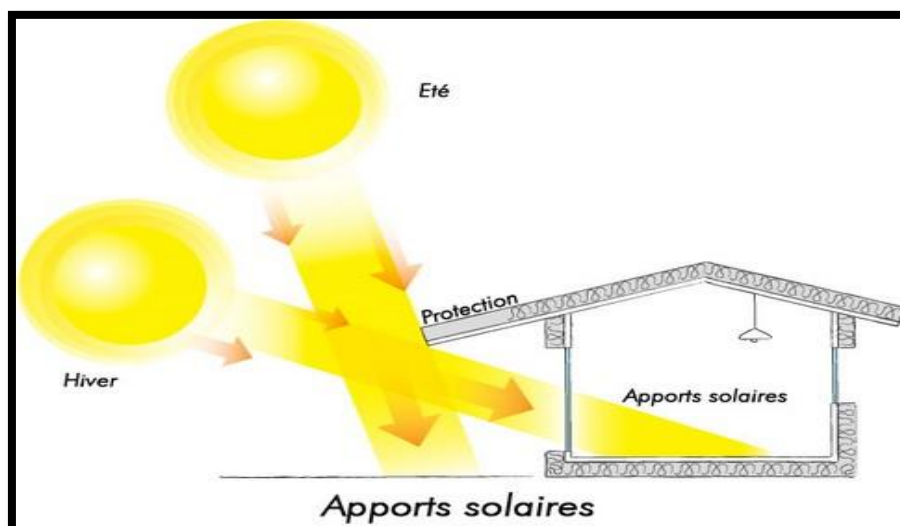


Figure I.16 : Energie solaire passive.

B. L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque tire parti de l'effet photovoltaïque pour générer un courant électrique.

Ce courant qui est produite par des panneaux solaires est un courant continu, qui correctement traitée (convertant lui en courant alternatif), peut être utilisé pour fournir de l'électricité aux systèmes autonomes ou peut être utilisé pour l'alimentation (vendre) directement à la réseau électrique [4].



Figure I.17 : Energie solaire photovoltaïque.

C. L'énergie solaire thermique :

Une autre façon très habituelle et économique de l'utiliser est l'énergie solaire thermique. Son fonctionnement est basé sur l'utilisation du rayonnement solaire pour chauffer l'eau à travers des capteurs solaires. Les capteurs solaires augmentent la température du fluide en augmentant son énergie interne. De cette manière, il est facile de transporter l'énergie thermique produite et de l'utiliser lorsque cela est

nécessaire : elle peut être utilisée pour obtenir de l'eau chaude sanitaire ou pour chauffer une maison.

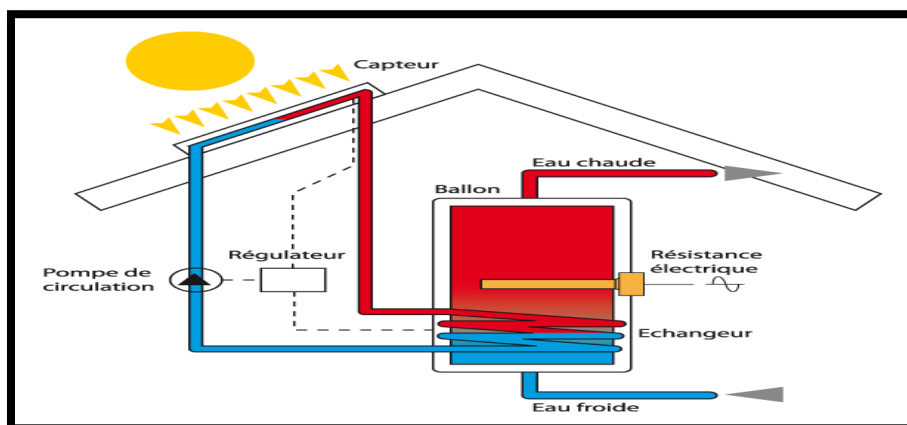


Figure I.18 : Energie solaire thermique.

I.2.5.2 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire parvient au niveau de la terre après avoir parcouru une distance moyenne 150×10^6 km, il est constitué de photons aux trajectoires à peu près parallèles, la puissance de ce flux est d'environ 1367 W/m^2 .

Ce flux dit constante solaire varie légèrement au cours de l'année suivant les variations de la distance terre- soleil ($\pm 3\%$).

Le rayonnement solaire est constitué des photons transportant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où

E_{ph} : représente la quantité d'énergie,

λ : la longueur d'onde,

h : la constante de Planck ($6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J.S}$)

c : la vitesse de la lumière.

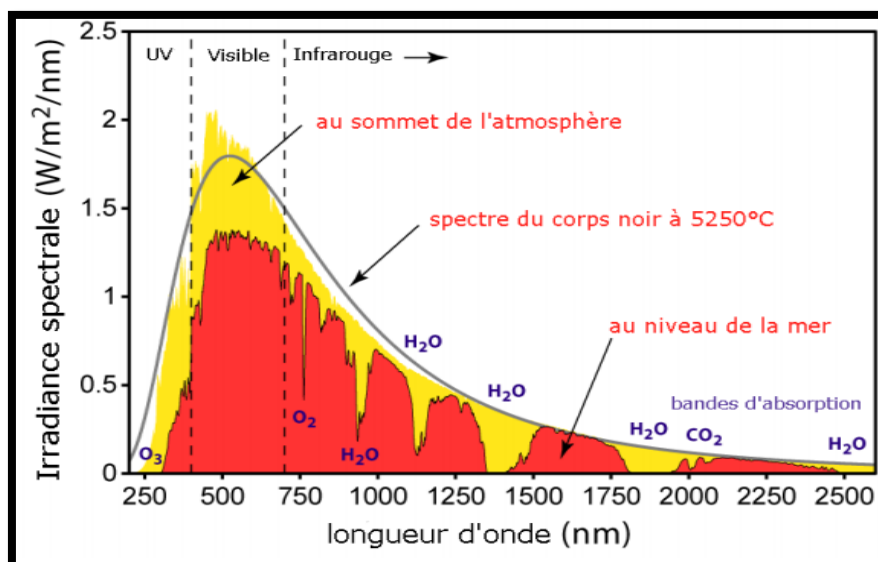


Figure I.19 : Spectre du rayonnement solaire.

A. Le rôle atmosphérique :

Cette énergie qui descend vers notre planète ne peut pas arriver sur la terre en intégralité, elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère.

En effet, l'atmosphère contient une majorité d'azote, d'oxygène, d'argon, de la vapeur d'eau et la couche d'ozone dont le rôle est de filtrer les ultra-violets sans oublier les poussières et les nuages [4].

- **Le rayonnement direct :**

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux.

- **Le rayonnement diffus :**

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc.

Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

- **Le rayonnement réfléchi :**

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante par exemple : la neige ; cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

Le rayonnement global est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure suivante :

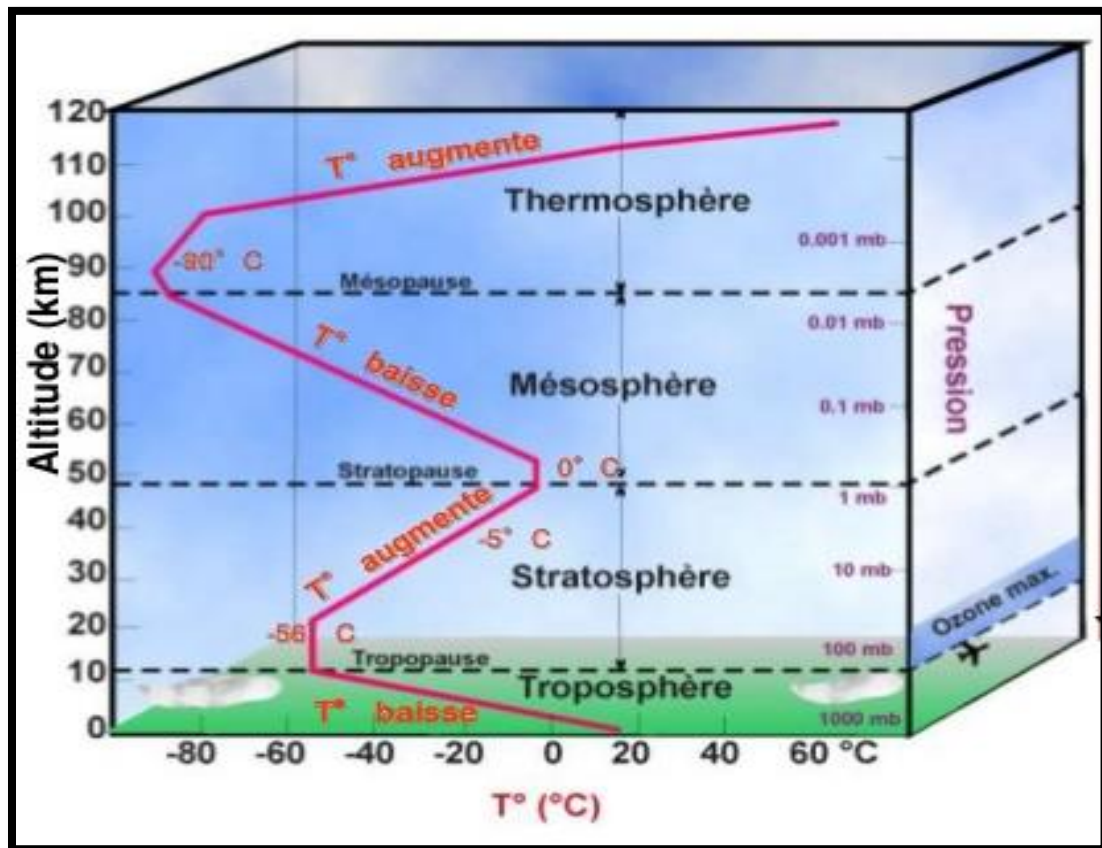


Figure I.20 : Structure et compositions de l'atmosphère.

B. Différentes composantes du rayonnement solaire :

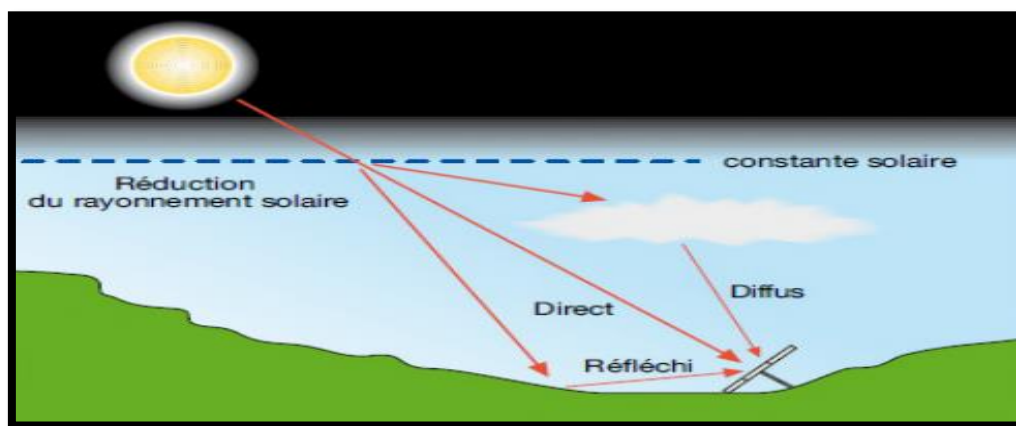


Figure I.21 : Composant du rayonnement solaire.

C. Rayonnement solaire et son utilisation :

Elle est majeure pour la vie sur terre. Le rayonnement solaire est en effet :

- source d'énergie solaire, énergie rayonnante qui rend possible la vie sur Terre d'une part par apport d'énergie thermique (chaleur, qui permet la présence d'eau à l'état liquide et de vapeur) et d'autre part en tant que source d'énergie lumineuse (lumière) ;

- nécessaire à la photosynthèse (utilisée par les végétaux, mais aussi par les lichens et certains micro-organismes). La lumière solaire est ainsi à l'origine de la quasi-totalité des réseaux trophiques (et de l'essentiel du carbone fossile) ;
- La chaleur apportée par le soleil a un effet synergique qui renforce l'effet désinfectant des UV solaires, mais quand le ciel est lumineux mais couvert, cet effet disparaît.

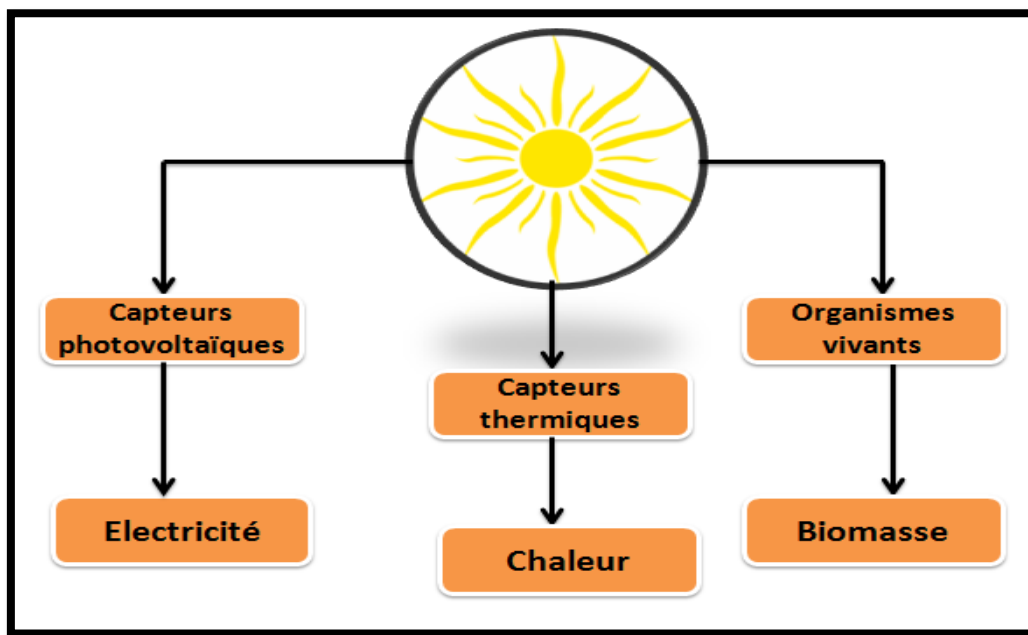


Figure I.22 : Utilisation du rayonnement solaire.

I.2.5.3 Situation de l'Algérie :

L'énergie solaire participe pour une très faible part dans le bilan énergétique national, soit seulement 0,02% de la consommation nationale d'électricité (5 GWH). Le pays est qualifié de très en retard en matière d'investissement dans le domaine des énergies renouvelables. Pourtant, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde

Lors d'un séminaire organisé à Alger, par la Chambre algéro-allemande de l'industrie et du commerce, l'intention de concrétiser le vœu algérien a été clairement affichée par les Allemands. «Vu qu'à l'horizon 2010, environ 5% de l'électricité en Algérie sera produite par l'énergie solaire ».le projet consiste à ramener le taux de l'énergie renouvelable à 6% d'ici à 2015 [5].

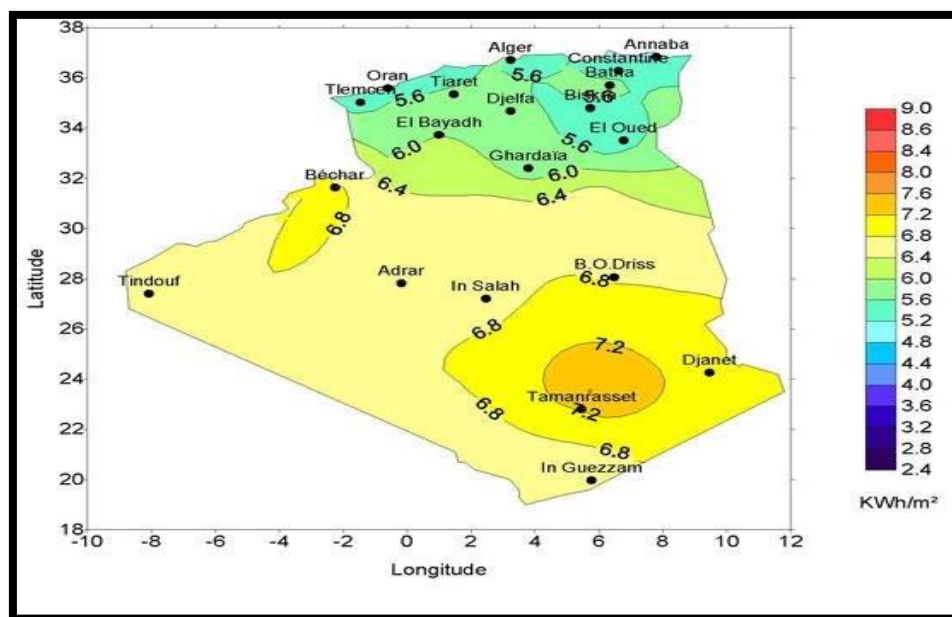


Figure I.23 : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle.

I.2.5.4 Potentiel solaire en Algérie :

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevés dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique, le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [5].

Région	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (H/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.2 : Potentiel solaire en Algérie.

L'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA et l'un des plus importants au Monde :

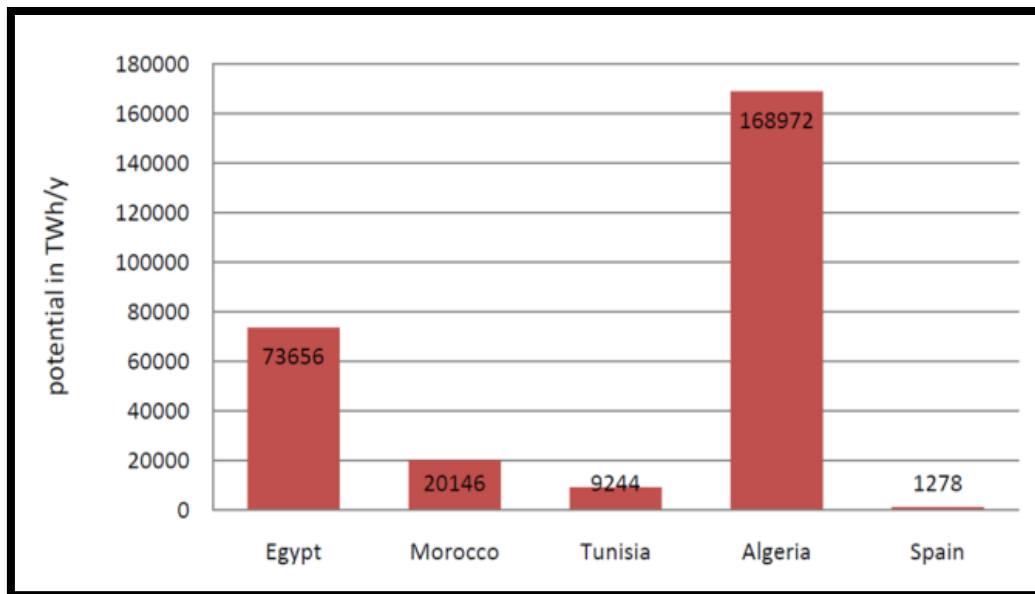


Figure I.24 : Potentiel solaire économique des pays les plus actifs.

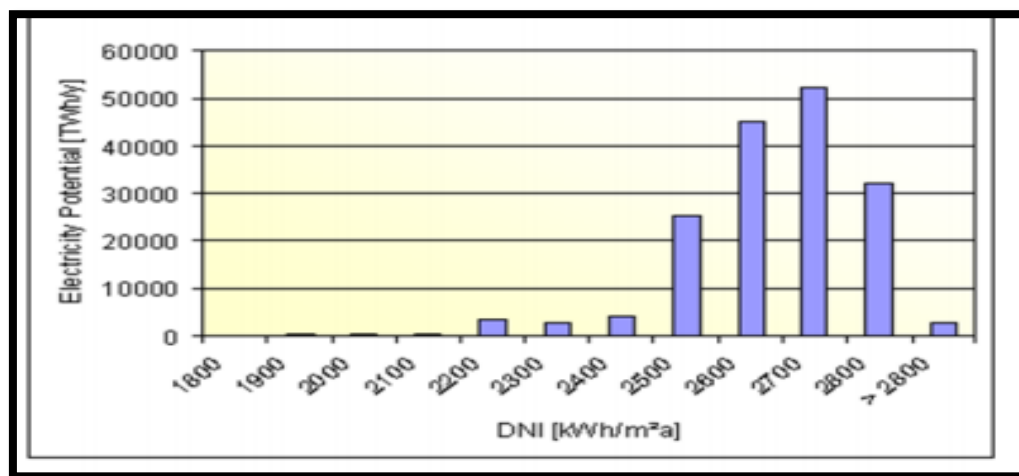


Figure I.25 : Potentiel solaire technique en Algérie.

Cette figure montre l'importance du potentiel sur le coût du kWh produit :

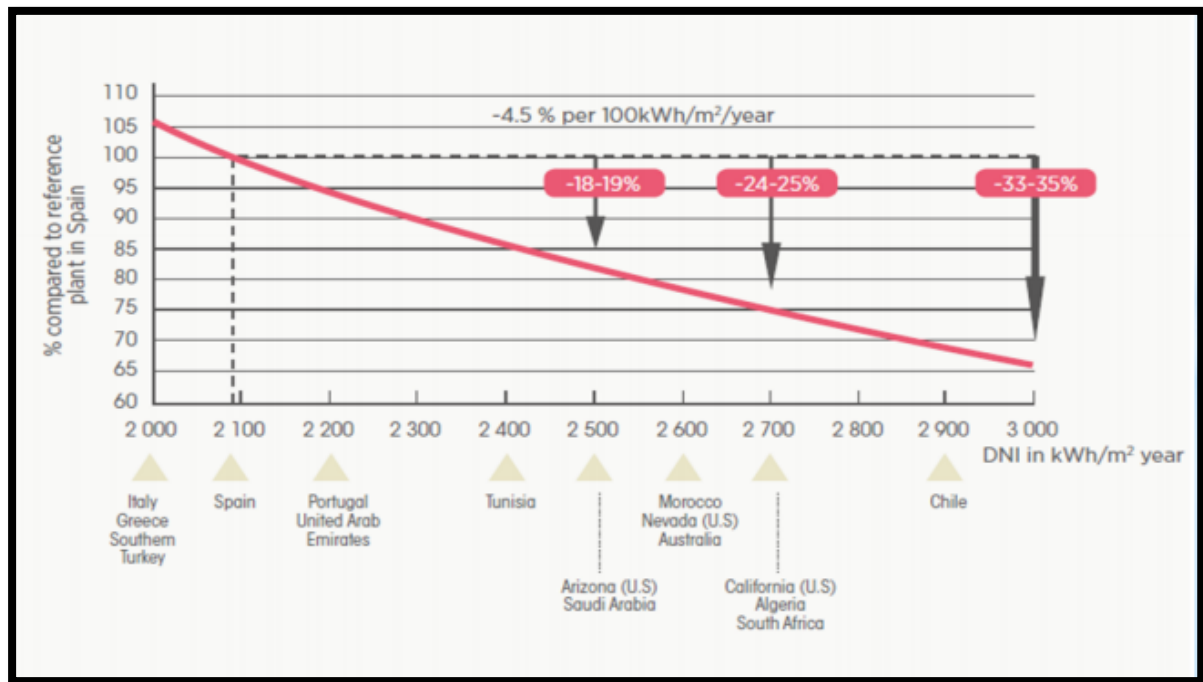


Figure I.26 : Le cout du potentiel solaire dans le monde.

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée des différentes sources d'énergies renouvelables qui existent, tel que l'énergie éolienne, hydraulique, biomasse, géothermique, et solaire,...etc. L'utilisation des sources d'énergie renouvelables semble être une solution adéquate pour protéger l'environnement et permettre à l'homme de trouver une alternative aux autres sources d'énergies.

Chapitre II:

Energie solaire photovoltaïque

II.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules. Ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule [6].

De nos jours et selon le besoin, l'énergie électrique produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [7].

II.2 La cellule photovoltaïque :

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif [8].

II.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (VOC). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de courtcircuit (ICC) [9].

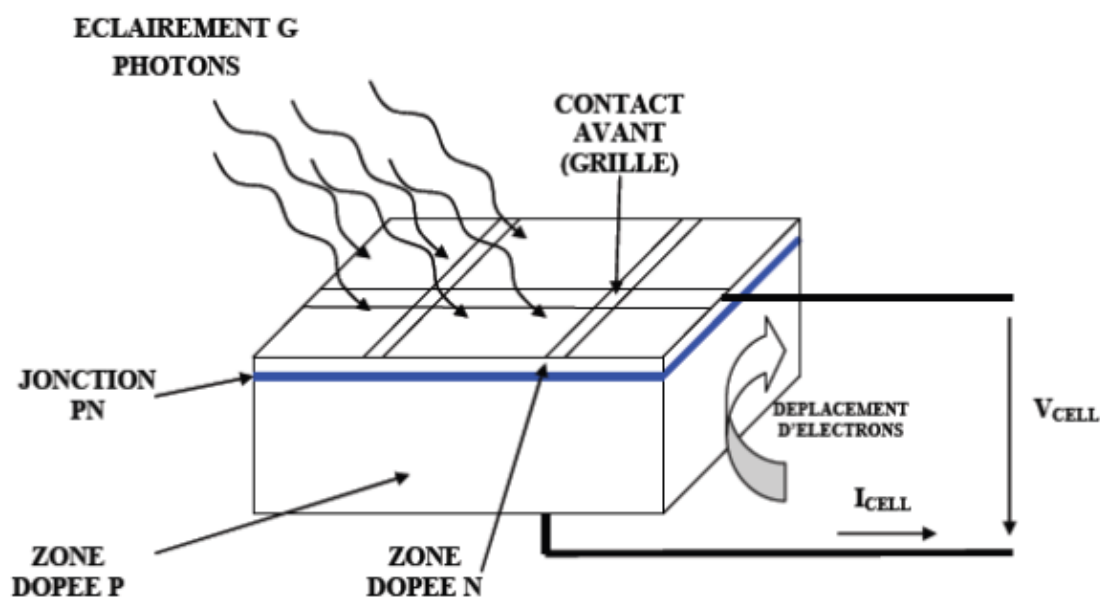


Figure II.1: Structure schématique d'une cellule solaire.

II.4 Différentes structures des cellules PV :

On utilise différents matériaux et structures pour améliorer les performances des cellules PV et augmenter le rendement.

On distingue plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures : les cellules solaires à couche mince, les cellules solaires organiques et les cellules solaires au silicium. Nous présenterons uniquement ces dernières citées, car étant les plus répandues [8].

II.4.1 Les cellules solaires au silicium :

Le silicium est le matériau de base des photopiles. C'est le deuxième élément en termes d'abondance sur notre planète (après l'oxygène), mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent).

Il existe trois catégories principales de photopile au silicium :

- **Le silicium monocristallin** : il est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient disponibles. Leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère. Il présente un taux de rendement excellent (12 – 16% allant jusqu'à 24 % en laboratoire). Le terme « cristallin » implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation dans les arrangements ordonnés des atomes [10] ; [11] ;
- **Le silicium polycristallin** : il est composé de petits grains de silicium cristallin. Il a un coût de production moins élevé. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin s'étend de 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [11] ;

- **Le silicium amorphe** : les cellules amorphes sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est entre 8 – 10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [10] ; [11].



Figure II.2: Types de cellules solaires.

II.5 Modèle et circuit équivalent d'une cellule PV :

Une cellule PV peut être modélisée par un schéma électrique équivalent qui reproduit son comportement quand elle est éclairée par un faisceau lumineux.

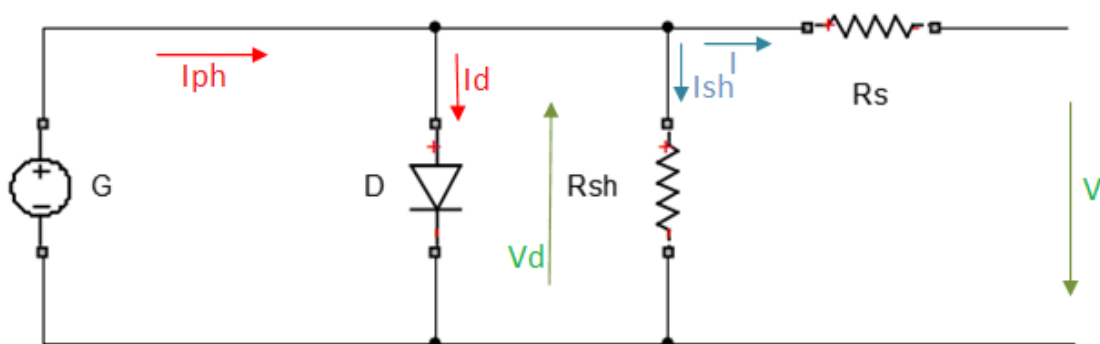


Figure II.3: Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire

En appliquons la loi de Kirchhoff aux nœuds :

$$I_{cel} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II.1)$$

- **Le générateur du courant (I_{ph})** : il délivre le courant (I_{ph}) correspondant au courant photo-généré.
- **La diode** : modélise la jonction P-N, avec I_d : courant électrique à travers la diode.

- **La résistance série R_s** : modélise les pertes résistives au sein de la photopile. Elle est liée à l'impédance des électrodes et du matériau ; il en résulte que la tension V aux bornes de la cellule est différente de la tension V_j aux bornes de la jonction pn. Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- **La résistance parallèle R_p (résistance shunt R_{sh})** : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones n et p de la jonction ; il en résulte qu'une partie du courant (I_{ph}) sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible [12].

L'expérience montre qu'avec l'obscurité ; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s .

$$V_{th} = \frac{KT}{q} \quad (II.2)$$

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

K : la constante de Boltzmann (1.38066×10^{-23} J/K = 8.61400×10^{-5} eV/K).

T : la température absolue en Kelvin (K)

q : la charge absolue d'un électron en coulomb (1.60281×10^{-19} C).

Sous éclaircissement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté. Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, les effets résistifs et les fuites vers les bords d'autres sont tenus en compte. L'équation de la caractéristique I-V devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}} \right)} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (II.3)$$

Certains auteurs utilisent la conductance shunt ($G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$) pour écrire l'équation

(II.1)

sous la forme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\left(\frac{V+IR_s}{nV_{th}} \right)} - 1 \right) - G_{sh}(V + IR_s) \quad (II.4)$$

I_s : le courant de saturation en Ampère (A)

n : le facteur de qualité de la diode ; sans dimension

V_{th} : le potentiel thermique en Volt (V)

I_{ph} : photo-courant généré (proportionnel au rayonnement incident) [12].

II.6 Caractéristiques électriques de la cellule photovoltaïque :

II.6. 1 Caractéristique courant - tension (I-V)

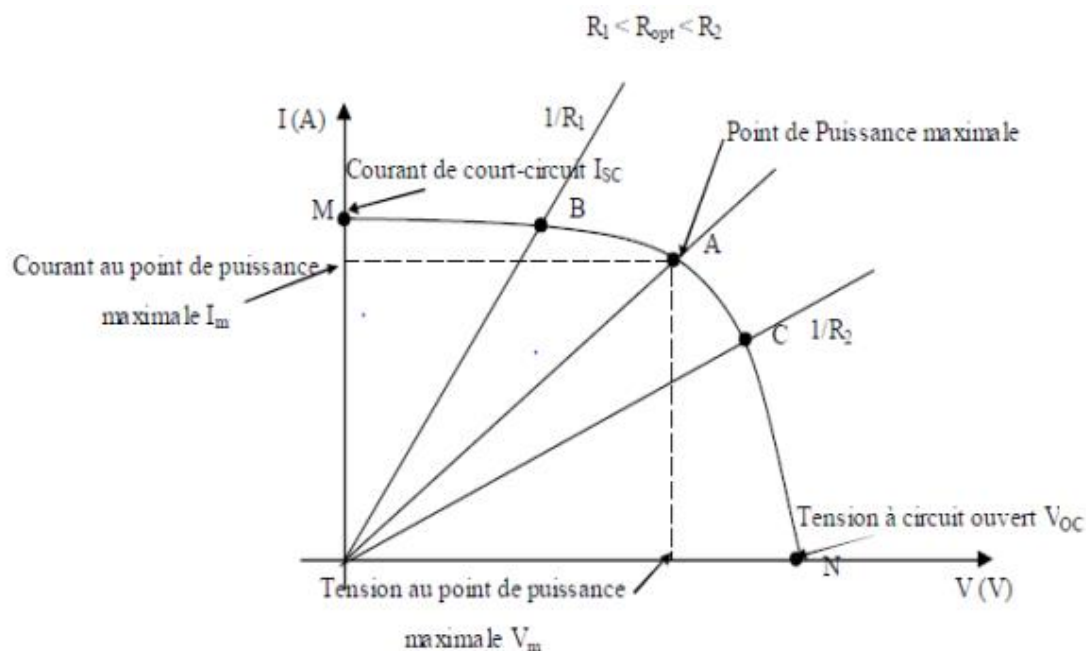


Figure II.4: Caractéristique courant - tension (I-V)

La Figure (II.4) montre la caractéristique courant - tension pour une cellule photovoltaïque. Ainsi, si une résistance variable R est connectée aux bornes de la cellule PV, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule avec la courbe de la charge.

Pour une charge résistive, la courbe de charge est une droite avec la pente $1/R$. Par conséquent, si la résistance R est petite, le point de fonctionnement est situé dans la région MB de la courbe. Le courant I varie peu en fonction de la tension (il est presque égal au courant de court-circuit). La cellule se comporte comme un générateur de courant. D'autre part, si la résistance R est grande, la cellule fonctionne dans la région CN. Dans cette zone, la tension de la cellule varie peu en fonction du courant I : la cellule se comporte comme une source de tension qui est presque égale à la tension de fonctionnement à vide. Dans la région BC sur la courbe, la cellule PV ne peut être caractérisée ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le point pour lequel la puissance fournie est maximale dans des conditions fixées d'éclairement et de température [13].

II.6.2 Caractéristique puissance - tension (P-V) :

La caractéristique puissance-tension (P-V) d'une cellule PV est obtenue à partir de sa caractéristique courant-tension (I-V).

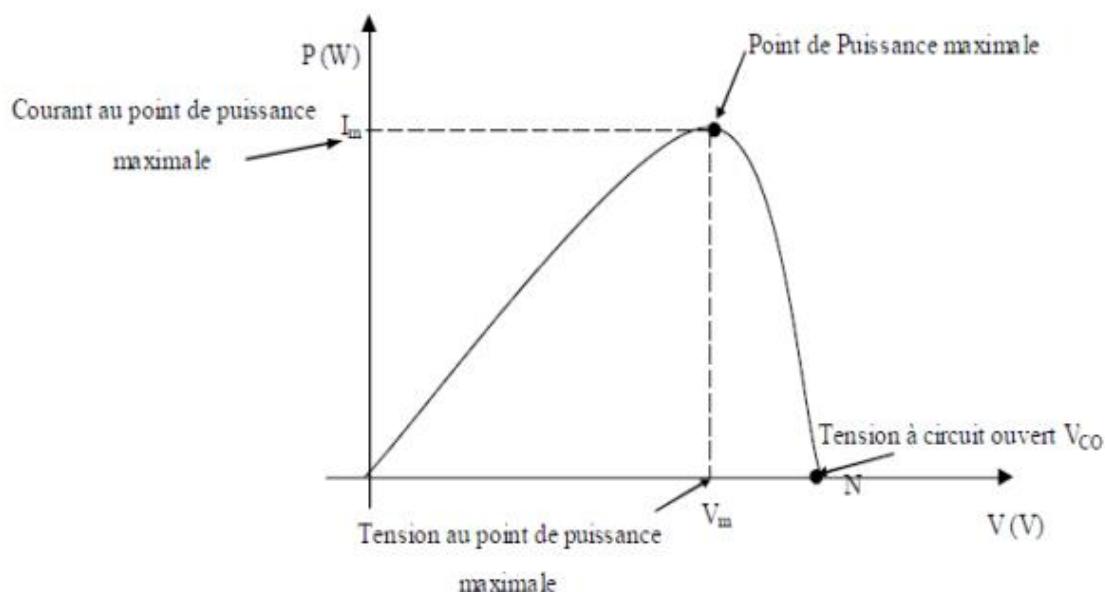


Figure II.5: Caractéristique puissance - tension (P-V)

La puissance générée par une cellule PV est donnée par :

$$P = V \cdot I \quad (II.5)$$

La puissance maximale P_m est obtenue lorsque :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (II.6)$$

On désigne par I_m , V_m respectivement le courant et la tension avec lesquels la puissance produite est maximale.

II.6.3 Paramètres externes :

La cellule solaire photovoltaïque est caractérisée par plusieurs paramètres dont le rendement de conversion, la tension de court-circuit et de circuit ouvert, le courant de court-circuit et le facteur de forme (FF). Ces paramètres sont extraits des caractéristiques courant-tension qui permettent de comparer différentes cellules dans des conditions identiques. Ces paramètres sont définis comme suit [7] :

- **Courant de court-circuit I_{cc} :** Le courant de court-circuit est le courant le plus important que l'on puisse obtenir avec une cellule solaire. Il augmente généralement avec l'intensité d'illumination. I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension $V=0$. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} ($I_{cc} = I_{ph}$).
- **Tension à circuit-ouvert V_{co} :** La tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif PV. Elle dépend du type de cellule solaire et de l'éclairement et du type des matériaux de la couche active.

- **Facteur de forme** : Le facteur de forme d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule ; il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (II.7)$$

- **Le rendement de la cellule** : Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule P_m à la puissance lumineuse d'incident.

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (II.8)$$

S : surface de la cellule en m^2 .

E : l'ensoleillement en W/m^2

II.7 Association des cellules PV (le module PV) :

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées des agents extérieurs. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou champ solaire, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie) des appareils de contrôle et de mesure [8].

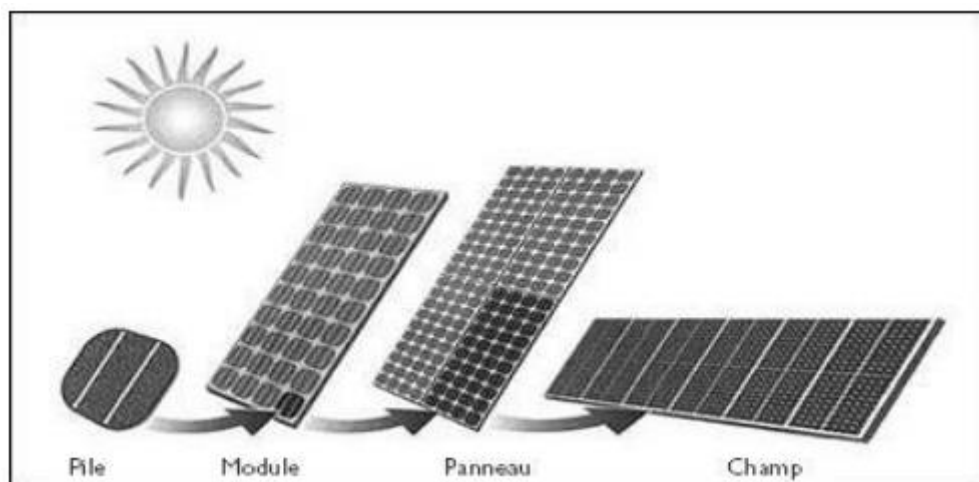


Figure II.6: Cellule, module, panneau, champ photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier.

La forme générale de la caractéristique $I(V)$ d'un module solaire ou photovoltaïque est identique à celle d'une cellule solaire élémentaire.

II.7.1 Association des cellules en série :

Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

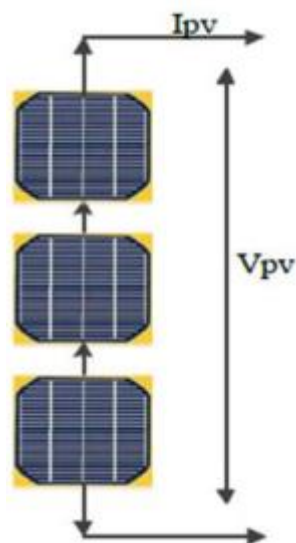


Figure II.7: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [14].

La figure qui suivra montre la caractéristique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'association en série (indice s) de n_s cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

$$V_{sco} = N_s \cdot V_{co} \quad (II.9)$$

$$I_{scc} = I_{cc} \quad (II.10)$$

V_{co} : la tension du circuit ouvert

$I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit

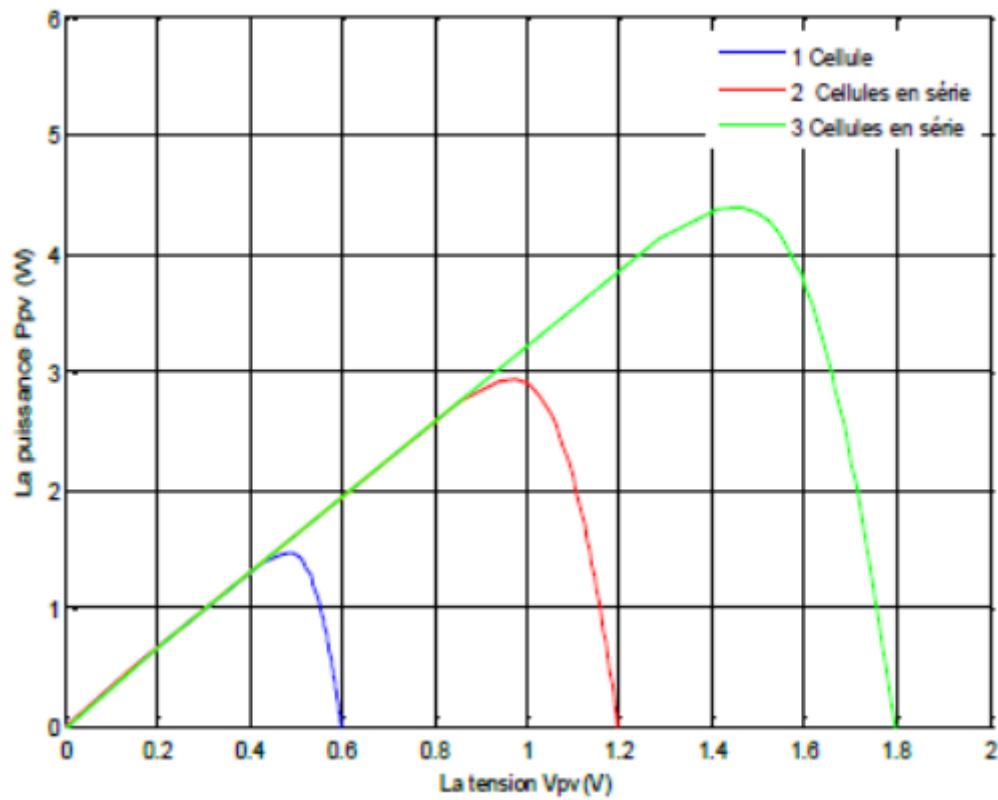


Figure II.8: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série

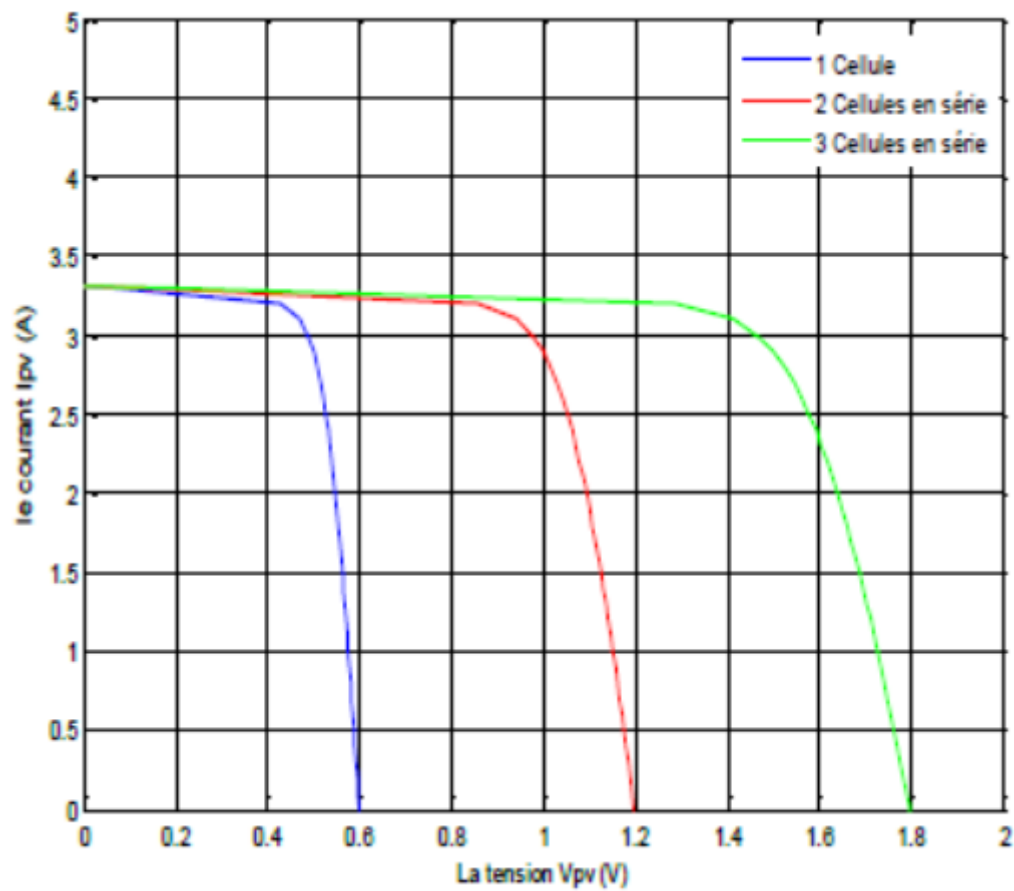


Figure II.9: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en série

II.7.2 Association des cellules en parallèle :

Une association parallèle de (NP) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [14].

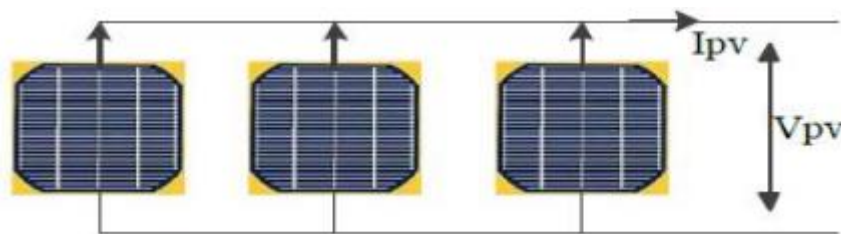


Figure II.10: Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle

La figure qui suivra montre la caractéristique résultante (I_{pcc} , V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques

$$(I_{cc}, V_{co}). I_{pcc} = N_p \cdot I_{cc} \quad (II.11)$$

$$V_{pco} = V_{co} \quad (II.12)$$

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert

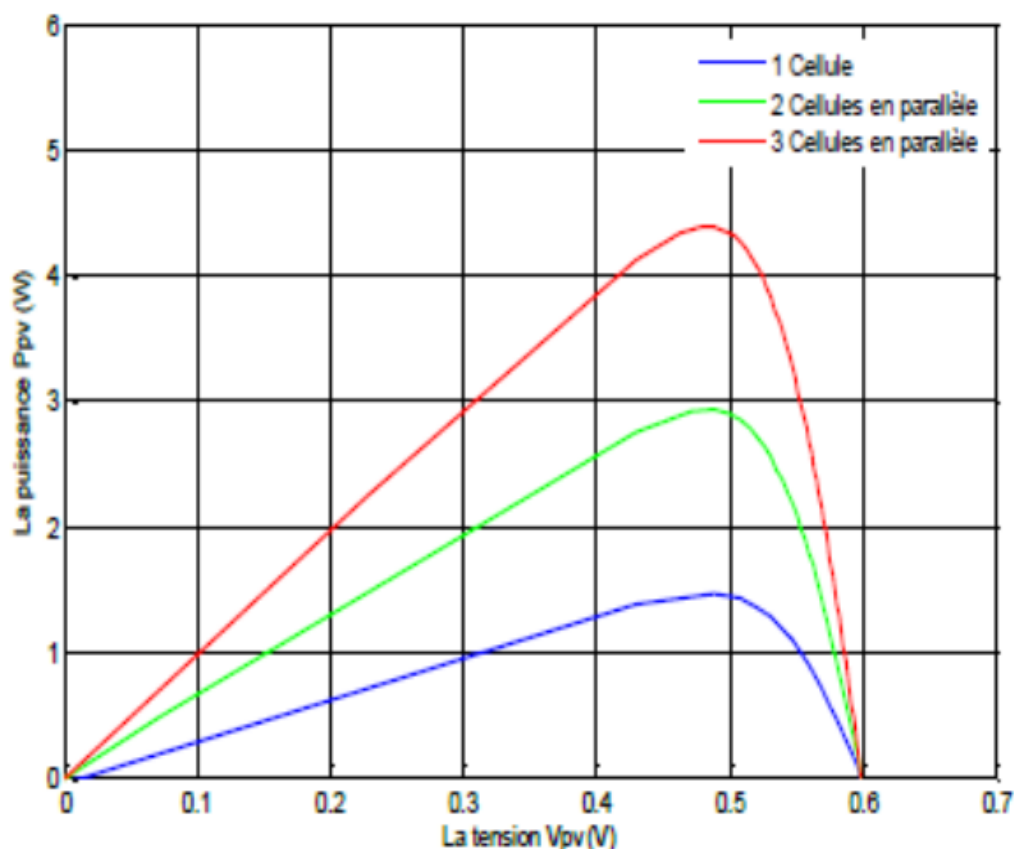


Figure II.11: Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle

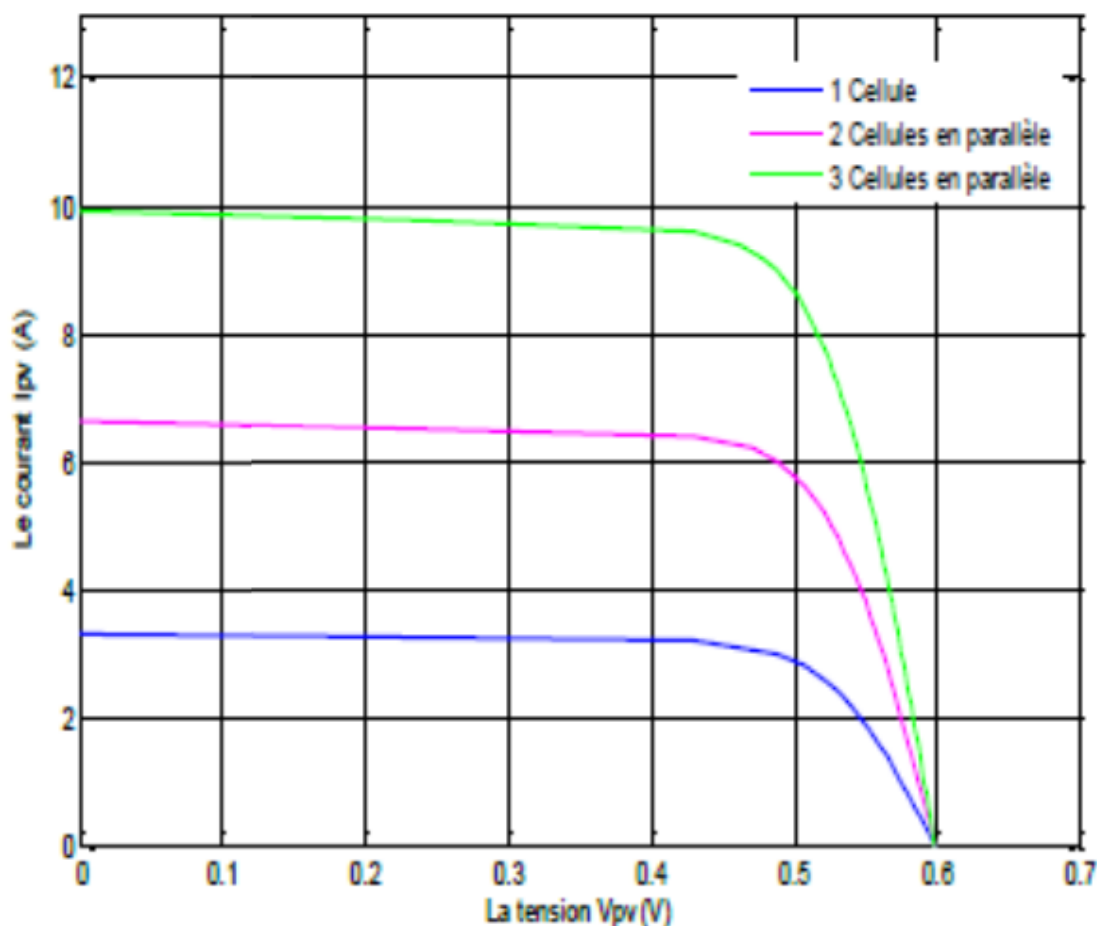


Figure II.12: Caractéristique I-V des cellules PV raccordées en parallèle

II.7.3 Association mixte des cellules :

On utilise généralement ce type d'association pour en tirer une tension importante puisque l'association en série des photopiles délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule. La caractéristique d'un groupement de deux modules solaires est représentée ci-dessous, ce qui peut être généralisé sur une gamme de N_s modules solaires en série. Ce genre de groupement augmente le courant.

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un GPV [15].

II.8 Différents systèmes photovoltaïques :

Les trois genres de systèmes PV que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau.

II.8.1 Systèmes autonomes :

Selon le besoin, les systèmes autonomes alimentent un ou plusieurs consommateurs situés dans des zones isolées du réseau électrique. Ils sont indépendants du réseau et dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. On peut classer ces systèmes en deux catégories :

- **Systèmes avec accumulateurs** : L'excédent de l'énergie produite est stocké dans des batteries. Le schéma synoptique de la figure suivante décrit ce système

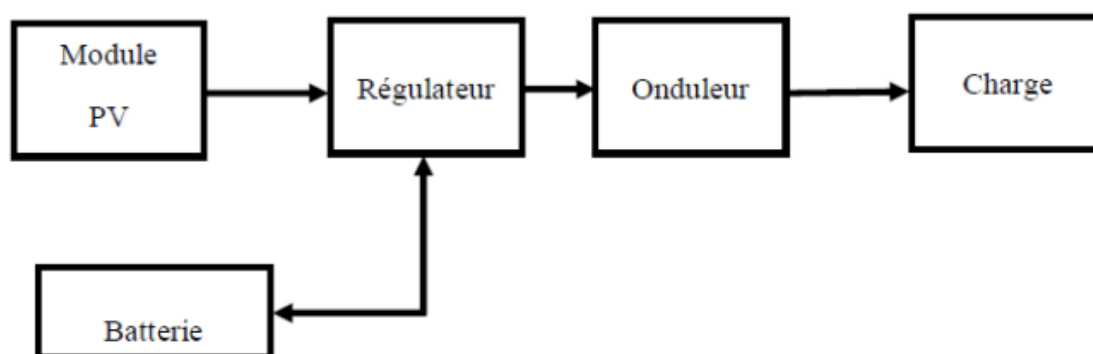


Figure II.13: Schéma synoptique d'un système PV autonome avec batterie

- **Système sans accumulateurs** : Dans ces systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique. Par exemples :
 - **Pompage** : stockage par réservoir d'eau,
 - **Réfrigération** : stockage de froid (stockage de glace ou eutectique),
 - **Électrolyse de l'eau** : stockage d'hydrogène [16] ; [17].

II.8.2 Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur PV combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible (module d'appoint), ou deux à la fois. S'il y a une combinaison entre deux énergies renouvelables ou plus, on dit jumelage.

Le module d'appoint peut être utilisé selon deux stratégies :

- Chargeur des batteries
- Alimentation directe de la charge et de charger les batteries.

Un tel système s'avère d'un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée, lorsqu'il n'y a pas assez de lumière solaire à certains moments de l'année [16].

II.8.3 Systèmes connectés au réseau :

Ces systèmes photovoltaïques convertissent l'électricité en courant alternatif (CA) et transfèrent leur surplus d'électricité au réseau auprès duquel ils s'approvisionnent pendant la nuit ou lorsque le rayonnement solaire est insuffisant. Dans ces systèmes on compte :

- **Systèmes photovoltaïques directement relié au réseau :** Le système ne peut fournir ou prélever de l'énergie qu'au réseau. La batterie n'est plus présente. Le schéma du système PV directement relié au réseau est donné par la figure suivante :

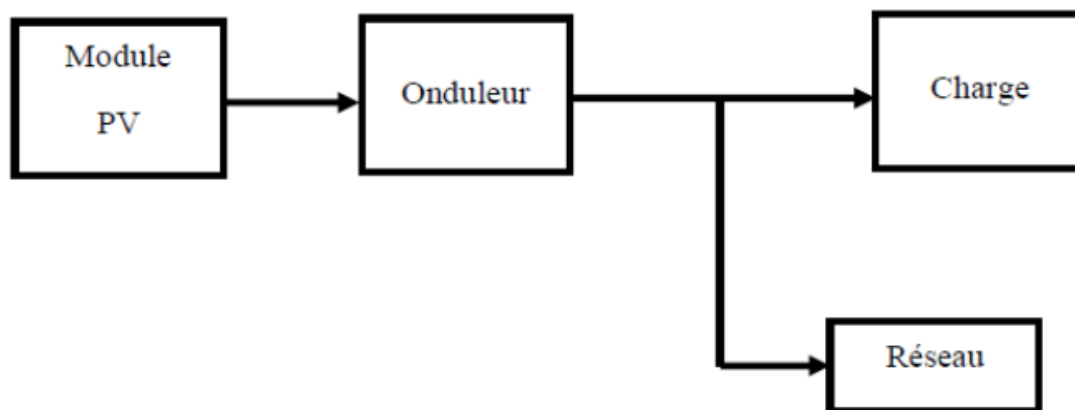


Figure II.14: Système photovoltaïque directement relié au réseau.

L'absence des batteries est un point positif, car celle-ci augmente le coût de système photovoltaïque. En plus elle doit être entretenue et changée après quelques années.

- **Systèmes photovoltaïques relié au réseau avec batterie :** Le système peut fournir de l'énergie au réseau et prélever l'énergie d'appoint nécessaire au réseau. Le schéma d'un système PV relié au réseau avec batterie est le suivant :

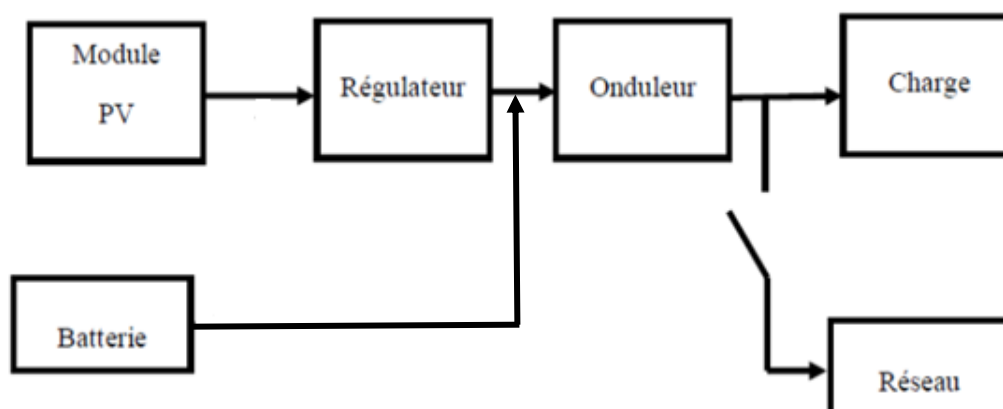


Figure II.15: Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie

L'énergie est fournie par le module PV à la charge, l'excédent est stocké dans les batteries, dans le cas de décharge ou de surcharge de la batterie, on utilisera le réseau pour prélever ou délivrer l'énergie [16].

II.9 Influence des paramètres de PV :

A fin de monter l'influence des paramètres de PV et a l'aide de MATLAB SIMULINK on a réalisé le Schéma de simulation suivant :

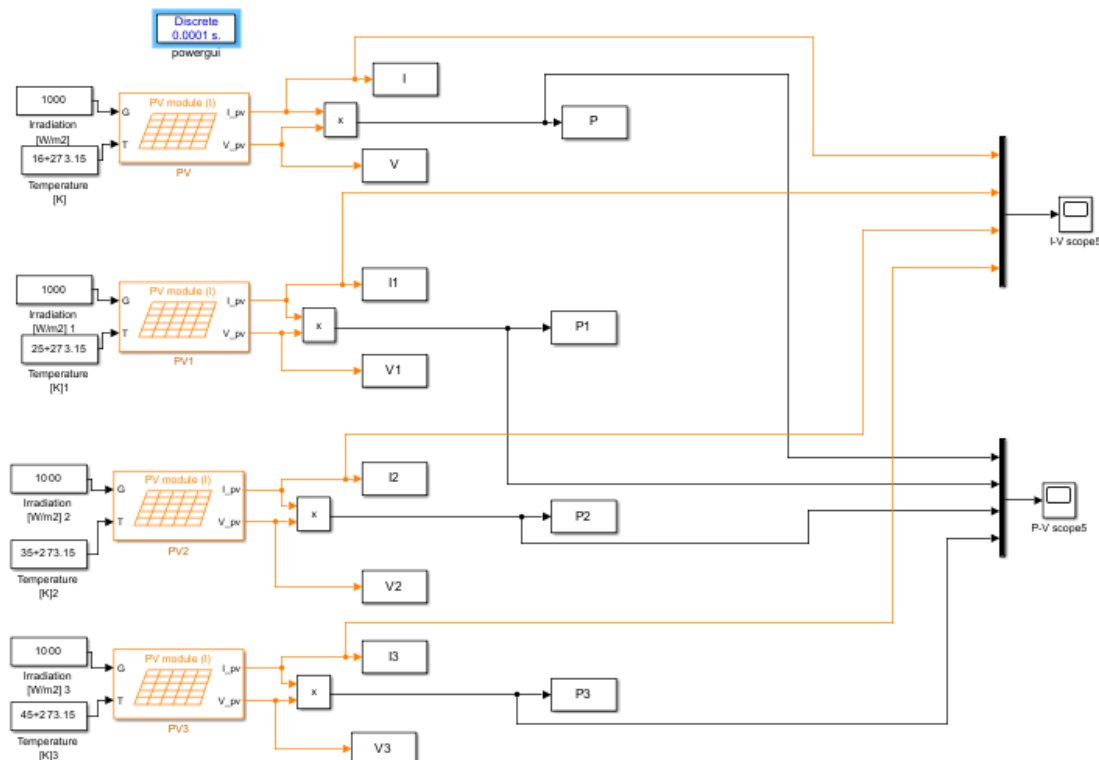


Figure II.16: l'influence des paramètres de PV.

II.9.1 Influence de l'éclairement :

Une baisse de l'éclairement provoque une diminution de la création de paires électron/trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'éclairement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_m et donc un décalage du point P_m du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $P(V)$, $I(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^\circ\text{C}$) et un ensoleillement variable.

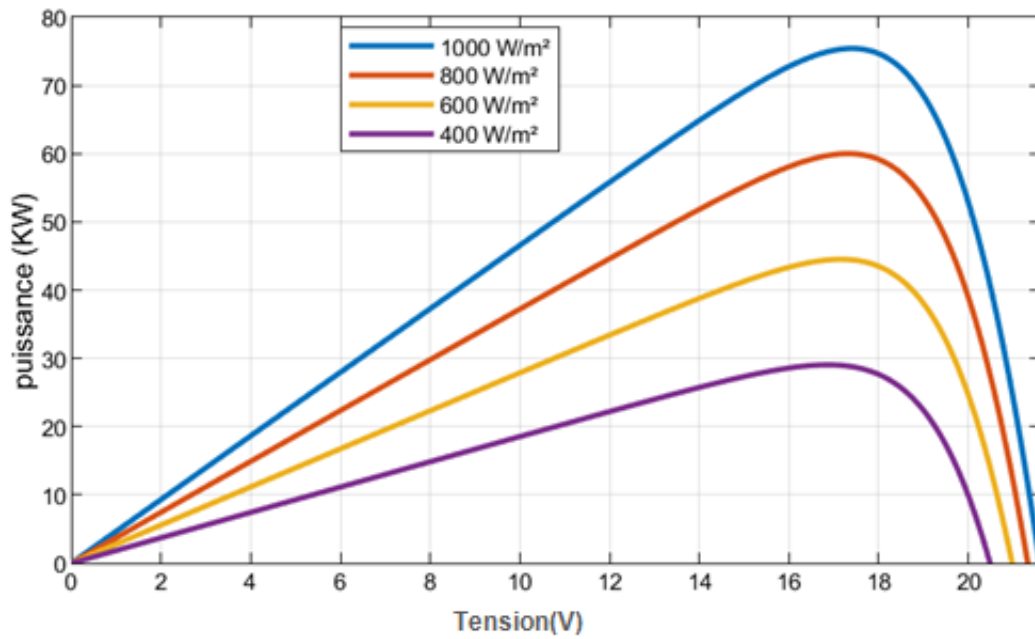


Figure II.17 : Courbes P(V) D'un panneau à divers ensoleillements à $T=298.15K(25^{\circ}C)$

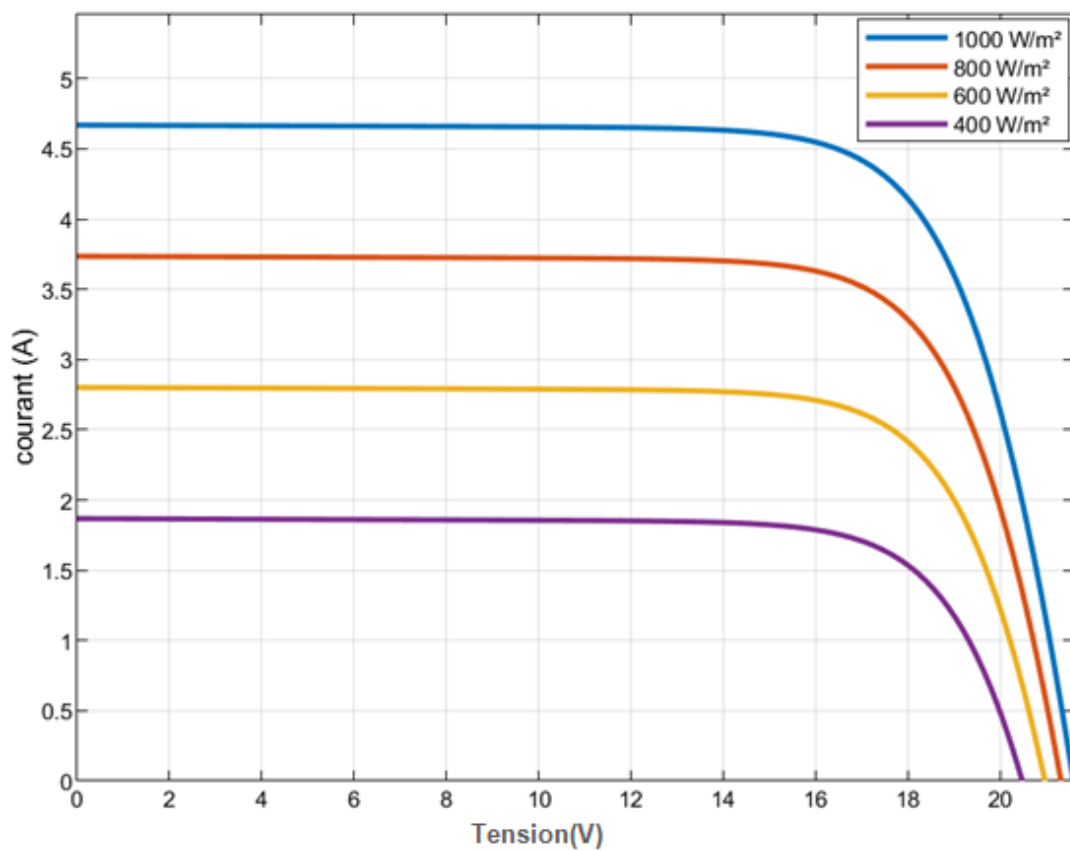


Figure II.18 : Courbes I (V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=298.15K(25^{\circ}C)$

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension

II.9.2 Influence de la température :

La figure (II.19) et (II.20) présentent respectivement des courbes $P(V)$ et $I(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante. Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C. Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 1000 W/m² la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement.

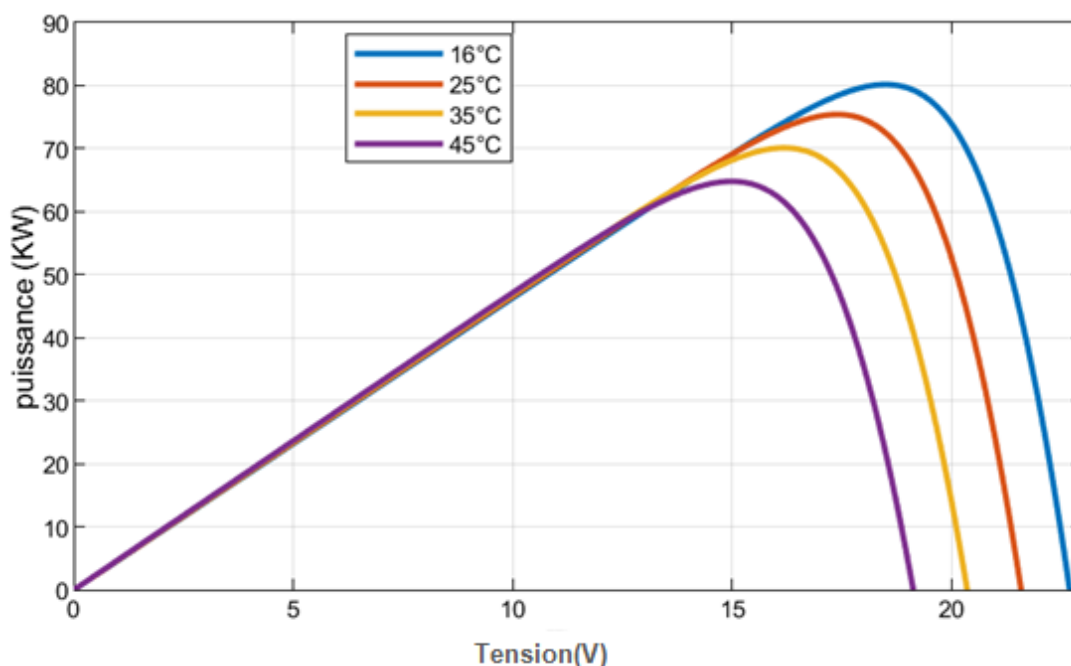


Figure II.19 : Courbes $P(V)$ d'un GPV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$

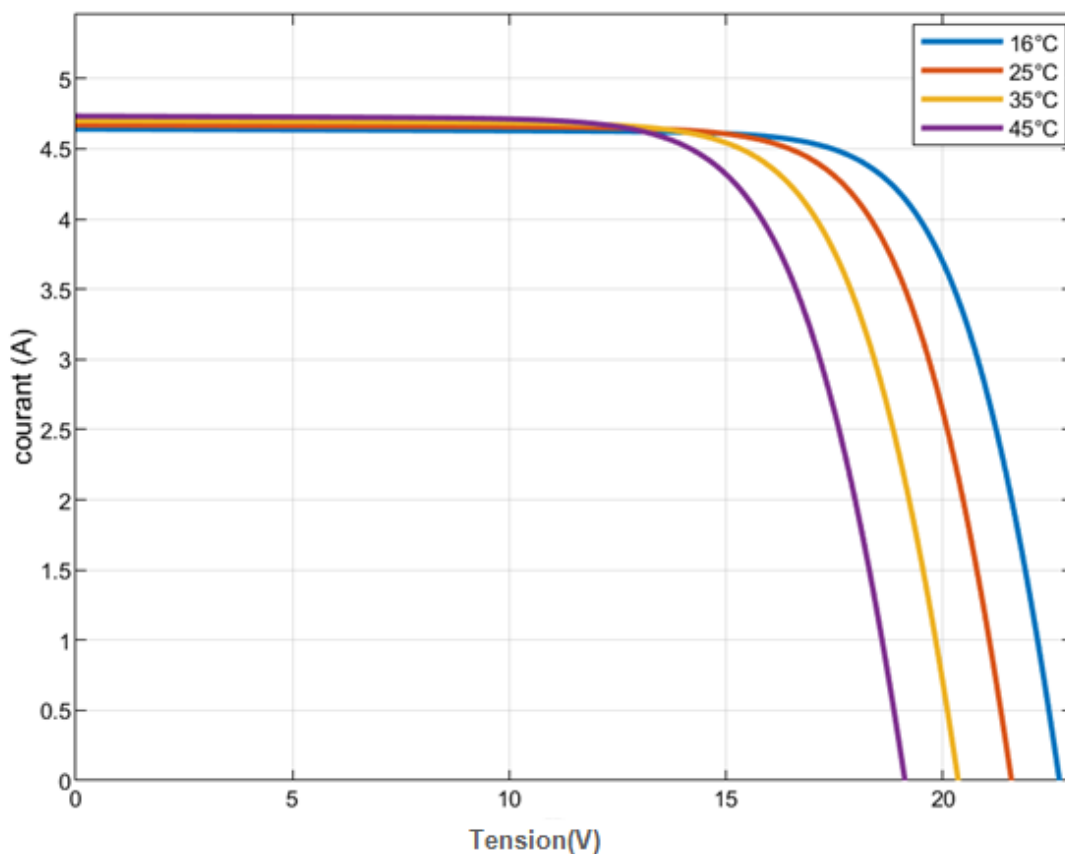


Figure II.20 : Courbes I(V) d'un GPV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$

II.10 Conclusion :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie renouvelable qui provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité, rendue possible par un système PV. Dans ce chapitre, nous sommes intéressés au principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que l'étude de son schéma équivalent. Puis, nous avons considéré les différents paramètres du circuit équivalent qui permettent de tracer la caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque et d'un générateur photovoltaïque. Nous avons remarqué que les performances d'un GPV sont fortement influencées par les conditions météorologiques (température, éclairement). Les modules PV peuvent être associés en série pour augmenter la tension, en parallèle pour augmenter le courant.

Chapitre III:

Convertisseur DC-DC : Le hacheur

III. 1 Introduction :

Le hacheur ou convertisseur DC-DC est un dispositif de l'électronique de puissance qui peut être réalisé à l'aide d'interrupteurs électroniques commandables à l'ouverture et à la fermeture, tels que : le transistor bipolaire (IGBT), le transistor à effet de champs (FET) ou à grille isolée (IGBT) fonctionnant en régime de commutation.

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison sous-charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté (la commande) afin d'avoir une tension de sortie continue réglable à partir d'une tension d'entrée continue fixe. Les hacheurs sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour la recherche du point de puissance maximale. Cependant il existe différents types de convertisseurs DC-DC qui sont utilisés fréquemment dans de telles applications comme, le hacheur série « abaisseur », le hacheur parallèle « élévateur » ou le hacheur série-parallèle qui est la combinaison des deux précédents [18].

III. 2 Convertisseur DC/DC :

Le rôle du convertisseur DC/DC, dans le cadre du PV, est de faire une adaptation entre la source (GPV) et la charge pour avoir un transfert maximal de puissance. Ceci est possible en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.)[19].

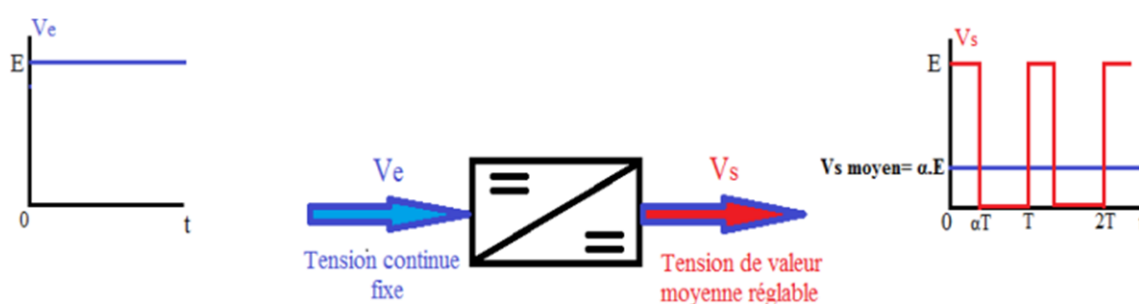


Figure III.1 : Symbole et signaux du convertisseur dc-dc

III.3 Type des hacheurs :

Il existe différents types de convertisseur DC/DC. Les plus importants sont : le convertisseur élévateur (Boost Converter), convertisseur abaisseur (Buck Converter) et le convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost) :

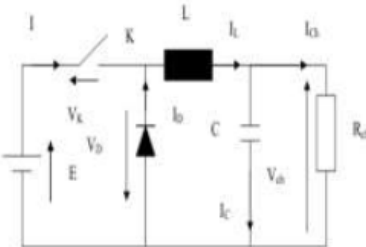
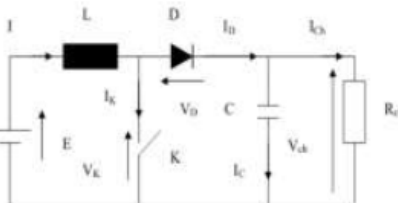
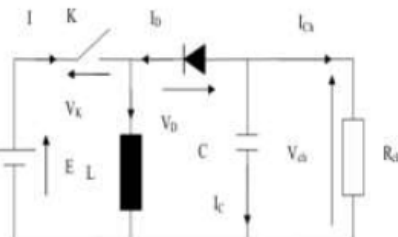
Type d'hacheur	Schéma équivalent	Rapport de transformation	Application
Hacheur série (Buck)		α	Convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure
Hacheur parallèle (Boost)		$\frac{1}{1 - \alpha}$	Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur
Hacheur série-parallèle (Buck-Boost)		$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par l'hacheur série ou en génératrice La machine fonctionne en génératrice

Tableau III.1 Différents types d'hacheur

Dans notre travail on va se baser sur le convertisseur de type élévateur (Boost Converter).

III.3.1 Hacheur abaisseur « Buck »

III.3.1.1 Définition :

Un hacheur abaisseur ou hacheur série est une alimentation à découpage qui convertir une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, ce type de convertisseur est utilisé pour des applications que l'on peut classer en deux catégories: Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) à partir d'un générateur de tension continue supérieure.

Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée [19].

III.3.1.2 Schéma du hacheur abaisseur

Le schéma d'un hacheur abaisseur est indiqué à la figure (III.2). Le commutateur Q peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source V_e doit être plus grande qu'aux bornes de la charge V_s .

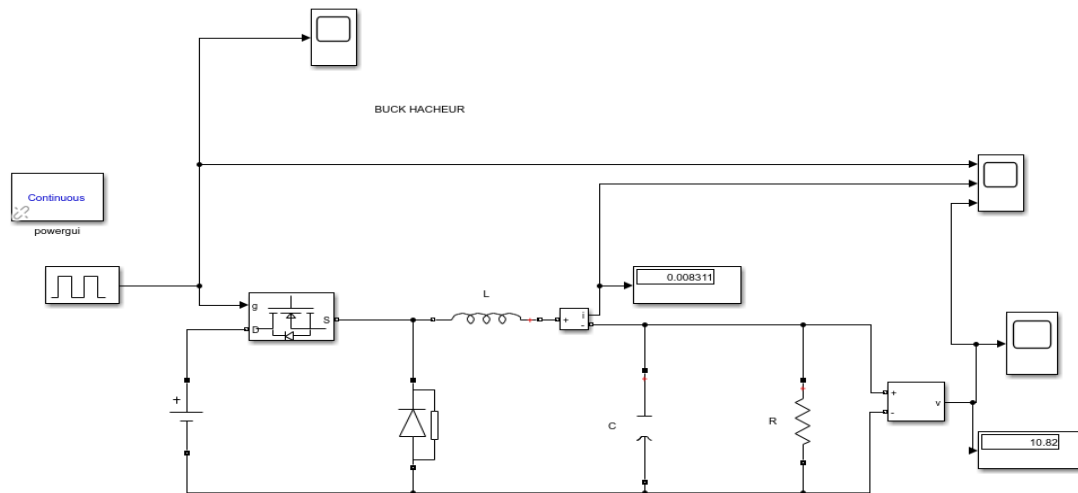


Figure III.2 : Schéma de convertisseur abaisseur « Buck »

- Les formes des tensions et des courants d'un hacheur abaisseur sont indiquées sur :

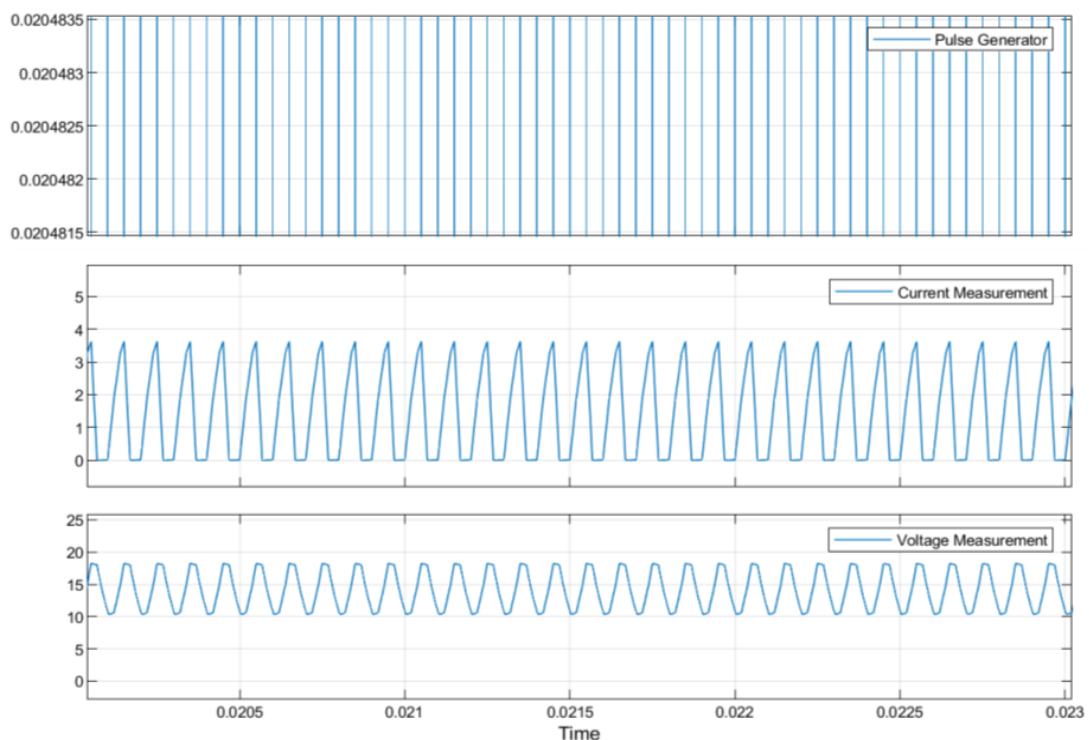


Figure III.3 : Formes d'onde de Courant et de Tension d'un convertisseur abaisseur

III.3.1.3 Phases de fonctionnement :

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

- **Phase 1, Q fermé** : Si le commutateur Q est activé à $t=0$, un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_L n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L.

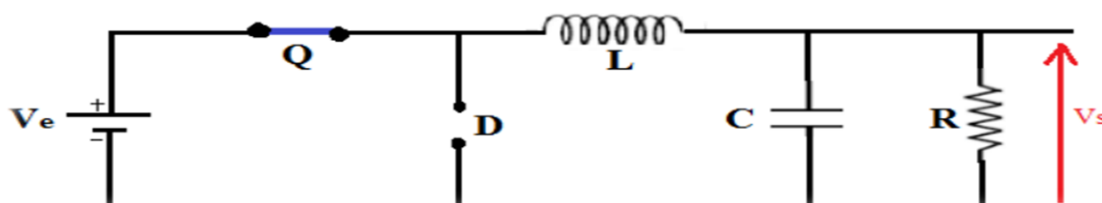


Figure III.4 : Convertisseur Buck durant l'état On

Durant cette phase, on a :

Les équations des tensions des interrupteurs : $V_T = 0$ et $V_D = V_e$

L'équation de tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = V_e - V_S = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (\text{III.1})$$

Par intégration de l'équation, on peut en déduire le courant I_L :

$$I_L = \frac{V_e - V_S}{L} t + I_{min} \quad (\text{III.2})$$

Durant cette phase, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique

- **Phase 2, Q ouvert** : Si Q est désactivé à $t = t_1$, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

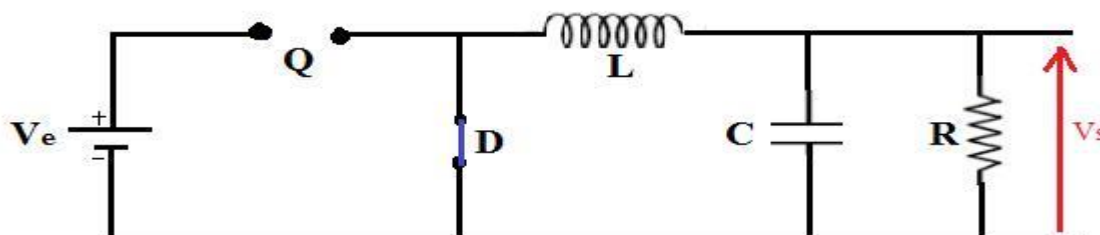


Figure III.5 : Convertisseur Buck durant l'état Off

- Durant cette phase, on a :

Les équations des tensions des interrupteurs : $V_D = 0$ et $V_T = V_e$

L'équation de tension aux bornes de l'inductance :

$$V_L = -V_S = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (\text{III.3})$$

Par intégration de l'équation, on peut en déduire le courant I_L :

$$I_L = \frac{-V_S}{L} t + I_{max} \quad (\text{III.4})$$

Les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et courants à la sortie présentent de faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement [20]. Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne V_S est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'aux kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement.

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_S = \frac{T_{on}}{T} V_e = \alpha V_e \quad (\text{III.5})$$

T_{ON} est la durée de la phase de fermeture de l'interrupteur.

III.3.2 Hacheur élévateur « Boost »

III.3.2.1 Définition :

Un hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un hacheur élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [20].

III.3.2.2 Schéma d'un hacheur élévateur :

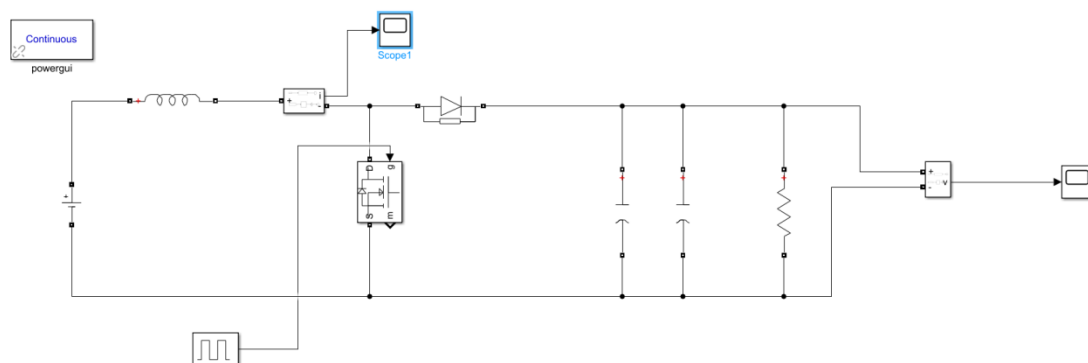


Figure III.6 : Schéma électronique de convertisseur élévateur « Boost »

- Les formes des tensions et des courants d'un hacheur éleveur sont indiquées sur :

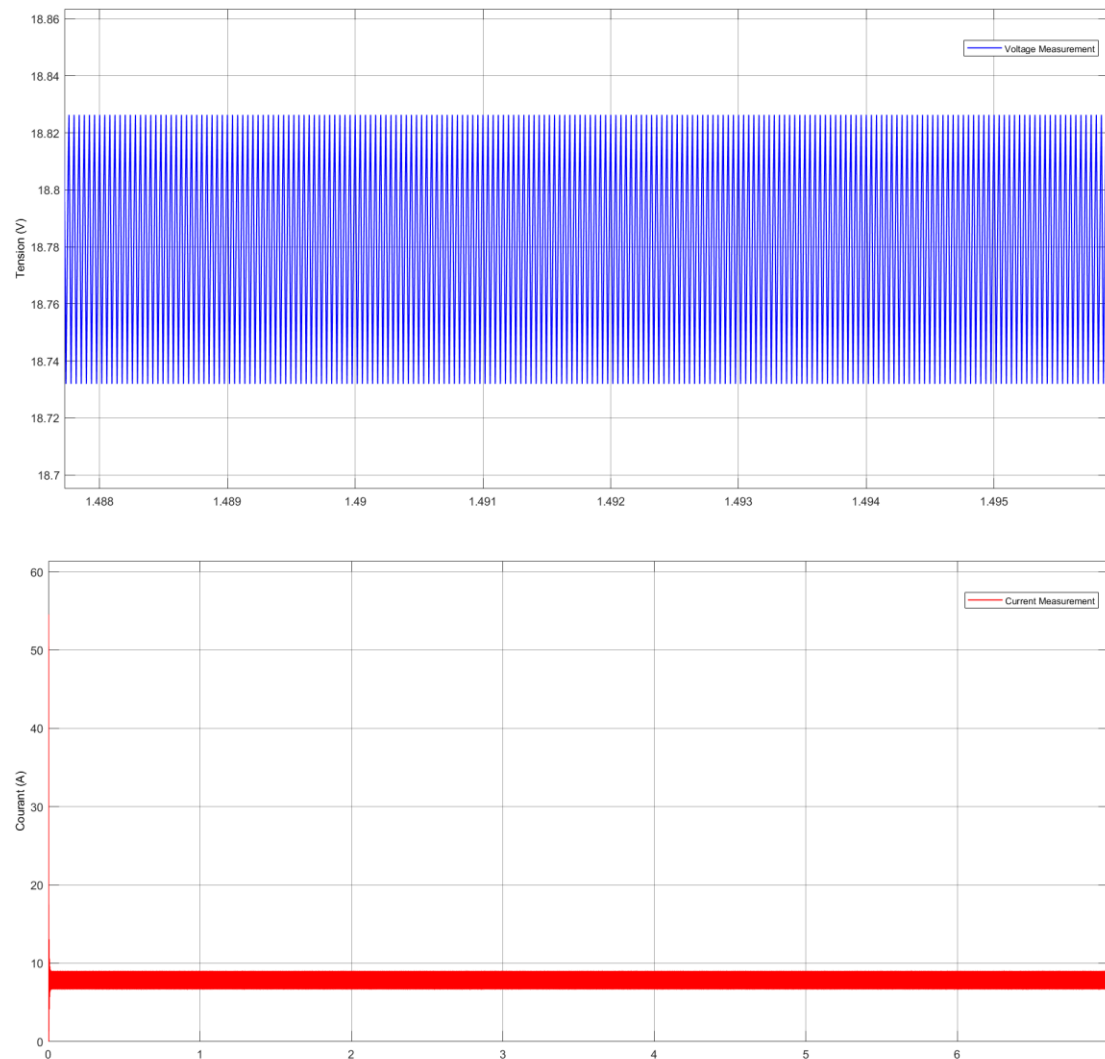


Figure III.7 : Forme de tension et de courant d'un hacheur éleveur 'Boost'

III.3.2.3 Phases de fonctionnement :

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

- **Phase 1, Q fermé :** (phase d'accumulation d'énergie), figure (III.8)

L'interrupteur Q est fermé ($Q=1$), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

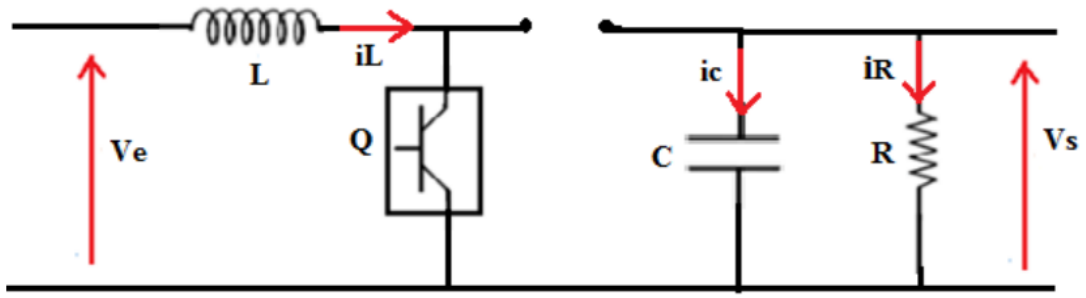


Figure III.8 : Schéma équivalent de la phase 1

Durant l'état passant, la tension de l'inductance est donnée par :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.6})$$

Par intégration, on déduit le courant i_L :

$$i_L = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (\text{III.7})$$

$$i_L = \frac{\alpha V_e}{L} t \quad (\text{III.8})$$

α étant le rapport cyclique. . Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur Q conduit.

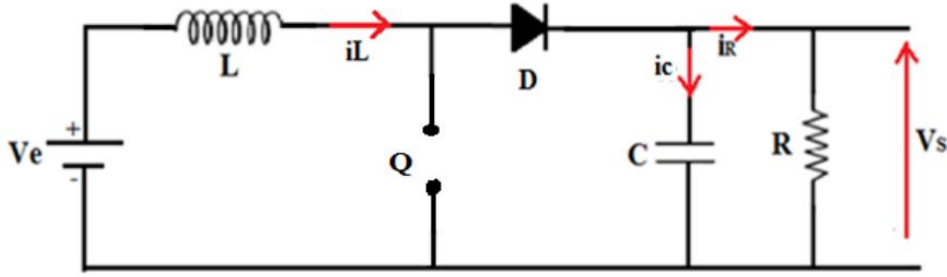
- **Phase 2, Q ouvert**, figure (III.9) Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.
- L'équation de tension :

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (\text{III.9})$$

Le courant se déduit par intégration :

$$i_{2L} = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (\text{III.10})$$

$$i_{2L} = \frac{(\alpha - 1) - (V_e - V_s)}{L} t \quad (\text{III.11})$$

Figure III.9 : Circuit équivalent pour T_{OFF}

La variation du courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$i_{off} + i_{on} = 0 \quad (III.12)$$

En remplaçant i_{on} et i_{off} par leurs expressions, on obtient :

$$\frac{\alpha V_e}{L} t + \frac{(\alpha - 1) - (V_e - V_S)}{L} t = 0 \quad (III.13)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (III.14)$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique α .

Nous pouvons exprimer la tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_S = \frac{V_e}{(1 - \alpha)} \quad (III.15)$$

$$I_S = (1 - \alpha) I_e \quad (III.16)$$

III.3.3 Hacheur abaisseur-élevateur «Buck- Boost»

III.3.3.1 Définition

Un hacheur abaisseur élévateur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée à la masse, compliquant ainsi sa commande [21].

III.3.3.2. schéma d'un hacheur élévateur-abaisseur :

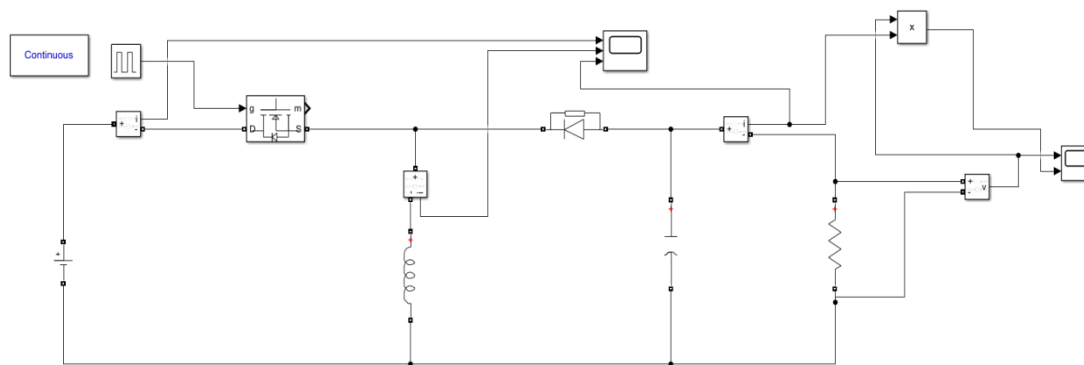
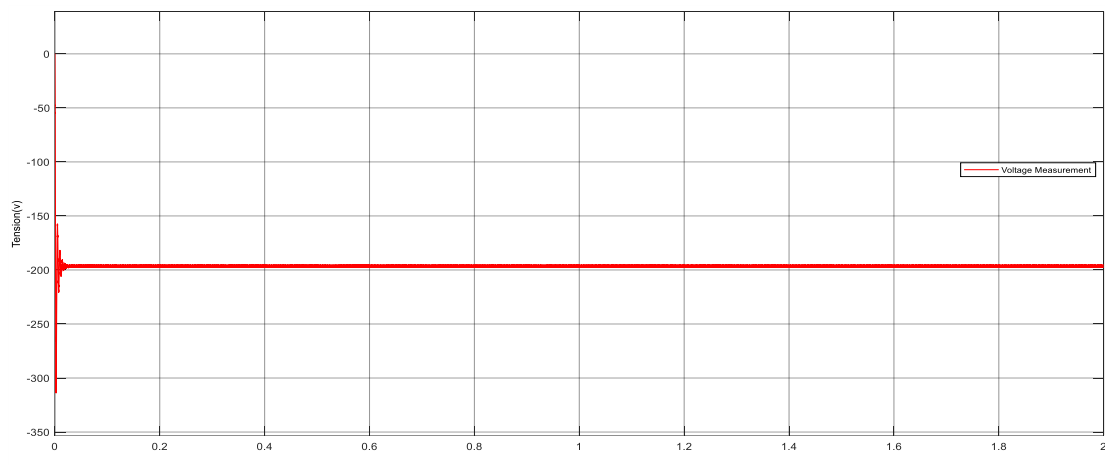
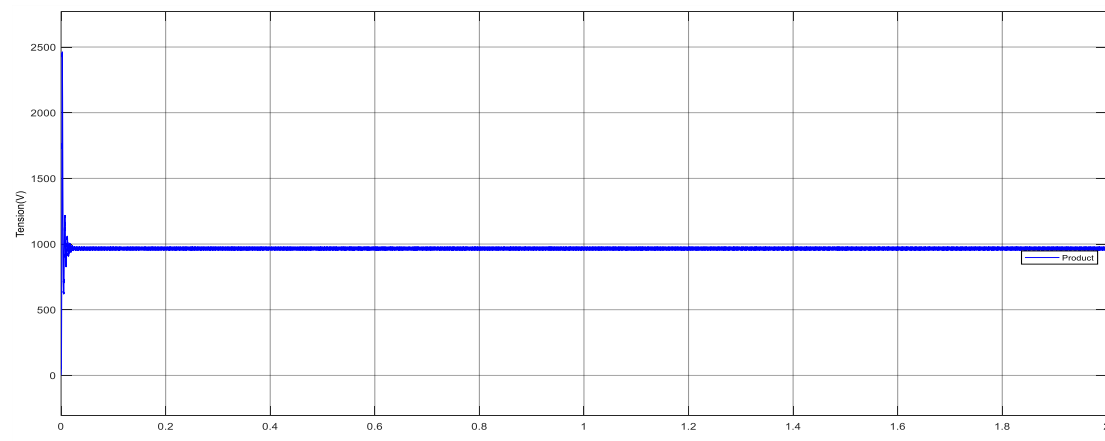


Figure III.10 : Schéma de convertisseur Buck-Boost

- Les formes des tensions et des courants d'un hacheur élévateur -abaisseur sont indiquées sur :



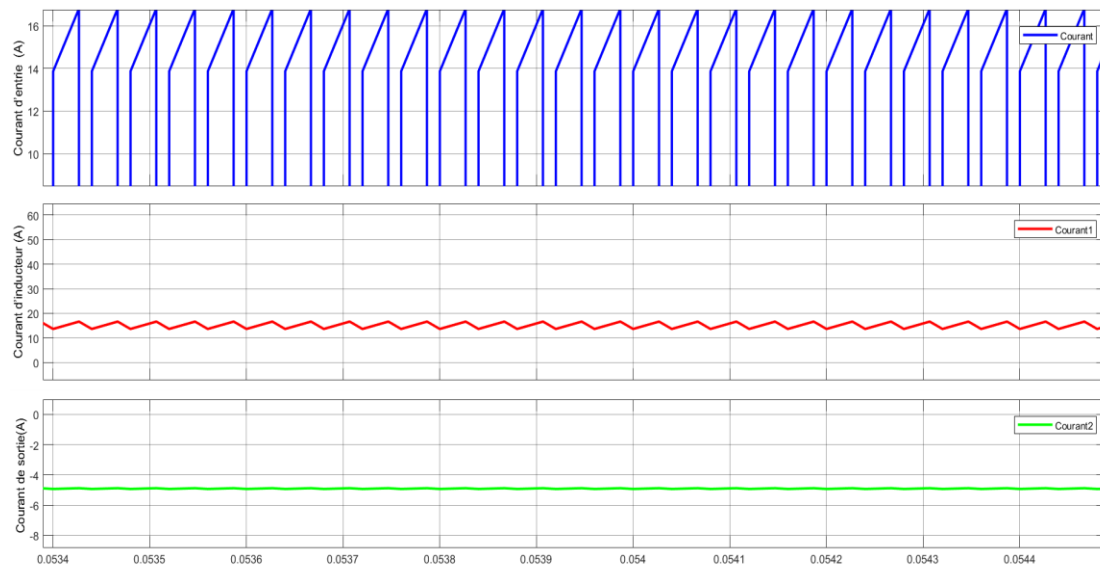


Figure III .11 : Formes des tensions et des courants d'un hacheur éleveur –abaisseur

III.3.3.3 Phases de fonctionnement

Il y'a deux phases de fonctionnement

- **Phase 1, Q fermé**, figure (III.12) : L'interrupteur Q est conducteur pendant le temps $T_{on} = \alpha T$, l'énergie est stockée dans l'inductance L et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée

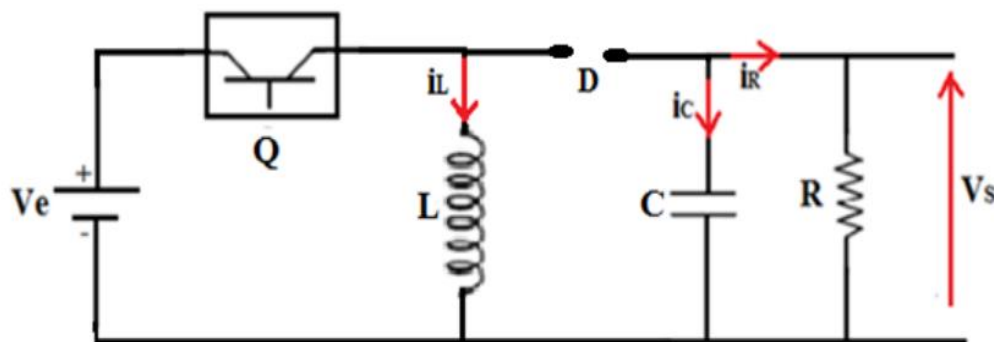


Figure III.12 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On

Les tensions des interrupteurs : $V_T = 0$ et $V_D = -V_e - V_e$

La tension aux bornes de l'inductance :

$$V_L = V_e = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (III.17)$$

Le courant se déduit par intégration

$$i_L = \frac{V_e}{L} t + I_{min} \quad (III.18)$$

- **Phase 2, Q ouvert**, figure (III.12) : Le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle .

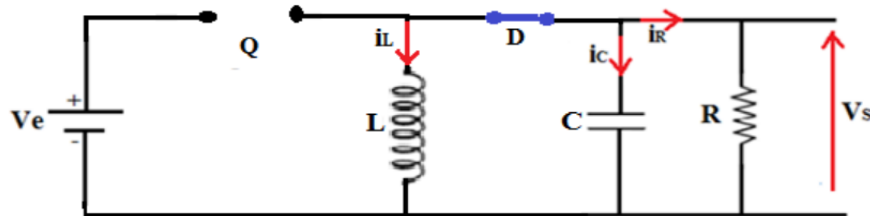


Figure III.13 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off

Les tensions des interrupteurs : $V_D = 0$ et $V_T = V_e + V_S$

La tension aux bornes de l'inductance :

$$V_L = -V_S = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (III.19)$$

Le courant se déduit par intégration :

$$i_L = \frac{-V_S}{L} t + I_{max} \quad (III.20)$$

- En présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux phases. Par conséquent, V_S a une polarité opposée à V_e . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'auparavant.
- L'amplitude de V_S peut être inférieure ou supérieure à V_e suivant la valeur de T_{On} et T_{Off} :

$$V_S = \frac{T_{On}}{T_{Off}} V_e = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_e \quad (III.21)$$

III.4 Conclusion :

L'analyse des GPV nous a permis de conclure la nécessité d'adapter le GPV pour qu'il fonctionne dans les conditions optimales. Pour les applications en régime continu, nous avons montré que l'adaptation des GPV est réalisée en intercalant entre les générateurs et les charges (résistives) des quadripôles d'adaptation qui sont des convertisseurs d'énergie 'HACHEUR' de type élévateur ou abaisseur. Ainsi, le GPV est adapté à une charge lorsque le panneau PV est à sa puissance maximale pour un éclairement et température donnés. Cette puissance maximale est alors quasiment transférée à la charge en ajustant le rapport cyclique α du signal commandant l'interrupteur des convertisseurs d'énergie. De ce fait, il est nécessaire de concevoir et de réaliser un circuit qui permet de régler cette puissance maximale d'une manière automatique en temps réel et en fonction des conditions météorologiques (température, éclairement,...) et des variations de la charge. Ce circuit permettant la poursuite du point de puissance maximale (PPM) est appelé commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) [22].

Chapitre IV:

Téchniques MPPT

IV.1 Introduction

Pour assurer le fonctionnement optimal d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM) , des contrôleurs MPPT sont utilisés , ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques basées sur des méthodes optimales [23].

Dans ce chapitre on va étudier les deux différentes méthodes de suivre du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque.

IV.2 Commande MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le GPV, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation) par placer le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). [24] Il peut être représenté par le schéma de la Figure IV.1:

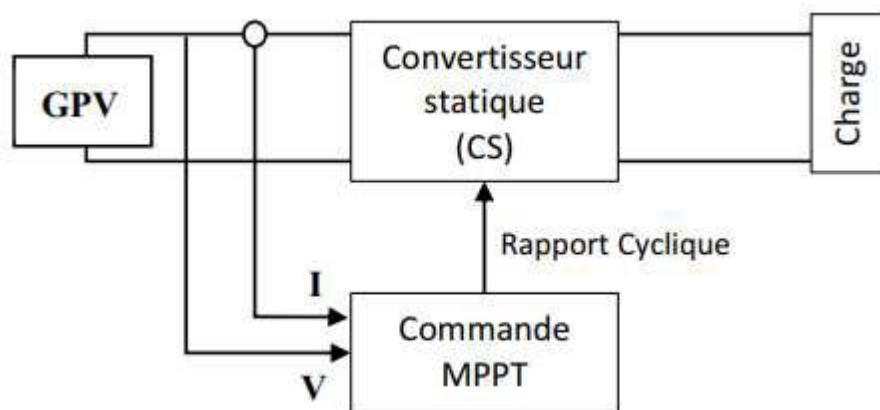


Figure IV.1 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

IV.3 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Le principe de cette technique consiste alors à agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC en l'amenant à une valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le PV.

Il existe plusieurs algorithmes MPP permettant l'implémentation de cette technique de commande. Il est important de les connaître pour savoir laquelle serait la mieux adaptée à chaque application. La figure IV.2 illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum.

- ❖ Pour une variation d'ensoleillement (cas a), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.
- ❖ Pour une variation de charge (cas b), on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.
- ❖ Dans une moindre mesure, un dernier cas de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV (cas c). Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande, cette dernière n'a pas les mêmes contraintes temporelles que les deux cas précédents. En résumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV [24].

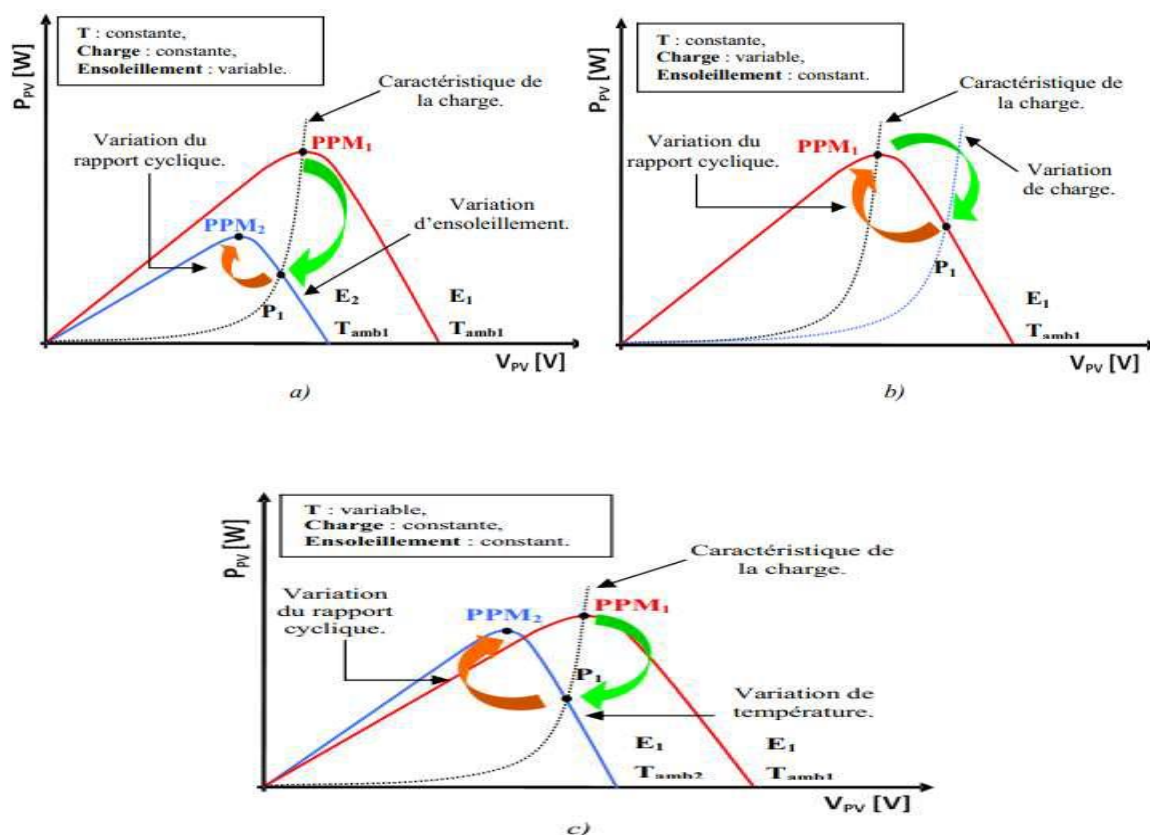


Figure IV.2 : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximal

a) suite à une variation d'ensoleillement .

b) suite à une variation de charge.

c) suite à une variation de température.

IV.4 Différents types de commandes MPPT

Les méthodes conventionnelles (P&O, Inc cond...) utilisent les données détectées en temps réel telles que, la tension, le courant, la température et l'irradiation solaire pour suivre le MPP du système [24].

IV.4.1 Méthode de Perturbation and Observation "Perturb and Observe (P&O)"

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique elle est basée sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de la tension V_{ref} .

IV.4.1.1 Principe de la méthode P&O

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du module V_{PV} , avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale (ΔV) et on observe la variation de la puissance P_{PV} qui résulte. Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} c'est-à-dire $\Delta P > 0$, comme illustré dans la figure (IV.3).

- Si la dérivée est positive $\frac{dp}{dv} > 0$; l'augmentation du rapport cyclique D , indique que nous approchons du PPM.
- Si la dérivée est négative $\frac{dp}{dv} < 0$; la diminution du rapport cyclique D , indique que nous dépassons du PPM.
- Si la dérivée est nulle $\frac{dp}{dv} = 0$; ceci indique que c'est la PPM.

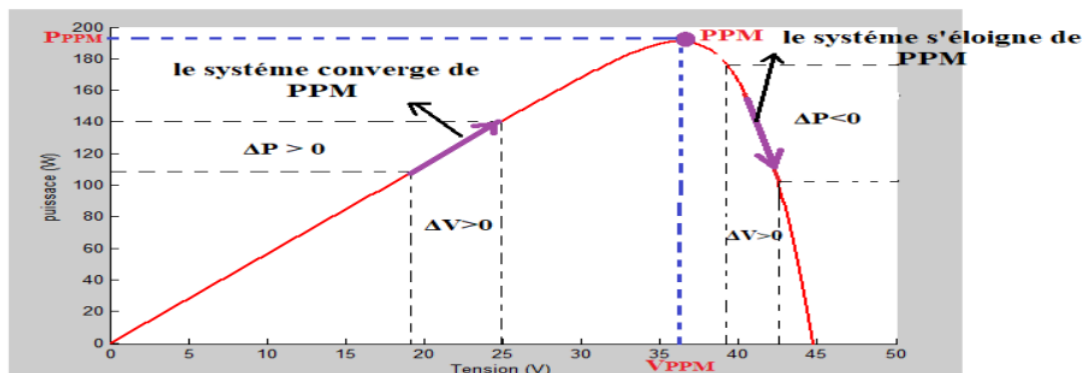


Figure IV.3 : Illustration de la méthode P&O

- La perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction. Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.
- Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique ($P - V$), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de

commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP [25] [26].

La figure (IV.4) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Selon cet algorithme, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à des instants successifs d'échantillonnage, et pouvoir calculer l'erreur de tension et de puissance :

$$\Delta V = V_{PV_n} - V_{PV_{n-1}} \quad (IV.1)$$

$$\Delta P = P_{PV_n} - P_{PV_{n-1}} \quad (IV.2)$$

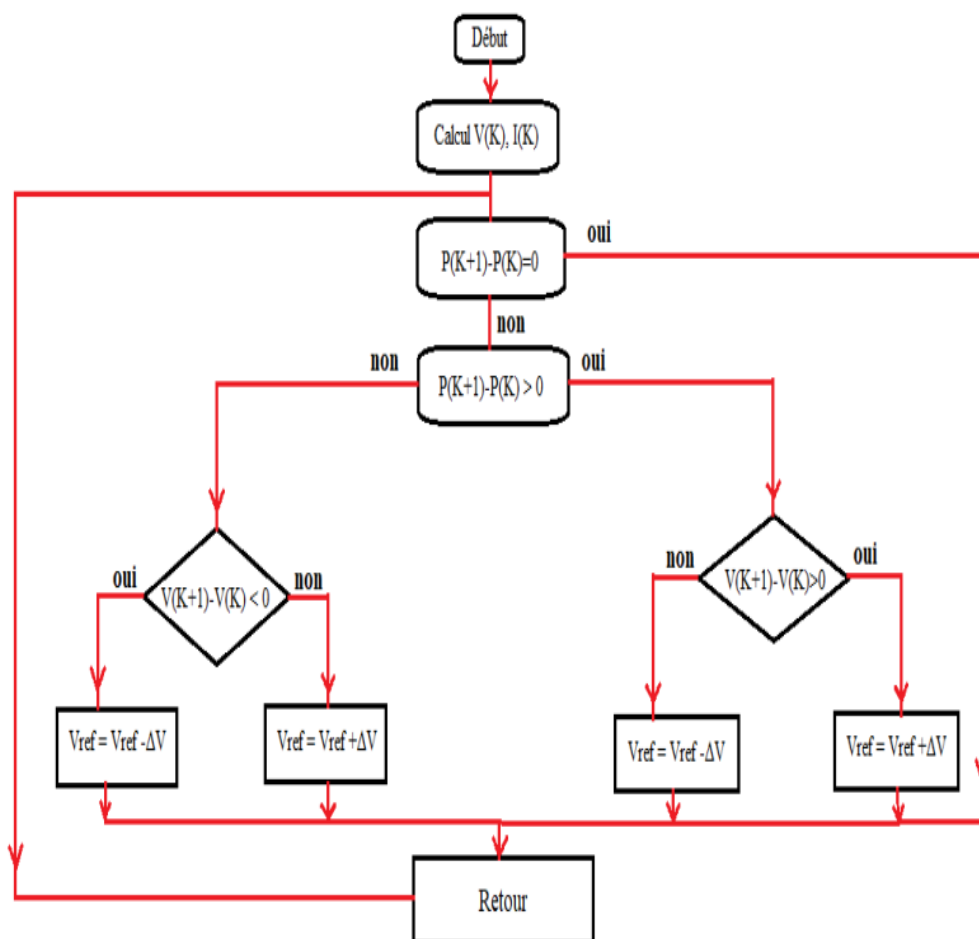


Figure IV.4 : Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

IV.4.1.2 L'inconvénient de P&O

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques comme l'illustre la figure (IV.5) [25].

Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P_1 à P_2 , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme croit que ceci est le résultat de sa propre action et le sens de la perturbation restera le même. Par conséquent, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP et continuera à s'éloigner si l'éclairement augmente (ou diminue) progressivement. Pour pallier à ce problème, on pourra ajouter le poids d'un troisième point et le comparer aux deux autres avant de prendre une décision sur le sens de la perturbation [30]. Une autre solution serait de diminuer le cycle du MPPT [26].

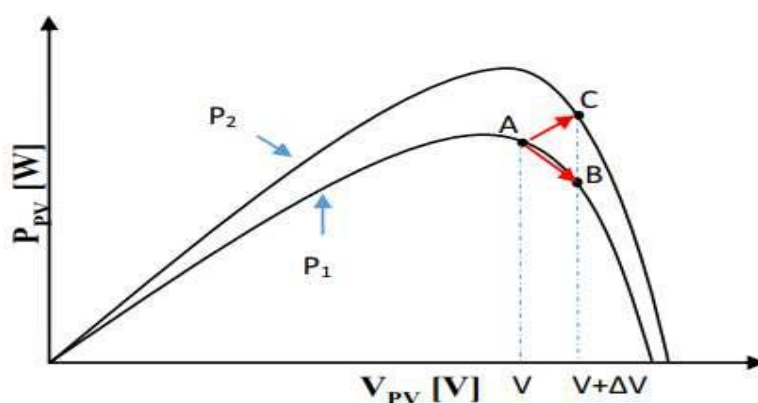


Figure IV.5 : Divergence de la méthode P&O

IV.4.2 Méthode d'incrémentation de la conductance (IncCond) :

Une autre alternative à la commande P&O, est la commande à incrémentation de la conductance qui se base sur le dérivé de la conductance du GPV pour connaître la position relative du MPP en appliquant une action de contrôle adéquate suivant le MPP.

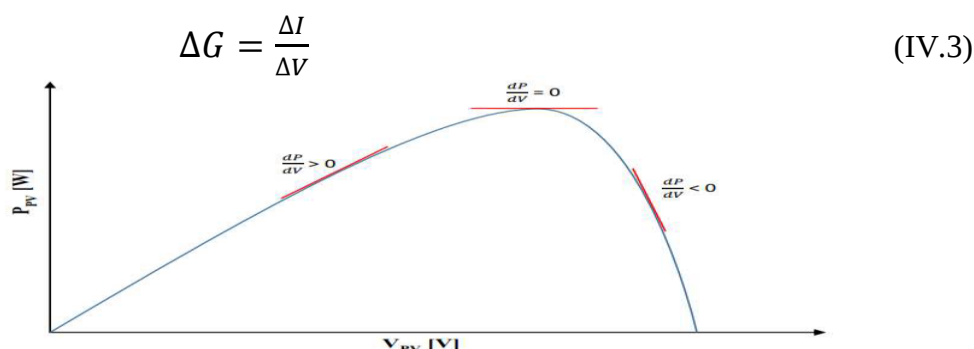


Figure IV.6 : caractéristique de tension-puissance du panneau

Cette méthode est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite (figure : IV.6).

- D'où, on peut alors écrire de nouvelles conditions sur la variation de conductance :
 - Si $\frac{\Delta I PV}{\Delta V PV} > \frac{I PV}{V PV}$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
 - Si $\frac{\Delta I PV}{\Delta V PV} < \frac{I PV}{V PV}$ le point de fonctionnement est à droite du PPM.
 - Si $\frac{\Delta I PV}{\Delta V PV} = -\frac{I PV}{V PV}$ le point de fonctionnement est sur le PPM.

Le MPP peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée ($G = I/V$) à l'incrément de la conductance ($\Delta G = \Delta I/\Delta V$). L'organigramme de cette méthode est donné par la figure IV.7. V_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau PV est forcé à fonctionner. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI soit noté, indiquant un changement des conditions météorologiques, donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue la tension de référence V_{ref} pour suivre le nouveau MPP [24].

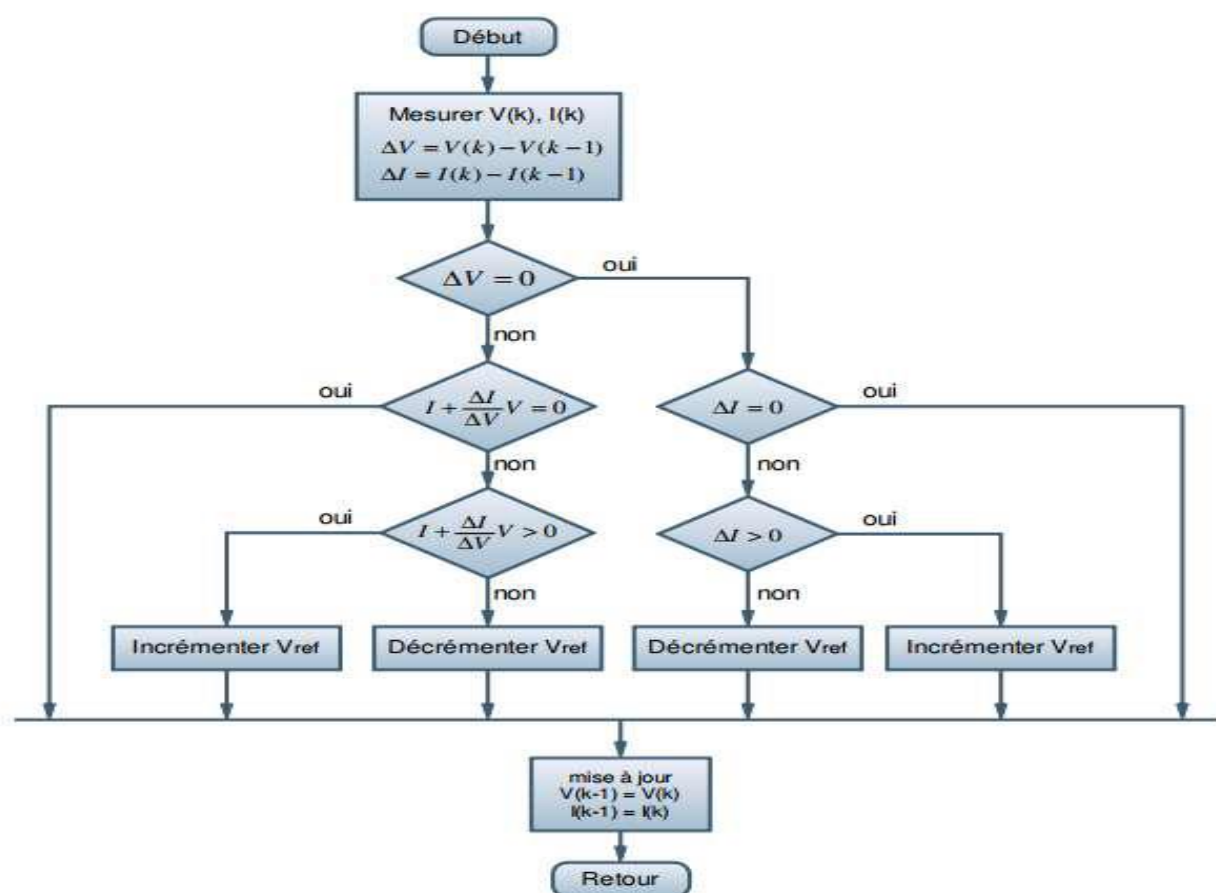


Fig. IV.7 : Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision. Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert (**Voc**) sur le courant de court-circuit (**Icc**).

Une manière moins évidente pour effectuer la méthode Inc Cond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrémentation de la conductance pour générer un signal d'erreur [24].

$$e = \frac{I}{v} + \frac{dI}{dv} \quad (IV.4)$$

D'après l'équation (IV.4), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur.

IV.5 Simulation :

Afin d'évaluer la réponse du mécanisme de poursuite, Pour voir le comportement du système face aux changements de l'éclairement et de la température on a réalisé les deux schémas block de simulation pour les deux méthodes, sous MATLABSIMULINK

IV.5.1 Simulation du Méthode de Perturbe et observe (P&O) :

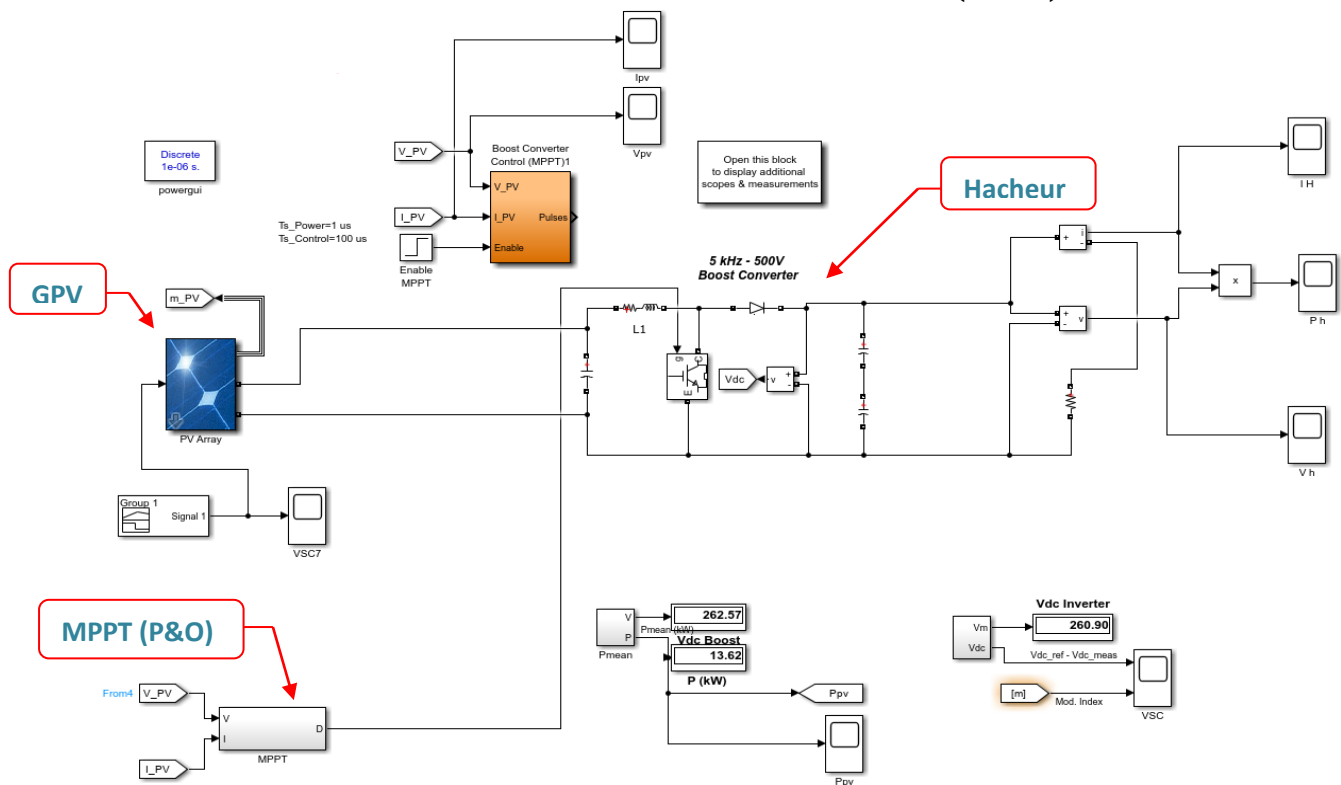


Figure IV.8 : Schéma de simulation (Méthode du P&O).

Pour l'éclairement variable : $E=700 - 870 - 300 \text{ w/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

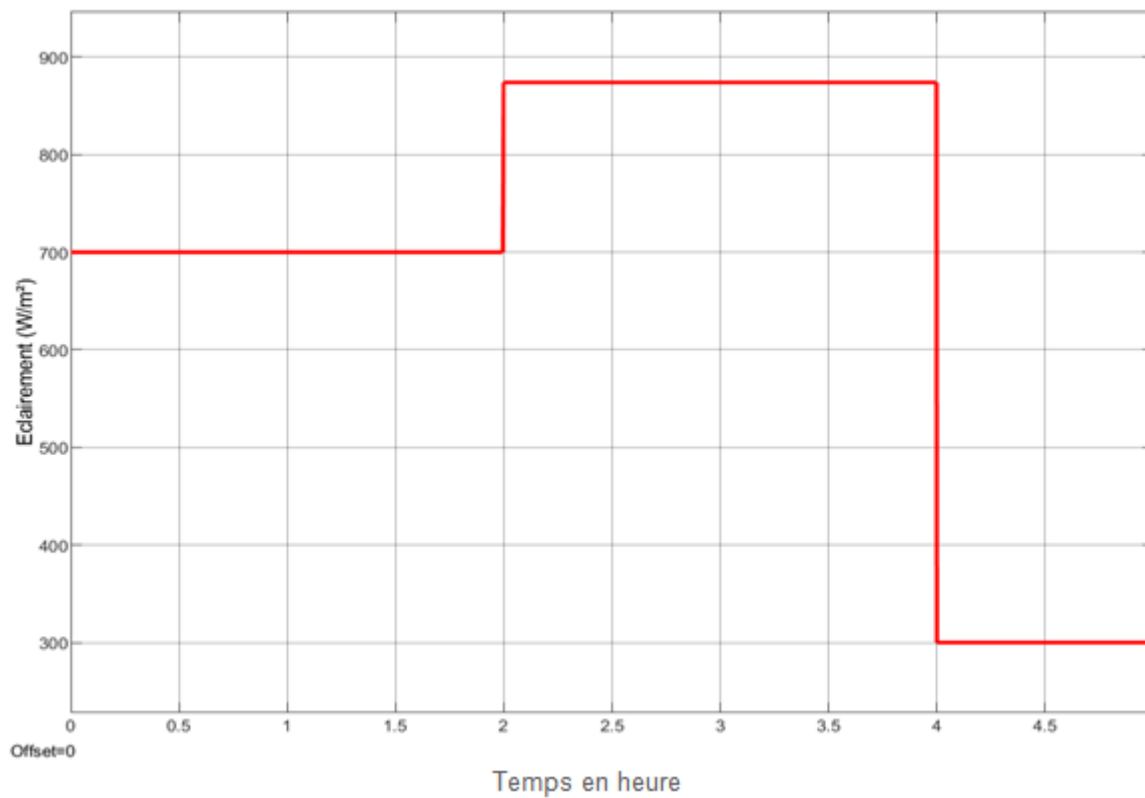
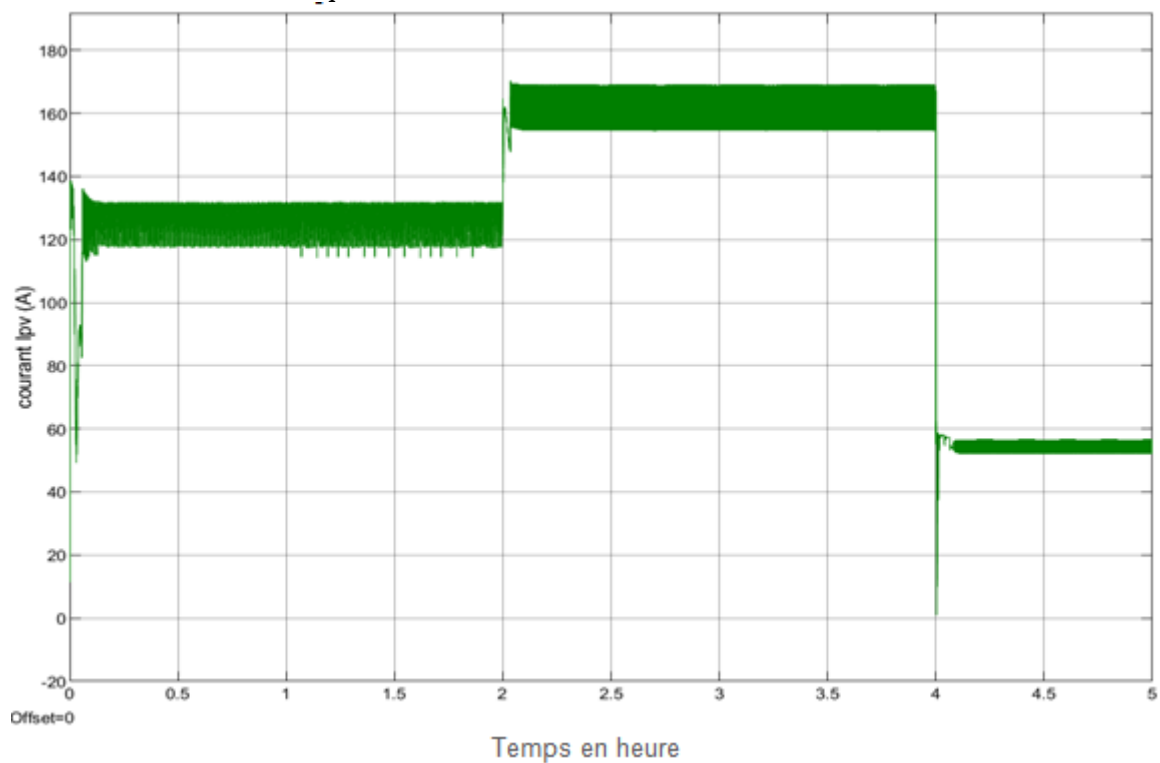
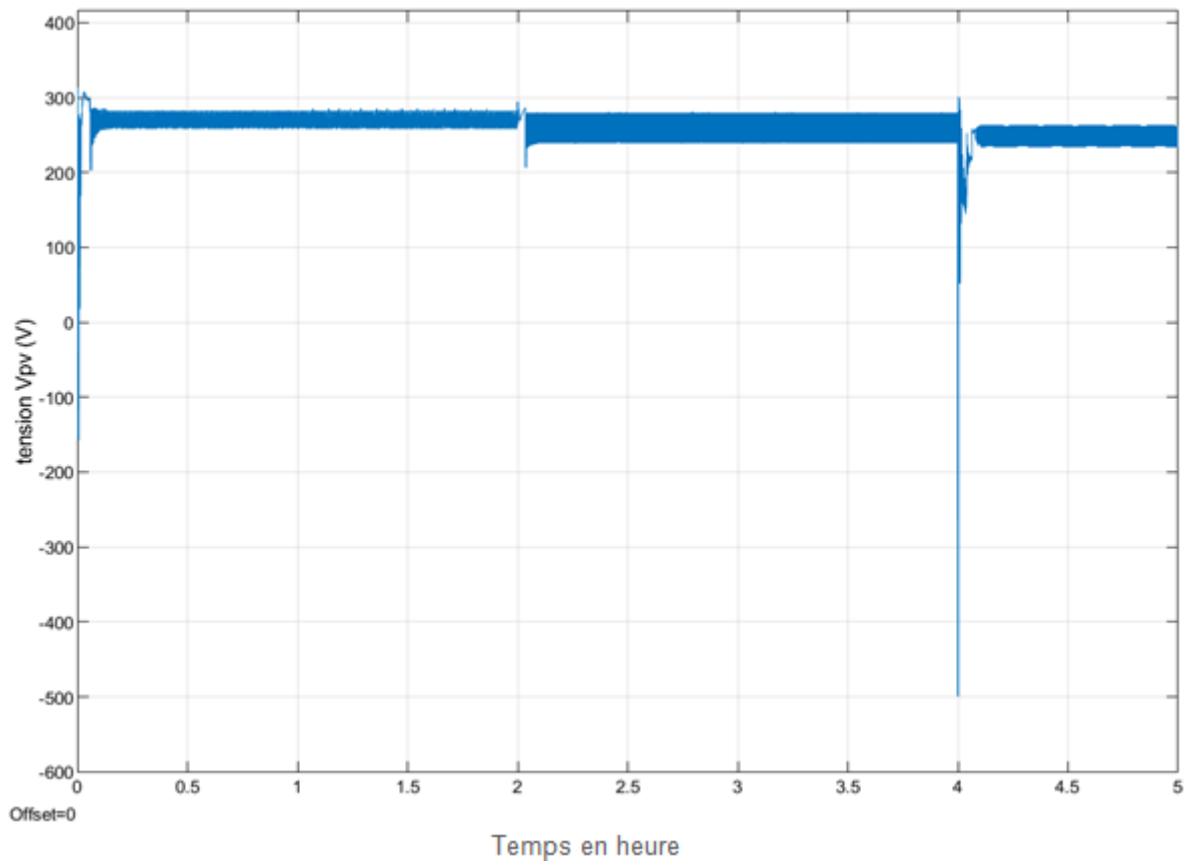


Figure IV.9 : Variation échelonnée de l'éclairement

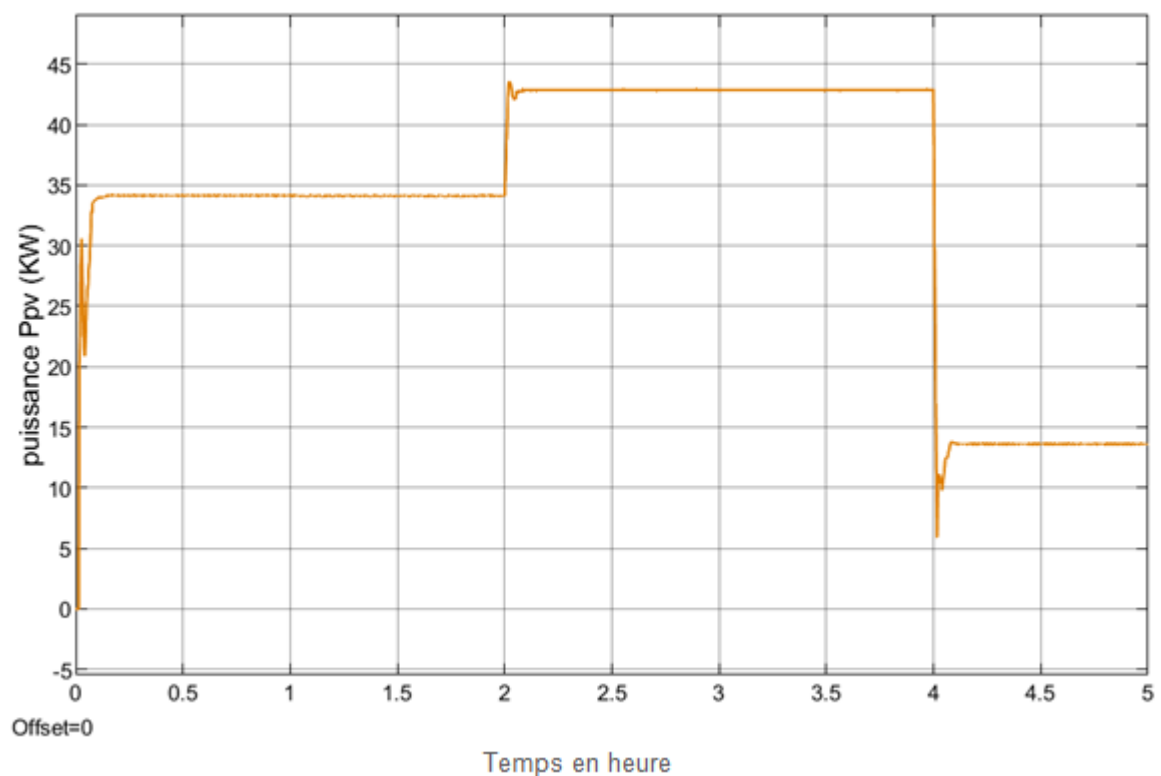
on retient les caractéristiques suivantes :



(a):Variation du courant de panneau Ipv

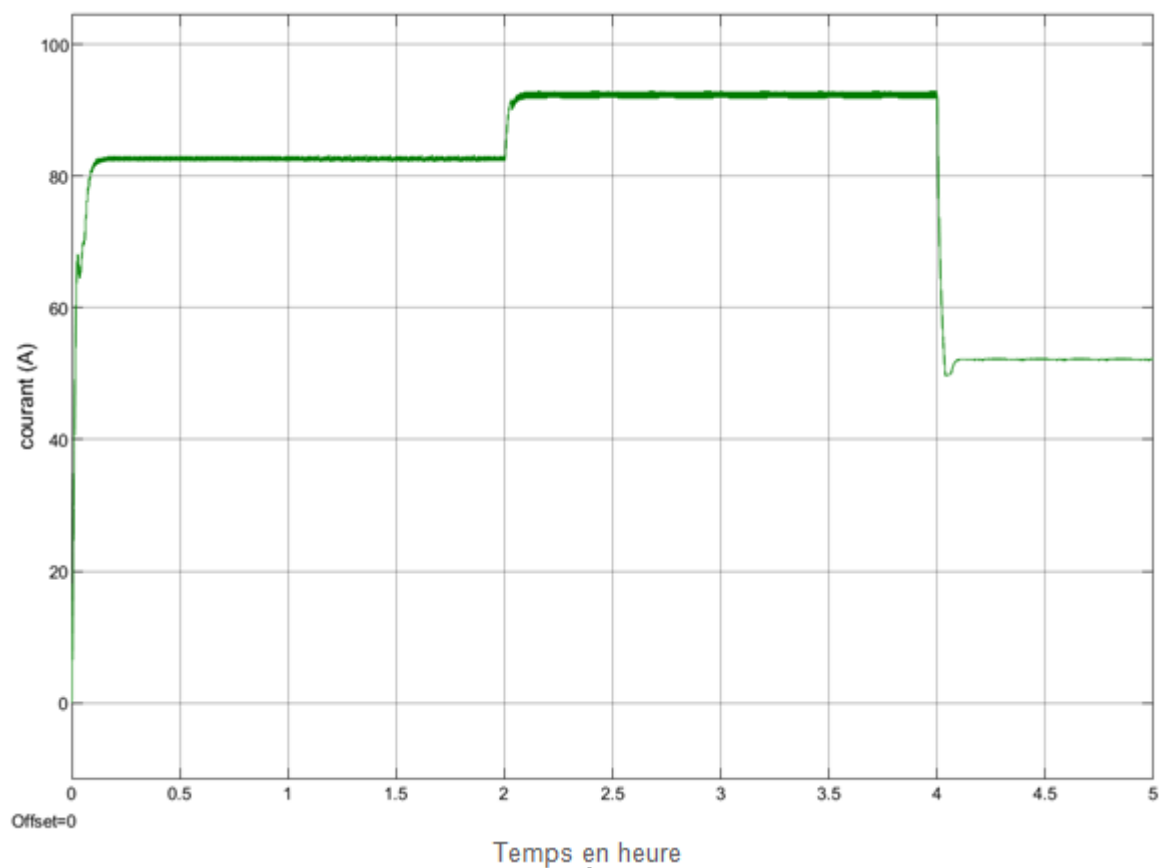


(b) : Variation de la tension de panneau V_{pv}

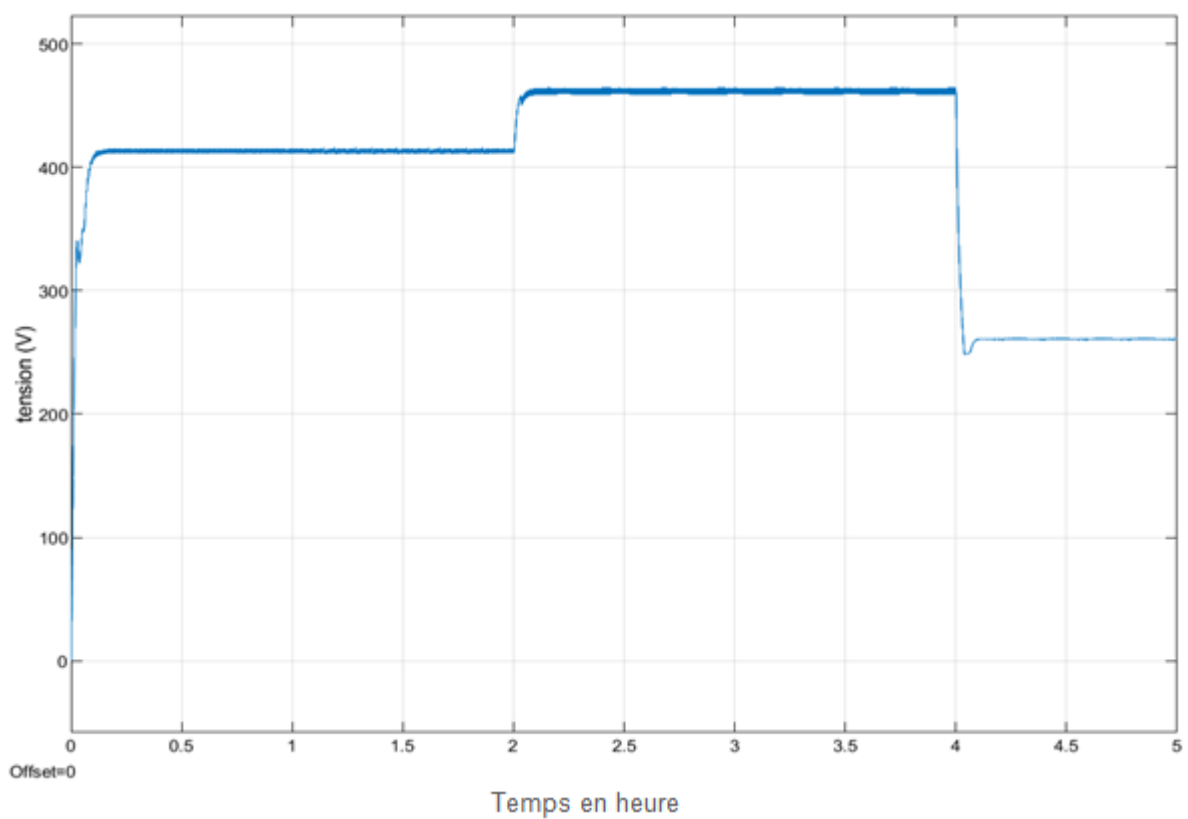


(c) : Variation de la Puissance du panneau P_{pv}

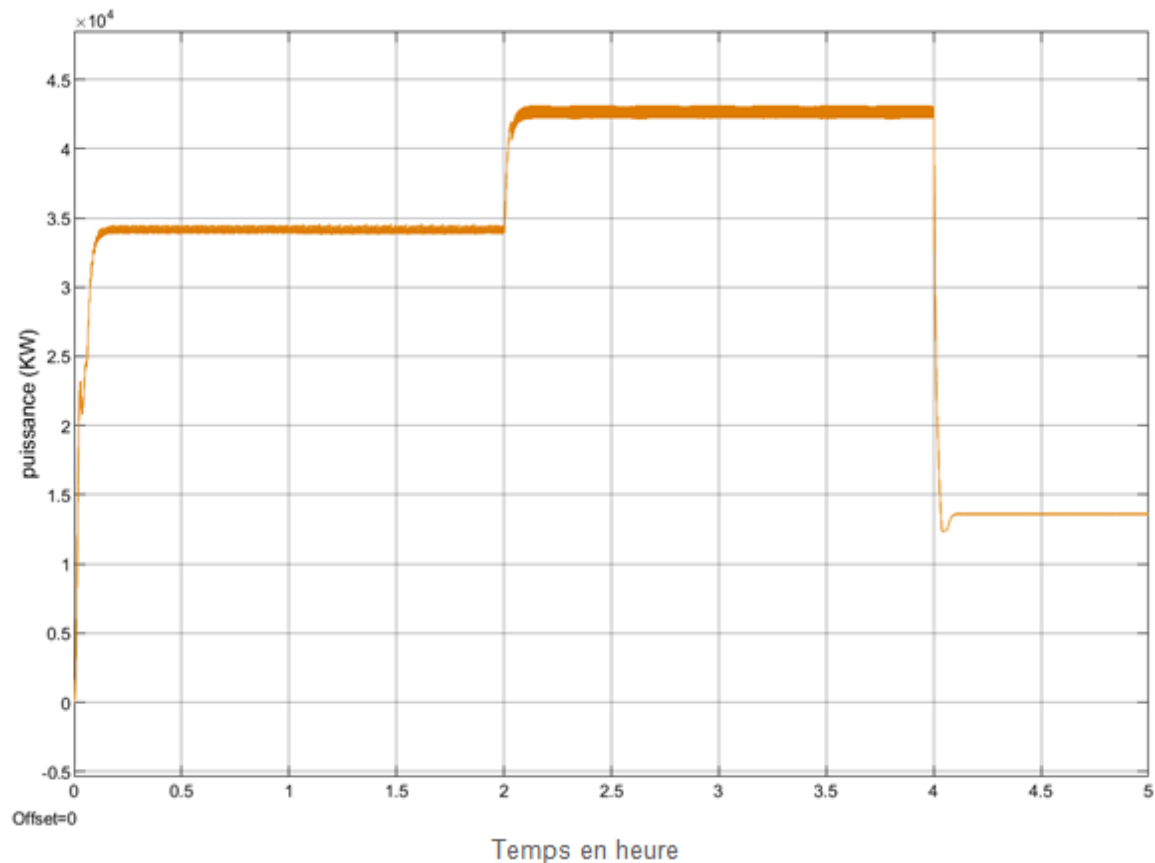
Figure IV.10 : Variation des caractéristiques du panneau pour un éclairnement variable



(a) : Variation du courant d'hacheur



(b) : Variation du Tension d'hacheur



(c) : Variation de puissance d'hacheur

Figure IV.11 : Variation des caractéristiques d'hacheur pour un éclaircissement variable

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus :

- La tension à augmenter de valeur 270 V vers une valeur de 420V , et une diminution forte de courant I_{pv} de valeur 139 A vers 88A grâce à l'effet boost , notamment la puissance garde la même valeur 34 KW(Conservation de la puissance).
- On retient aussi que pour une augmentation du point d'éclaircissement de valeur de (700W/m²/900 W/m²) en termes de temps ,la précision diminue .
- Beaucoup des perturbations et d'ondulation au tour des signaux

IV.5.2 Simulation du Méthode de Incremental conductance (IncCond):

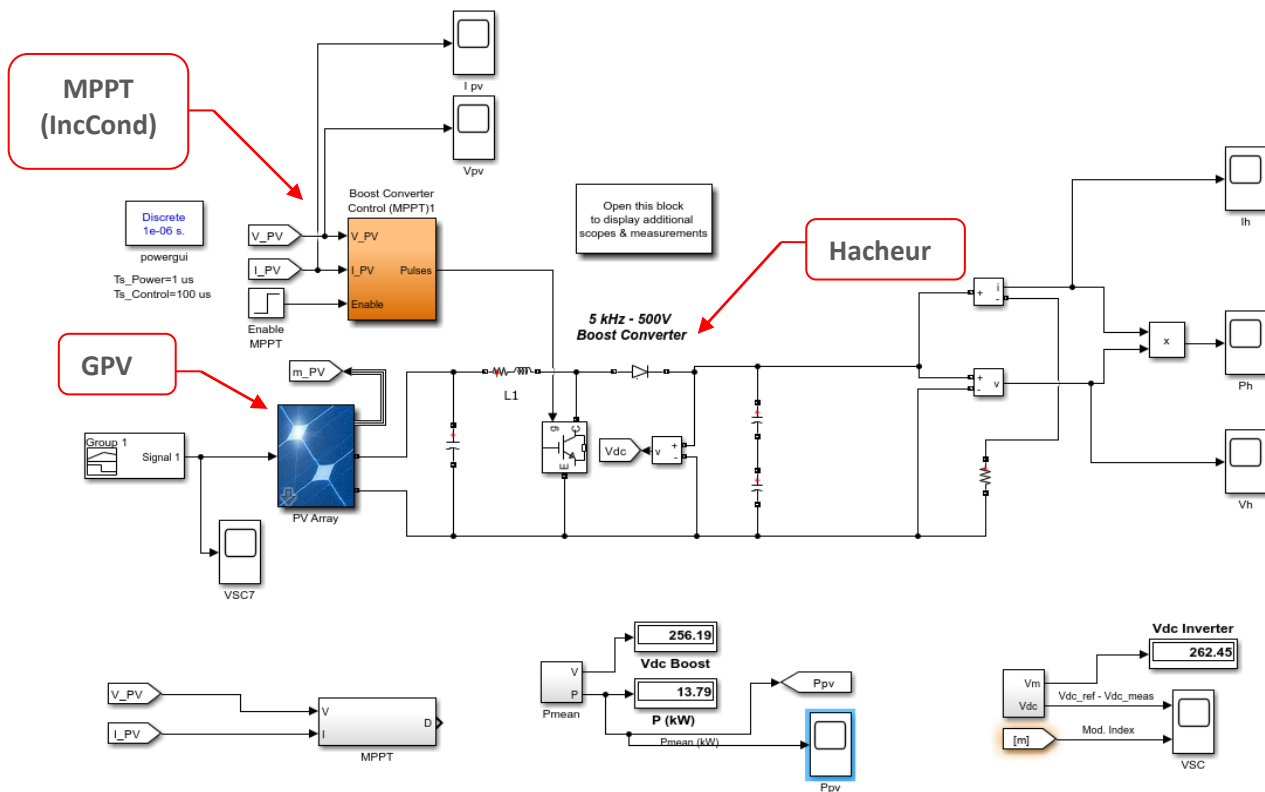
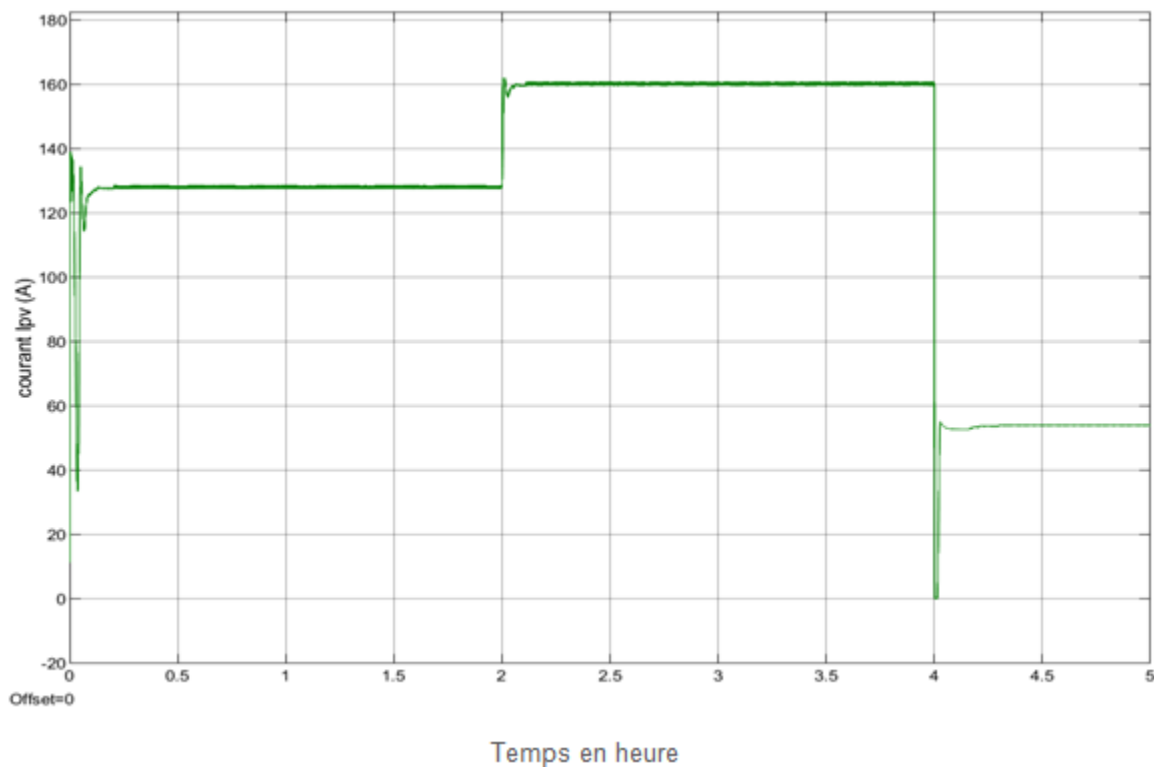
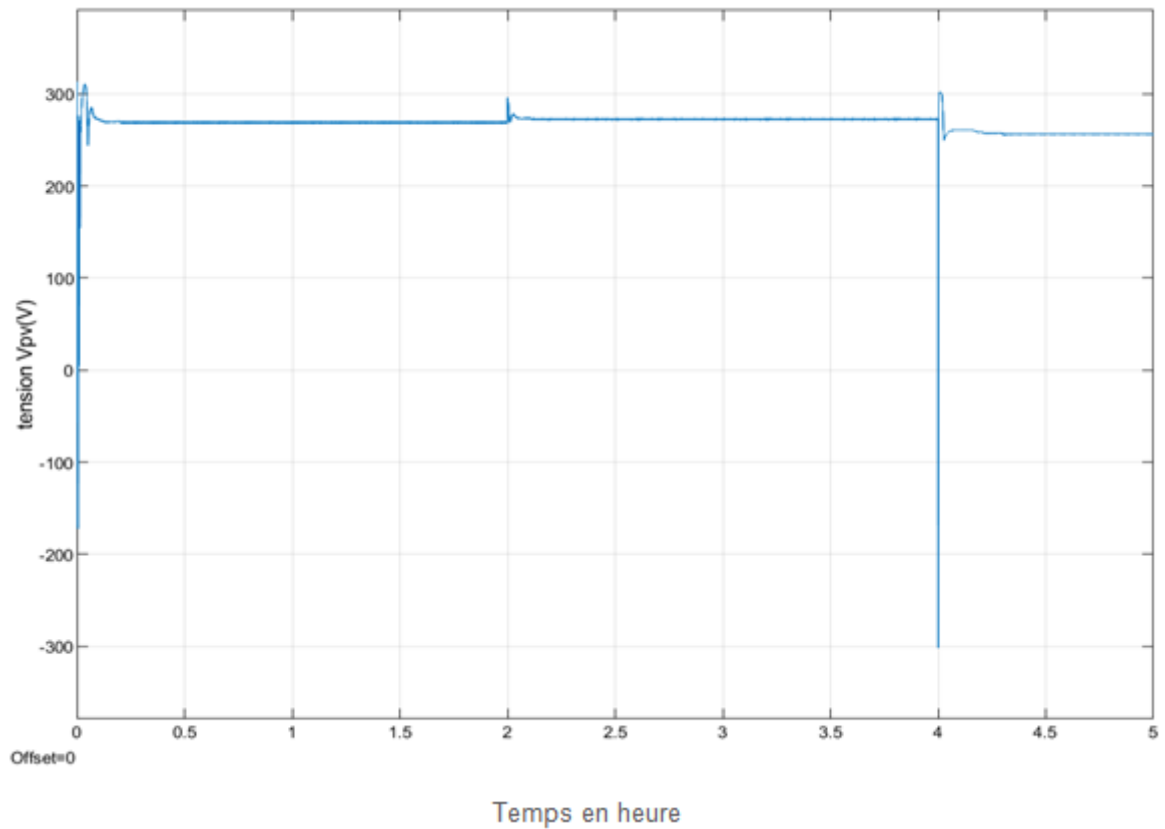


Figure IV.12 : Schéma de simulation (Méthode Incrémental)

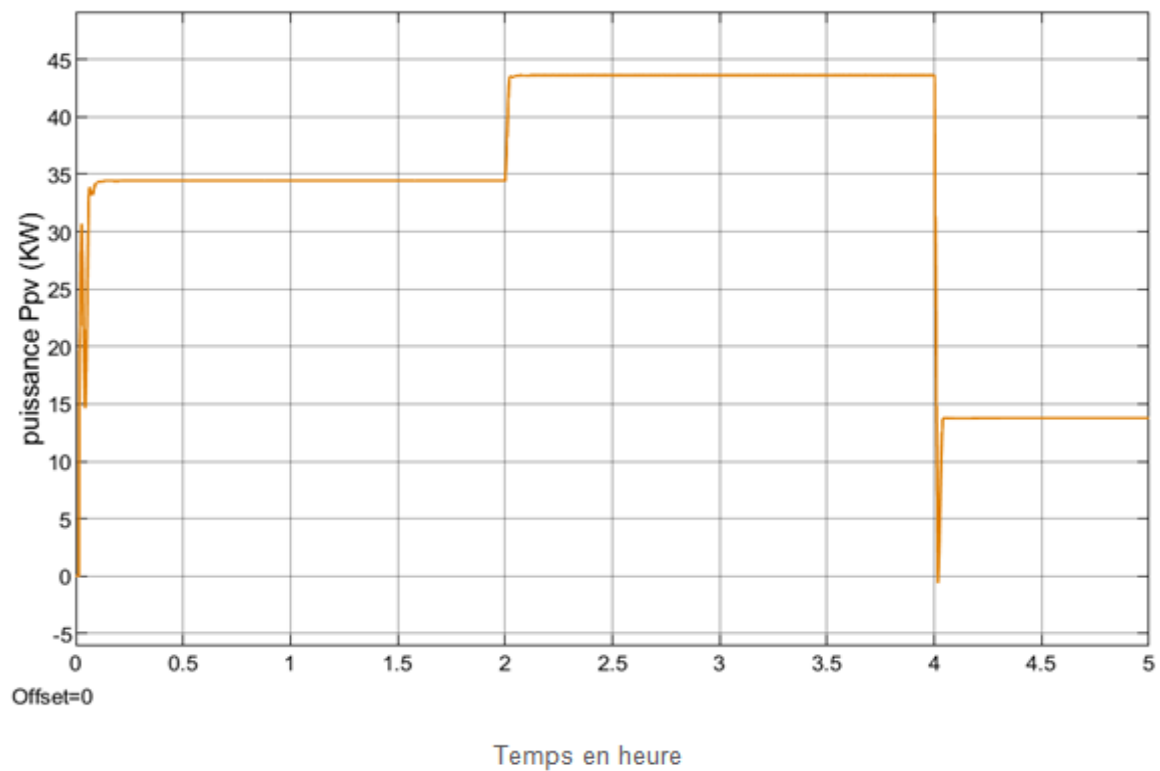
Pour l'éclairement variable : $E=700 - 870 - 300 \text{ w/m}^2$ (Figure IV.9) et $T=25^\circ\text{C}$ on retient les caractéristiques suivantes :



(a) : Variation du courant I_{pv} de panneau

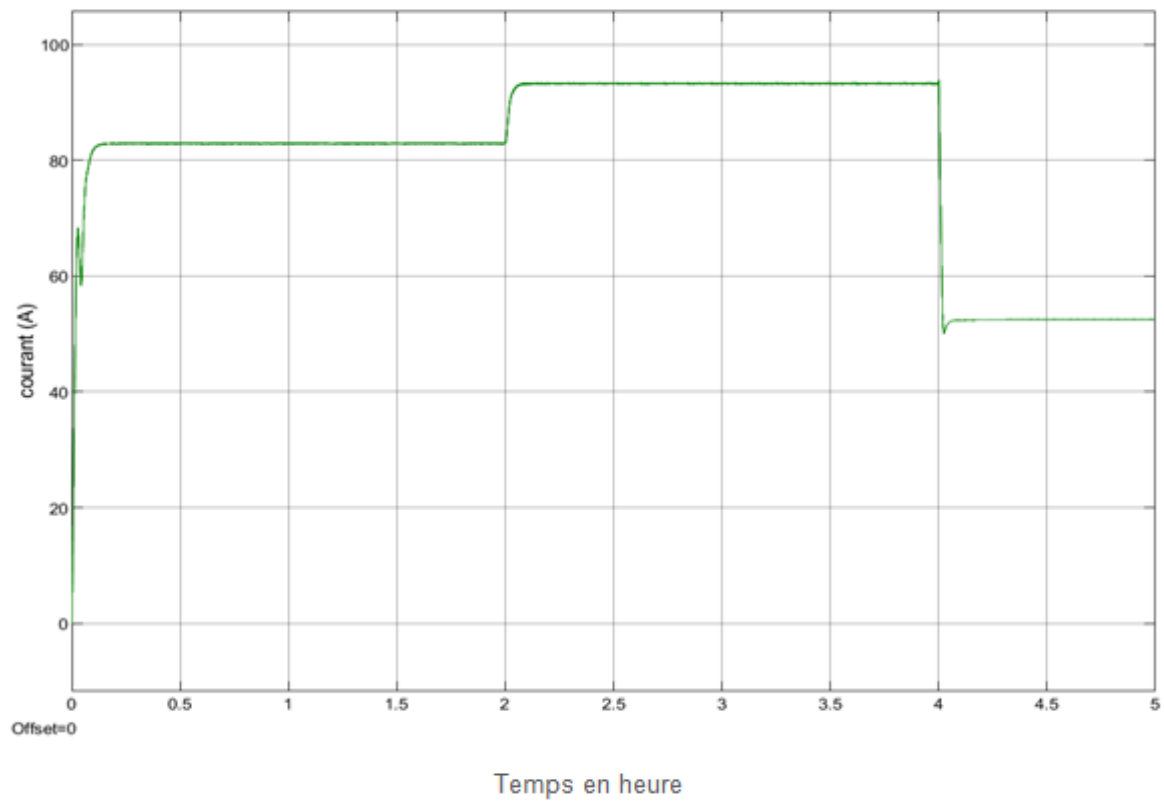


(b) : Variation de la tension V_{pv} du panneau

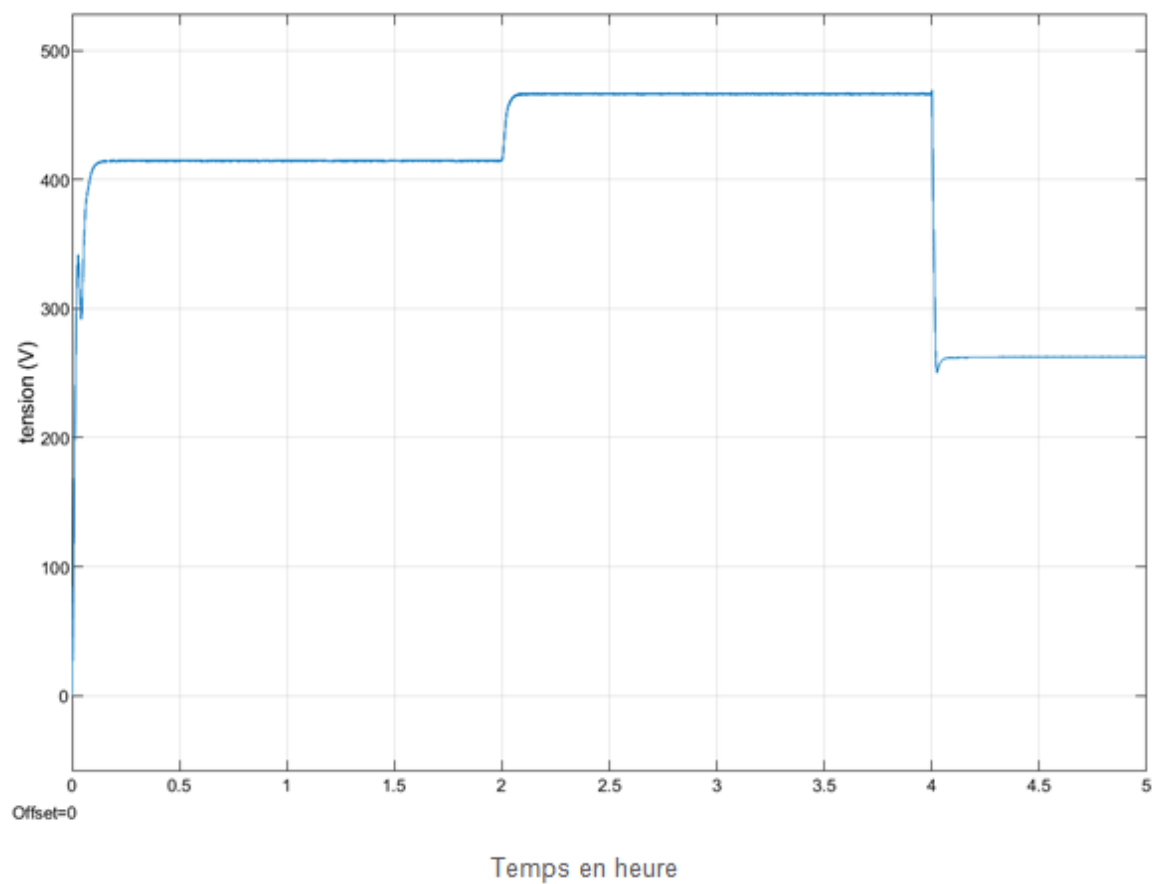


(c) : Variation de la Puissance P_{pv} du panneau

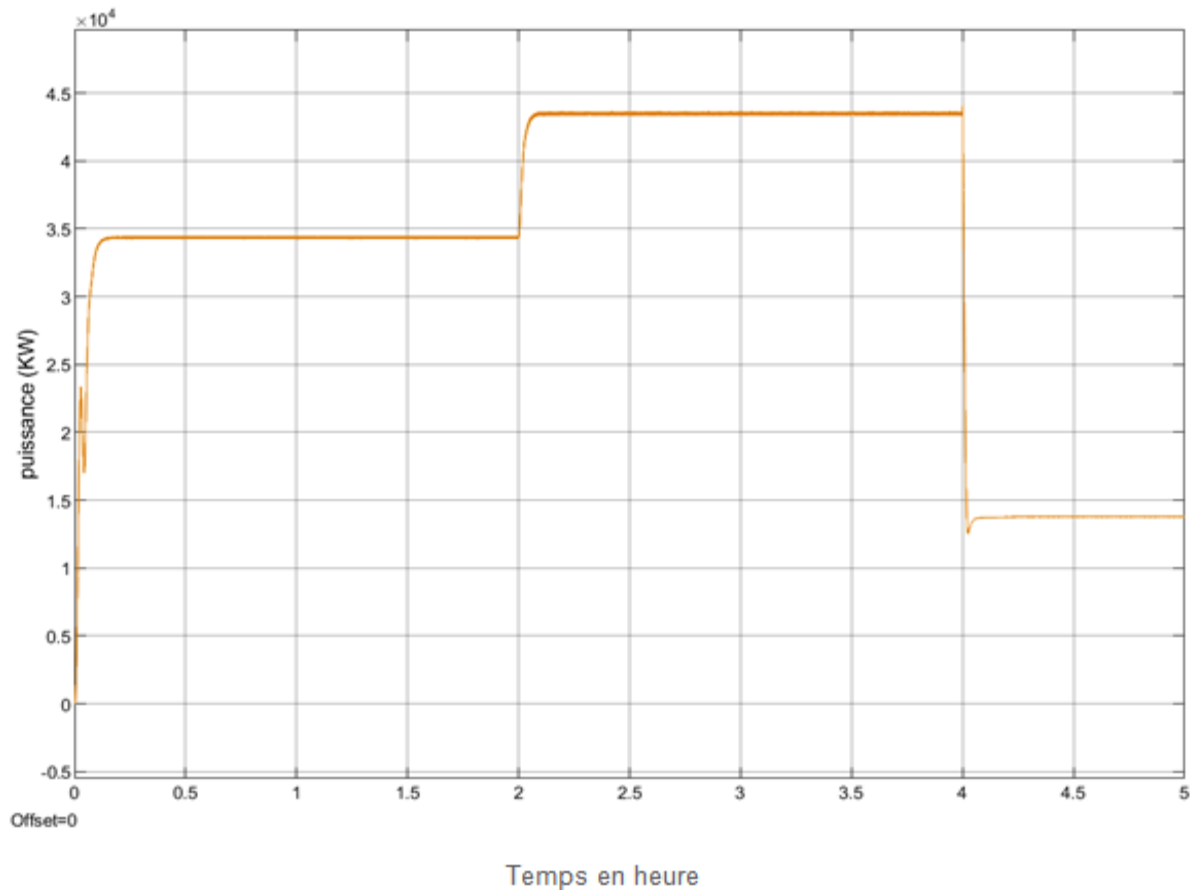
Figure IV.13 : Variation des caractéristiques du panneau pour un éclairement variable.



(a) : Variation du courant d'hacheur



(b) : Variation du Tension d'hacheur



(c) : Variation du puissance d'hacheur

Figure IV. 14: Variation des caractéristiques de le hacheur pour un éclairnement variable

Interprétation des résultats :

D'après les résultats obtenus :

- Une augmentation de la valeur de tension V_{pv} de 280V vers 420V et une diminution de la valeur de courant I_{pv} de 130A vers 82A et une conservation de la valeur de la puissance par le temps (34KW).
- On constate aussi l'absence d'ondulation et les oscillations.
- ❖ Alors par un étude comparative entre les deux méthodes (P&O et Inc) , la meilleure méthode proposé rapide d'utiliser est la méthode d'incrément car par cette méthode la précision s'améliore et elle effectue l'absence des perturbations à travers les signaux au tour du point maximal de la puissance MPP.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les deux différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale 'MPPT' sélectionnées pour la simulation qui sont : l'incrément de la conductance et la méthode perturbation et observation 'P&O' .

Chapitre V:

Systeme de pompage photolotaique

V.1 Introduction :

Dans nos jours, la demande d'eau est de plus en plus très importante, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile voir pratiquement impossible. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer, avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

V.2 Les pompes :

V.2.1 Définition :

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide (l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires, etc...). D'un point à un endroit voulu [30]. La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé. La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- Energie cinétique.
- Energie potentielle.
- Energie de pression.

C'est donc un appareil génère une différence de pression entre l'entrée et la sortie de la machine. L'énergie requise pour faire fonctionner une pompe dépend :

- Des propriétés du fluide : la masse volumique, la viscosité dynamique,
- Des caractéristiques de l'écoulement : la pression, la vitesse, le débit volume, la hauteur,
- Des caractéristiques de l'installation : la longueur des conduites, le diamètre et la rugosité absolue [30].

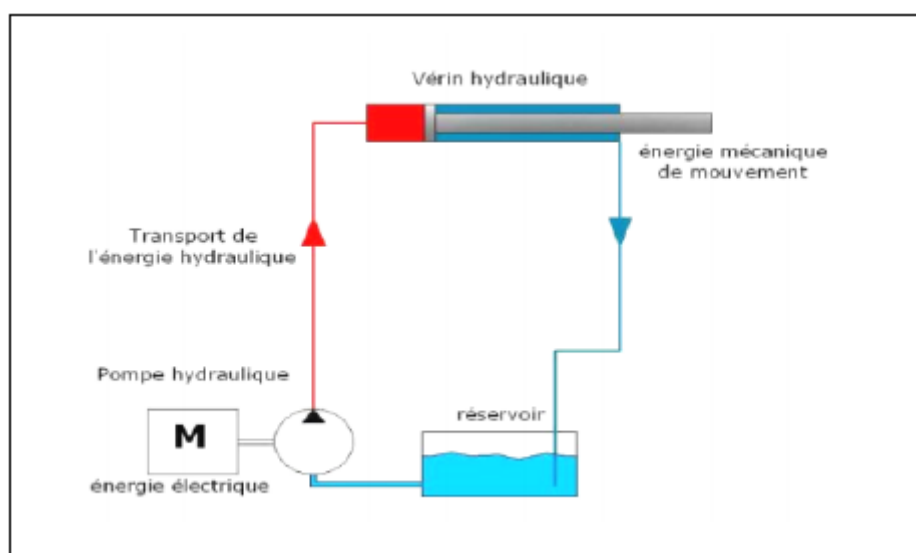


Figure V.1: schéma d'une pompe hydraulique

V.2.2 Classification des pompes :

Suivant les modes des déplacements des liquides à l'intérieur des pompes, on classe ces dernières en deux grandes familles :

- Les turbopompes,
- les pompes volumétriques.

L'utilisation d'un type de pompes ou d'un autre dépend des conditions d'écoulement du fluide. De manière générale, si on veut augmenter la pression d'un fluide on utilisera plutôt les pompes volumétriques, tandis que si on veut augmenter le débit on utilisera plutôt les pompes centrifuges [31].

Dans les turbopompes une roue, munie d'aubes ou d'ailettes, animée d'un mouvement de rotation, fournit au fluide de l'énergie cinétique dont une partie est transformée en pression, par réduction de vitesse dans un organe appelé récupérateur [31].

Dans les pompes volumétriques, l'énergie est fournie par les variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement (grand encombrement) [31].



Figure V.2: Pompe centrifuge



Figure V.3: Pompe volumétrique à disque excentré

V.2.3 Fonctionnement d'une pompe :

Le fonctionnement d'une pompe consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique de son moteur d'entraînement en énergie hydraulique [32].

V.2.3.1 Pompe volumétrique :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Ce déplacement est cyclique. Pendant un cycle, un volume de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé. Une pompe volumétrique est constituée :

- d'un corps fixe ou stator.
- D'un ou de plusieurs éléments mobile participant au déplacement de fluide à l'intérieur de la pompe.
- D'autres éléments mobiles destinés à mettre en mouvement les éléments précédents.

Pour ce type de pompe l'entrée et la sortie sont non communicantes grâce à une étanchéité Interne, ainsi les fluides seront minime et les pressions importantes.

Une pompe volumétrique fonctionne en prélèvement en un volume V_0 du fluide contenu dans la conduite d'arrivée pour l'emprisonner dans un espace avant de le pousser vers la sortie de pression. la dépression que se prélèvement provoque fait que le fluide se mettre en mouvement vers la pompe et fait de la pompe volumétrique une pompe auto-amorçant [32].

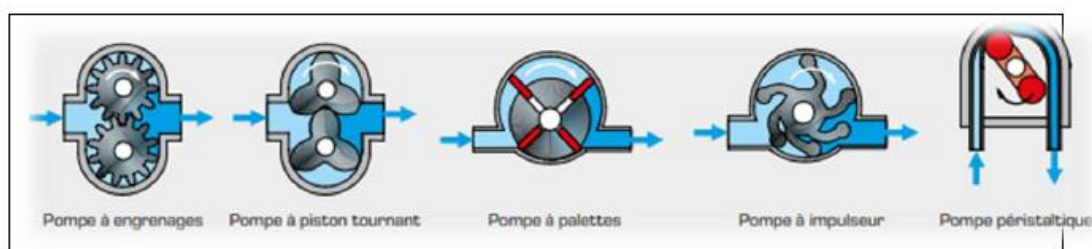


Figure V.4 : Fonctionnement de quelques types de pompe volumétrique [32]

V.2.3.2 Turbopompe :

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

- **L'aspiration :**

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor [31].

La pompe étant amorcée, c'est à dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage [31].

- **L'accélération :**

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression [31].

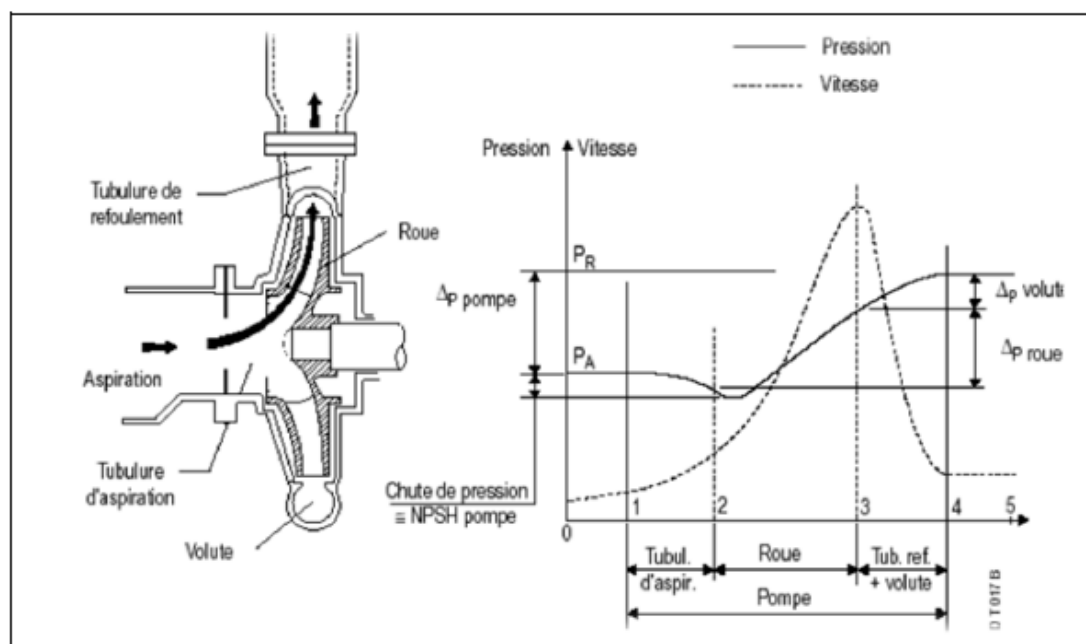


Figure V.5: évolution de la vitesse et de la pression dans la pompe [31]

V.2.4 Les caractéristiques d'une pompe :

- Les constructeurs fournissent les caractéristiques des pompes en fonction du débit (souvent en m^3/h) pour des conditions données (nature du liquide, vitesse du moteur pour une pompe centrifuge ou fréquence et course du piston pour une pompe à membrane).
- Une caractéristique de pompe dépend uniquement de la construction de la pompe.
- Les caractéristiques fournis sont la hauteur manométrique totale, la puissance consommée par le moteur (kW), le rendement et le N.P.S.H._{req.}
- La hauteur manométrique (Hmt) permet le choix de la pompe pour une courbe de réseau imposée.
- Le N.P.S.H._{req.} permet en fonction des caractéristiques du circuit d'aspiration de connaître la valeur limite de débit avec laquelle la pompe peut fonctionner sans risque de cavitation.
- Le rendement renseigne sur la zone de débit où le rendement est plus élevé : ainsi, il peut être économiquement avantageux de se placer à un débit plus faible (si bien sûr celui-ci n'est pas imposé par le procédé) en augmentant artificiellement la perte de charge sur le circuit de refoulement 'utilisation d'une vanne de réglage).
- La puissance consommée pour un débit donné permet de connaître le coût de fonctionnement de la pompe [33].

V.2.4.1 Les courbes caractéristiques de la pompe :

Une pompe est toujours fournie par le constructeur avec une série de courbes caractéristiques pour une vitesse de rotation donnée. On cite:

- Courbe caractéristique : Hauteur - Débit.
- Courbe caractéristique : Rendement, Puissance - Débit.
- Courbe caractéristique : NPSH – Débit [34].

a) Courbe caractéristique hauteur – débit :

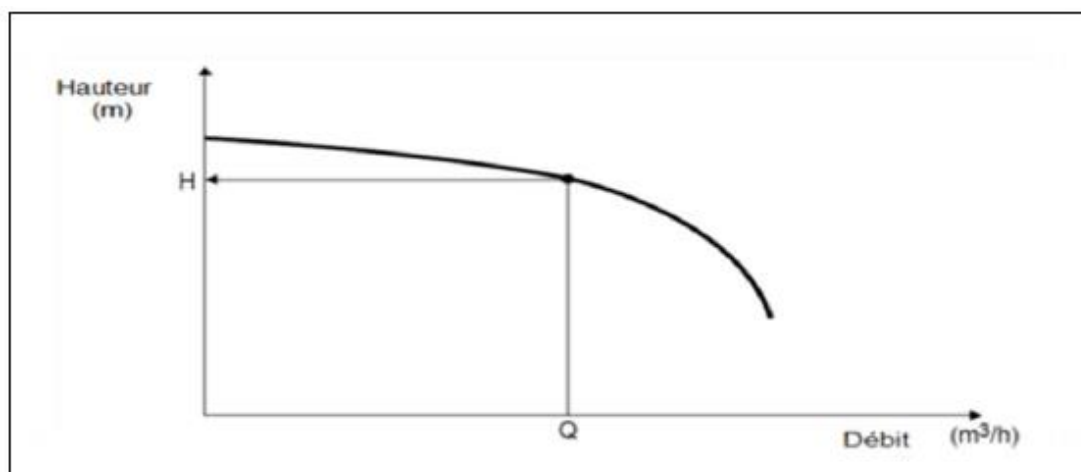


Figure V.6 : Courbe caractéristique hauteur en fonction du débit [34]

b) Courbe caractéristique : rendement, puissance-débit :

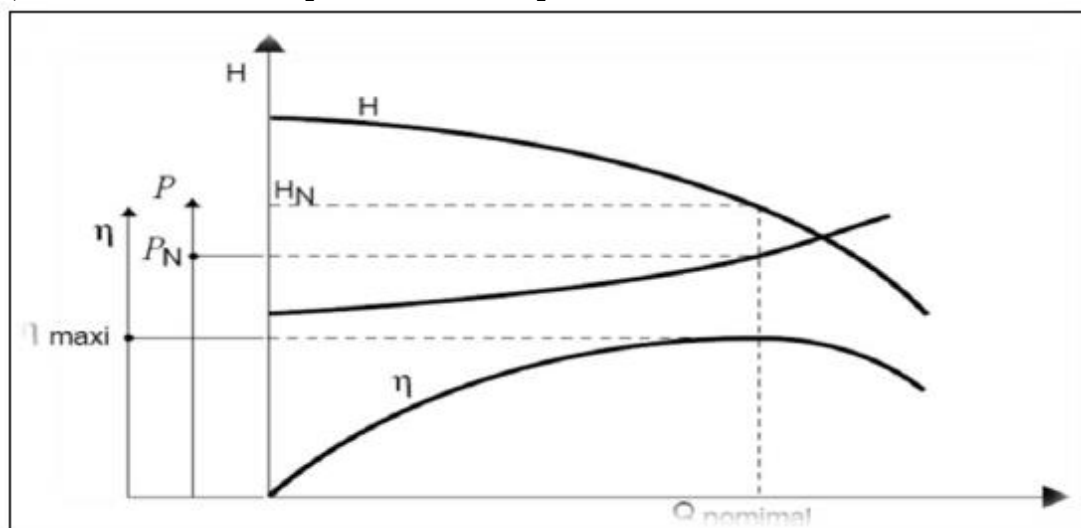


Figure V.7: Courbes caractéristiques : rendement et puissance en fonction de débit [34].

c) Courbe caractéristique : NPSH-Débit :

Le **NPSH** est la hauteur totale de charge à l'entrée de la pompe.

NPSH: (net positive section head), abbreviation anglaise.

Le **NPSH** est défini comme étant la charge minimale requise à l'entrée de la bride d'aspiration pour assurer le fonctionnement correct de la pompe ; il s'agit du NPSH requis. L'installation devra mettre à la disposition de la pompe au niveau de la bride d'aspiration, une charge au moins égale à celle requise ; il s'agit du NPSH disponible [34].

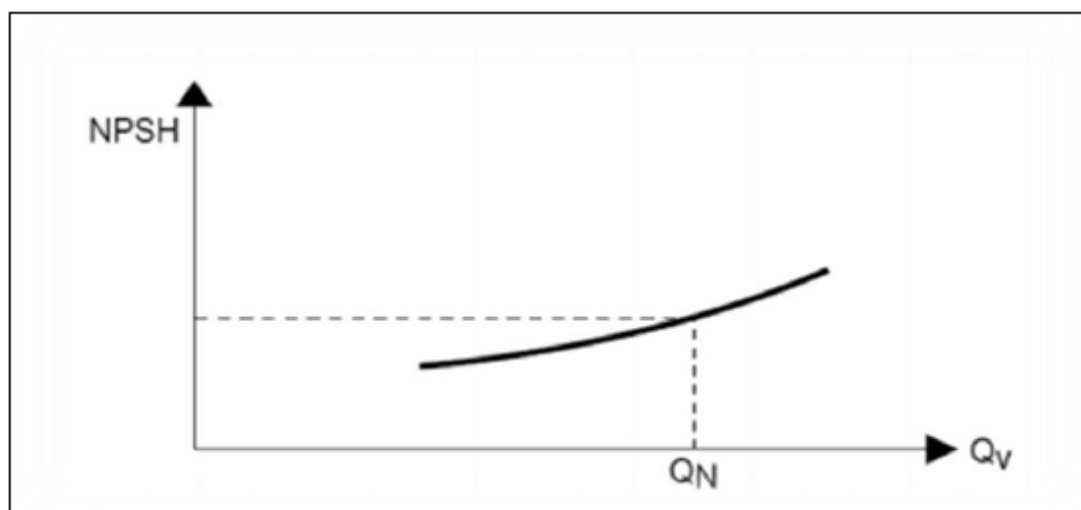


Figure V.8 : Courbes caractéristiques de NPSH en fonction de débit [34].

V.3 Moteur DC :

V.3.1 Définition :

Les machines à courant continu sont des convertisseurs d'énergie électromécaniques. Ils convertissent l'énergie électrique qu'ils absorbent en énergie mécanique (fonctionnement moteur). Lorsqu'elles sont soumises à une charge entraînant, ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique (fonctionnement générateur) [35].

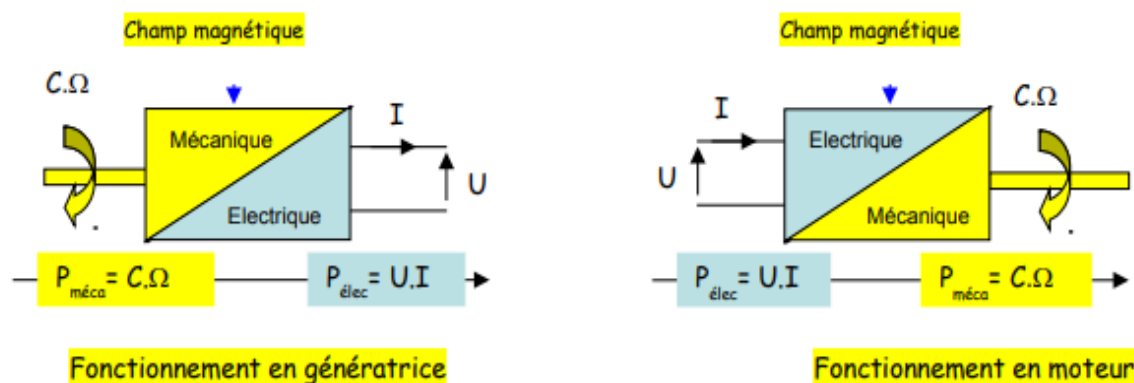


Figure V.9 : Différents types de fonctionnement du MCC

V.3.2 Constitution :

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :

- L'inducteur
- L'induit
- Le collecteur et les balais

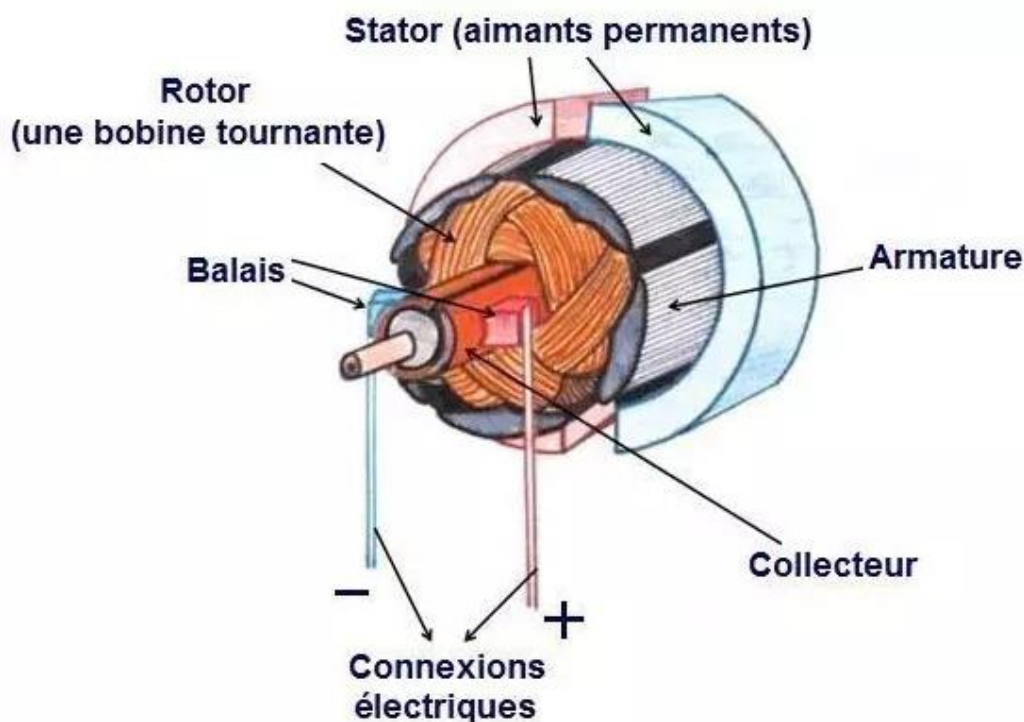


Figure V.10 : moteur à courant continu

V.3.2.1 L'inducteur (ou circuit d'excitation):

L'inducteur est la partie fixe du moteur, il est constitué

- **Pôles principaux**

Destinés à créer le flux magnétique principal, qui peuvent être constitués d'aimants permanents ou de pièces polaires associées des enroulements inducteurs par un courant continu [36].

- **Pôles auxiliaires**

Ils sont placés entre les pôles principaux selon les axes inter polaires dits axes neutres, le flux qu'ils produisent améliore la commutation. Ils réduisent les étincelles aux balais, ces étincelles étant produites par le renversement du sens de courant dans les sections court circuits par les balais. L'enroulement de ces pôles est en série avec l'enroulement d'induit [37].



Figure V.11 : l'inducteur de la machine à courant continu

V.3.2.2 L'induit (circuit de puissance):

C'est la partie mobile. il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu. Elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer. Espace séparant la partie fixe et la partie mobile.



Figure V.12 : L'induit de la machine à courant continu

V.3.2.3 Le collecteur et les balais:

- **Collecteur:**

Le collecteur est le constituant critique des machines à courant continu. C'est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit. Le collecteur a pour fonction d'assurer la commutation du courant d'alimentation dans les conducteurs de l'induit [38].

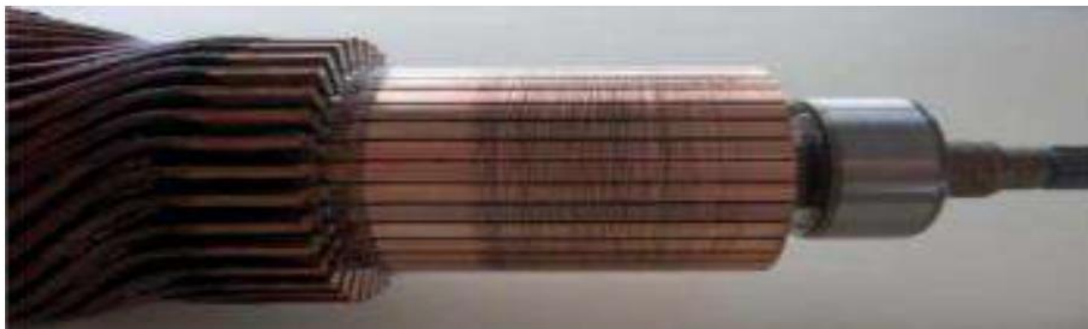


Figure V.13 : Collecteur

- **Balai:**

Fixés sur la carcasse par le biais de portes balais, ils sont en carbone ou en graphite permettent l'alimentation de l'induit (partie en rotation) grâce à un contact glissant entre les lames du collecteur reliées aux conducteurs de l'induit et le circuit électrique extérieur. Ils sont constitués de petits cubes ayant une surface de contact de quelques mm² à quelques cm², en graphite pur ou en alliage, qui doivent résister à des conditions d'utilisation sévères (courants élevés, températures élevées, frottements, arc, atmosphères chargées ou très sèches).

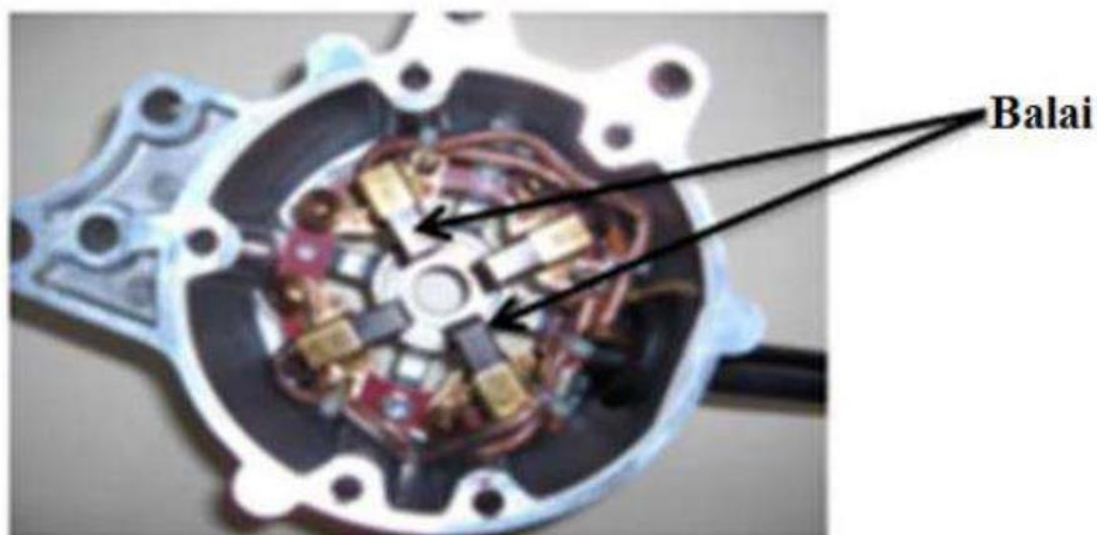


Figure V.14 : Balai

V.3.3 Principe de fonctionnement en moteur:

Le fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace. Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique. Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit : Chacun des (N) conducteurs de longueur (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = B.I.L. \sin \alpha \quad (V.1)$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (G) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (G).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit :

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation [39].

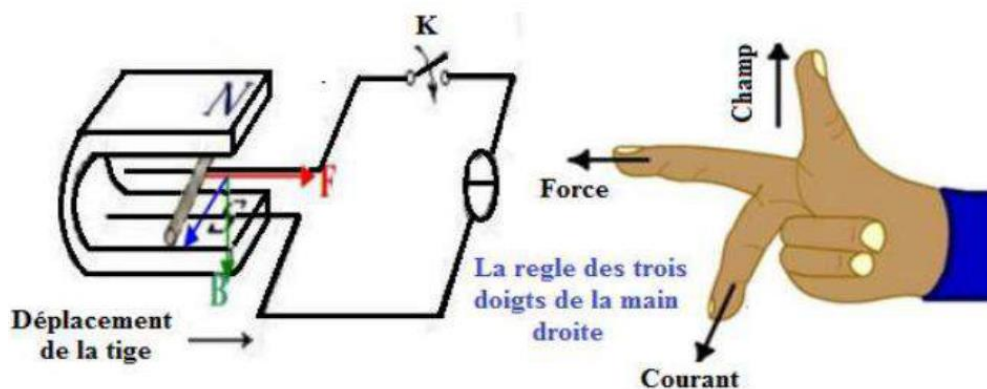


Figure V.15 : Loi de Laplace.

V.3.4 Force contre électromotrice:

La force contre électromotrice f.c.e.m (E) est la tension produite par le rotor (l'induit) lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe (l'inducteur). Elle dépend des éléments de construction de la machine.

$$E = \frac{P}{a} N \cdot n \cdot \varphi \quad (V.2)$$

P : nombre de pair de pôles de la machine.

α : nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

N : nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit

n : fréquence de rotation de l'induit (en tr/s).

φ : flux sous un pôle de la machine en Webers.

Finalement :

$$E = K \cdot \omega \cdot \varphi \quad (V.3)$$

Avec :

$$K = \frac{P}{2\pi \cdot a} \cdot N \quad (V.4)$$

V.3.5 Différents types de moteurs selon l'inducteur:

On distingue deux types de moteurs à courant continu

V.3.5.1 Moteurs à inducteur à aimant permanent:

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micro-moteurs sont des moteurs à aimant permanent.

Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples à l'utilisation [36].

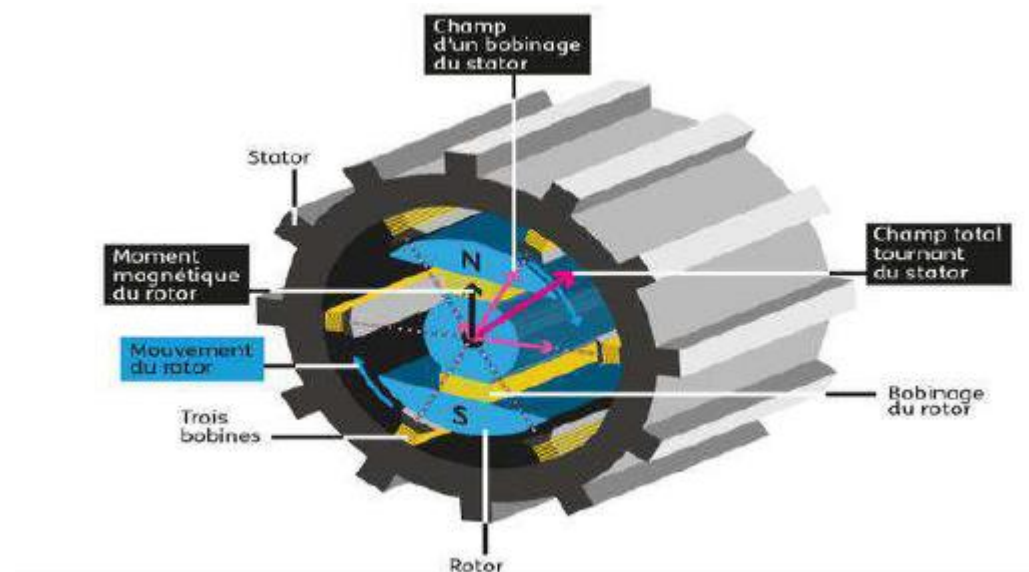


Figure V.16 : Moteur à aimant permanent

V.3.5.2 Moteurs à inducteur bobiné :

V.3.5.2.1 Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu :

L'inducteur d'un moteur à courant continu peut être branché de diverses façons. La machine est à excitation séparée (ou indépendante) quand l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes.

La machine est à excitation liée, lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés à partir de la même source. Quatre possibilités existent alors [40] :

- L'excitation parallèle (ou shunt).
- L'excitation série.
- L'excitation composée.
- L'excitation séparée.

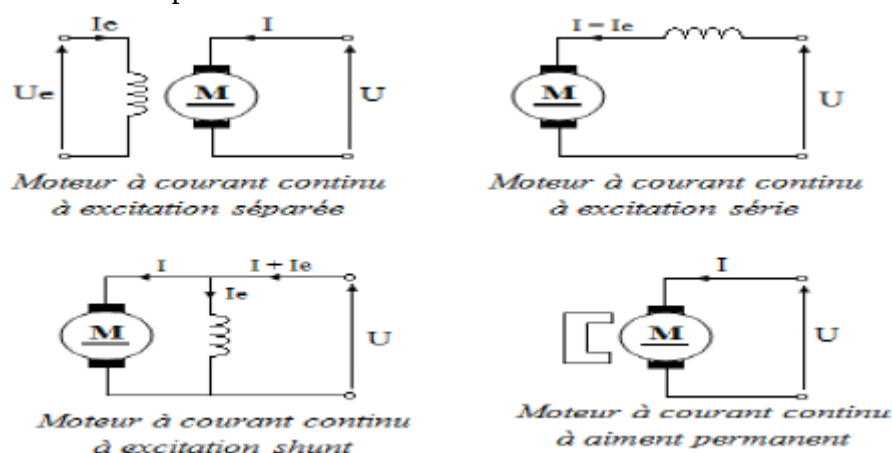


Figure V.17: Différents modes d'excitations

➤ Moteur à excitation série:

Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit.

Le flux n'est plus constant mais proportionnelle à (I).

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la fréquence (n) de rotation et de l'intensité du courant (I).

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) et au courant (I) d'alimentation du moteur.

Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes),

la puissance électrique absorbée est :

$$Pa = V \cdot I \quad (V.5)$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$Pu = Tu \cdot \Omega = Tu \cdot 2\pi \cdot n \quad (V.6)$$

Si (n) est proportionnelle à (V) et à (I) cela signifie que (Tu) est proportionnel au carré de l'intensité (I²).

Donc le couple (T_u) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation du moteur. Pour un moteur à excitation série, le flux (Φ) n'est pas constant mais proportionnel à (I) donc la tension d'alimentation (V) est proportionnelle à la fréquence de rotation n et à l'intensité(I) [35]:

$$E = K.n.N.\varphi = K.\Omega.I \quad (V.7)$$

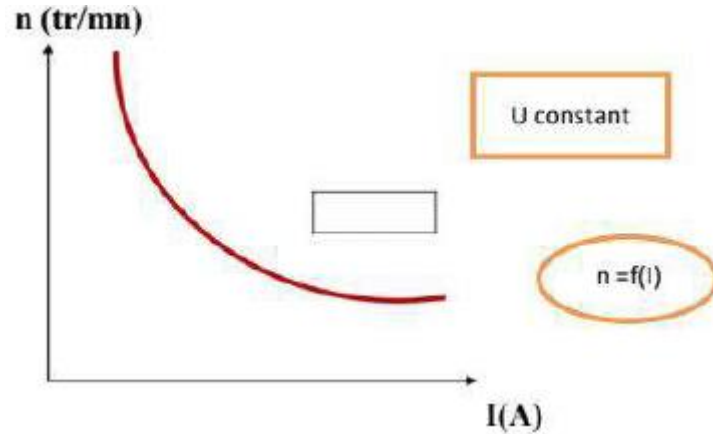


Figure V.18 : Caractéristique de vitesse d'un moteur série [35].

Et le couple (T) est proportionnel au carré de l'intensité du courant d'alimentation (I).

$$T = \frac{E.I}{\Omega} = K.I^2 \quad (V.8)$$

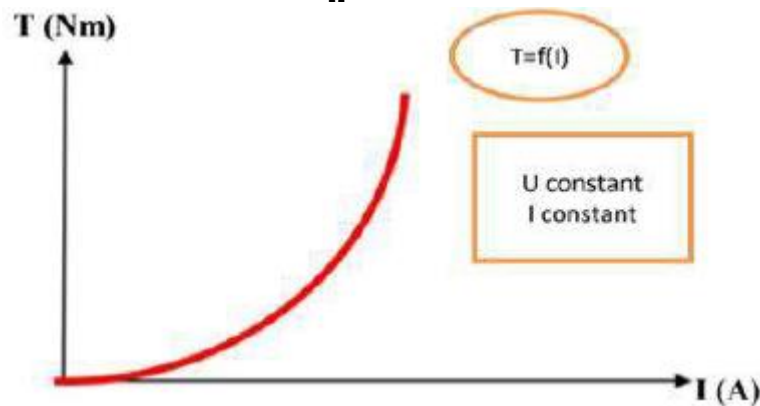


Figure V.19 : Caractéristique de couple d'un moteur série [35].

Remarque:

Le moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide car si

$$I \rightarrow 0, \omega \rightarrow \infty \quad (V.9)$$

La machine risque l'emballement.

• **Domaine d'application et Caractéristiques:**

Caractéristiques	Domaine d'application
- Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation.	-engins de levage (grues, palans, ponts roulants).
-Le couple résistant croît rapidement avec la	-ventilateurs.
	- pompes centrifuges.
	- traction.

vitesse. - La vitesse décroît quand la charge augmente. -Supporte bien les surcharges. -L'inducteur connecté en série avec l'induit. -Le moteur série est un autorégulateurs de puissance. -possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballement à vide.	
--	--

Tableau V.1 : Domaine d'application et caractéristiques du MCC à excitation série[38]

➤ **Moteur à excitation shunt:**

L'enroulement d'excitation shunt est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit) [40].

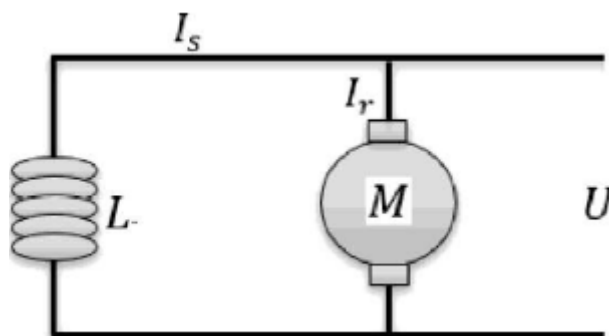


Figure V.20: Schéma de MCC à excitation shunt

• **Domaine d'application et Caractéristiques :**

Caractéristiques	Domaine d'application
-Vitesse constante quel que soit la charge. - Le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse. -L'inducteur et l'induit sont branchés en parallèle.	-Machines-outils, appareil de levage (ascenseur).

Tableau V.2: Domaine d'application du MCC à excitation shunt

➤ **Moteur à excitation Composée:**

Le moteur à excitation composé, est à raccorder à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps [40] .

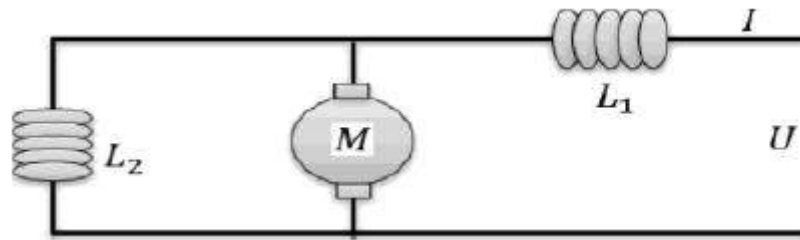


Figure V.21 : Schéma de MCC à excitation composée.

- **Domaine d'application et Caractéristiques[38]:**

Caractéristiques	Domaine d'application
-l'induit est divisé en deux parties l'une connectée en série et l'autre en parallèle.	-petit moteur à démarrage direct.
-entraînement de grande inertie	-ventilateur
-couple très variable avec la vitesse.	-pompes
	-machines de laminoirs
	-volants d'inertie

Tableau V.3 : Domaine d'application du MCC à excitation composée.

- **Moteur à excitation séparée[41]:**

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit. Si l'inducteur est un aimant permanent, le flux (Φ) est constant. Si l'inducteur est un électroaimant alimenté par une source de tension continue réglable, le flux (Φ) ne dépend que du courant dans l'inducteur appelé courant d'excitation (I_e).

Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension (V_e) est constante, le courant d'excitation (I_e) est constant et le flux (Φ) est constant.

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) ne dépend que de la fréquence (n) de rotation.

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes), la puissance électrique absorbée est :

$$Pa = V \cdot I \quad (V.10)$$

Et la puissance mécanique fournie est :

$$Pu = Tu \cdot \Omega = Tu \cdot 2\pi \cdot n \quad (V.11)$$

Si (V) est proportionnelle à (n) cela signifie que (Tu) est proportionnel à (I).

Donc le couple utile (Tu) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation du moteur.

Pour un moteur à excitation séparée, le flux (Φ) est constant donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension d'alimentation (V) :

$$n = \frac{E}{K\phi} = V - \frac{R.I}{K\phi} = K.V \quad (V.12)$$

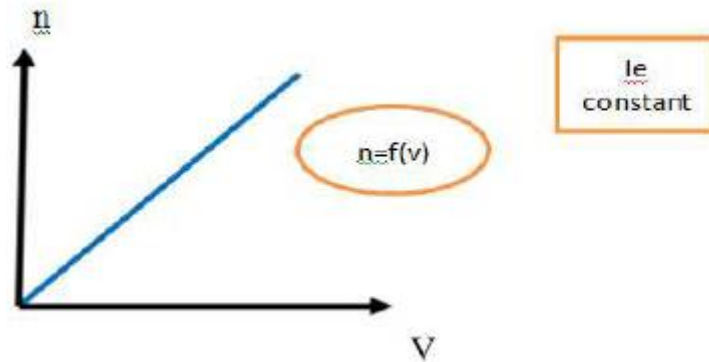


Figure V.22: Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée [35].

Et le couple (T_u) est proportionnel à l'intensité du courant d'alimentation (I) :

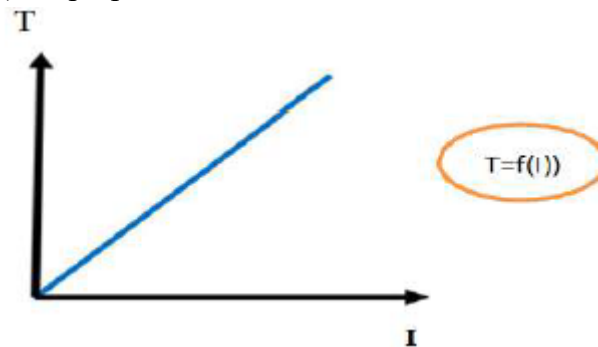


Figure V.23: Le couple en fonction de courant d'alimentation [35].

- Régime transitoire (pour l'induit)

L'équation électrique :

$$Ua(t) = Ra.Ia(t) + La \frac{dIa(t)}{dt} + e(t) \quad (V.13)$$

$$e(t) = Ke.\omega(t) \quad (V.14)$$

- Régime permanent (pour l'induit)

Équation électrique à l'induit :

$$U = e + R.Ia \quad (V.15)$$

Équation électrique à l'inducteur :

$$U = r.ie \quad (V.16)$$

L'équation mécanique :

$$J \frac{dn}{dt} = Cm(t) - Cf(t) - Cr(t) \quad (V.17)$$

$$Cm(t) = Kc.I(t) \quad (V.18)$$

$$Cf(t) = a.\omega(t) \quad (V.19)$$

Avec les notations suivantes:

U : tension aux bornes de l'induit en V

e : tension aux bornes de l'inducteur en V

I : courant dans l'induit en A

R : résistance aux bornes de l'induit en Ω

r : résistance aux bornes de l'inducteur en Ω

E : force électro-motrice en V

J : moment d'inertie en kg.m^2

C_f : couple de frottement en N.m

a : coefficient de frottement visqueux en $\text{m.N.rad}^{-1}.\text{s}$

C_m : couple moteur en N.m C_r : couple résistant en N.m

K_e : constante de f.e.m en V/rad/s K_c : constante de couple en N.m/A

m : pulsation de rotation du moteur en rad.s^{-1}

- **Domaine d'application et Caractéristiques[38]:**

Caractéristiques	Domaine d'application
-Large gamme de vitesse. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement. -Grande souplesse de commande. -L'inducteur est alimenté par une source indépendante.	-Machines spéciales. -moteur de broche, d'axe. -Machines-outils.

Tableau V.4: Domaine d'application du MCC à excitation séparée

V.3.6 Variation de vitesse :

Pour modifier la vitesse d'un moteur à courant continu, on peut appliquer une tension aux bornes de l'induit. La tension d'induit est proportionnelle à la vitesse de rotation. La puissance change mais le couple reste le même. On dit alors que l'on effectue une variation de vitesse à couple constant.

V.3.7 Les avantages et les inconvénients :

- **Les avantages:**

- Alimentation aisée dans les systèmes transportant leur réserve d'énergie (autonome) : pile ou batterie.
- La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser.

- **Les inconvénients :**

- Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif.
- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus les balais doivent appuyer fort pour rester en contact et plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les charbons doivent être remplacés très régulièrement.
- Le contact électrique imparfait cause des arcs électriques, usant rapidement le commutateur et générant des parasites dans le circuit d'alimentation.

- Pour des fonctionnements en moteur de petite puissance, ce problème peut être résolu grâce à la technologie du moteur à courant continu sans balai communément appelé moteur brushless. Un dispositif d'électronique de puissance remplace l'ensemble balai collecteur. La position du rotor est détectée par des capteurs à effet Hall et le courant est commuté par des transistors à effet de champ [37].

V.3.8 Bilan de la puissance :

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue [42].

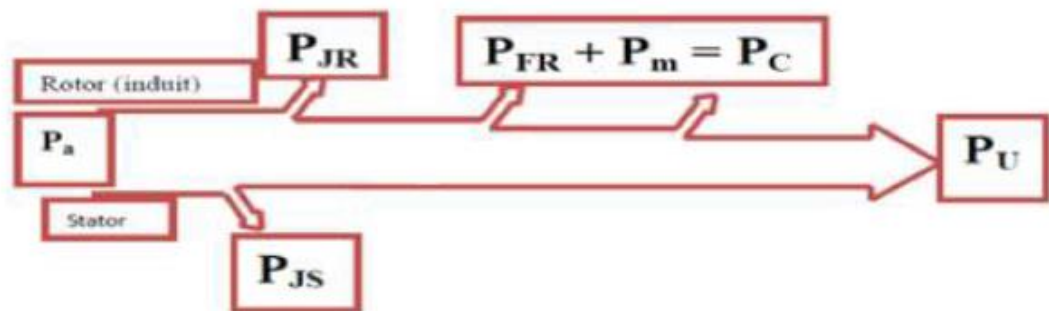


Figure V.24: Bilan de la puissance

P_a : Puissance absorbée.

P_u : Puissance utile.

P_{JS} : Pertes par effet joule dans l'inducteur.

P_{JR} : Pertes par effet joule dans l'induit.

P_C : Pertes fer + pertes mécaniques.

V.3.9 Le rendement :

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (V.20)$$

P_u : Puissance utile.

P_a : Puissance absorbée.

V.3.10 Utilisation de la machine à courant continu:

Le moteur série est intéressant quand la charge impose d'avoir un gros couple, au démarrage et à faible vitesse de rotation.

Le moteur sépare est particulièrement adapté aux entraînements de machines nécessitant des vitesses réglables (action sur la tension) et présentant un couple important en basse vitesse (machines outils).

- démarreur (automobile ...).
- moteur de traction (locomotive, métro ...).
- appareils de levage.
- Ventilateurs, pompes centrifuges, compresseurs, pompes à piston.
- Machines-outils à couple variable ou à mouvement alternatif (étaux limeurs, raboteuses).

V.4 Batterie :

Les batteries sont des accumulateurs d'énergie, ont une durée de vie et un nombre de cycles prédéterminés à l'avance par le climat (température ambiante) et par le type d'utilisation que l'on va en faire (profondeur de décharge). Le coût de l'investissement et le coût induit par leur durée de vie, vont dépendre de leur qualité de fabrication et du type de technologie [43].

V.4.1 Les deux principales caractéristiques des batteries :

Pour toutes les batteries, quel que soit le type de fabrication, elles ont deux caractéristiques communes:

- **Leur tension**, exprimée en Volts (V) : dans le photovoltaïque, elle est généralement de 12 V pour les petites batteries rechargeables qui ont une durée de vie d'environ 5 ans. Pour les éléments plus importants avec des tensions de 12, 24 ou 48 V, on utilise des éléments séparés de 2 V, prévus pour être assemblés en série, et qui ont une durée de vie d'environ 10 ans.
- **Leur capacité** en Ampères heures (Ah) : Pour l'augmenter, on doit brancher plusieurs batteries en parallèle. En multipliant la tension par la capacité, on obtient la quantité d'électricité emmagasinée, en kWh [43]

V.4.2 Les différents types de batteries :

Batteries au plomb : Les batteries au plomb fermées avec un électrolyte gélifié. Elles ont l'avantage d'être sans entretien, facilement manipulable (pas de fuite) avec une stabilité parfaitement contrôlée par le fabricant. Elles ont les inconvénients d'être plus chères et d'avoir une durée de vie plus courte. Elles fournissent en général environ 400 cycles à 80 % de décharge.

Batteries au nickel : Les NiMH ont une grande densité énergétique et peuvent être complètement déchargée sans porter préjudice à leur durée de vie. Elles ont l'inconvénient d'être de faible capacité. Elles fournissent en général entre 500 et 700 cycles à 80 % de décharge.

Batteries au Lithium : Elles sont réservées aux systèmes photovoltaïques portables où leur grande capacité de décharge (six fois mieux que le plomb étanche) est leur grand intérêt. Leur prix est encore prohibitif mais, elles fournissent en général, environ 1 300 cycles à 100 % de décharge.

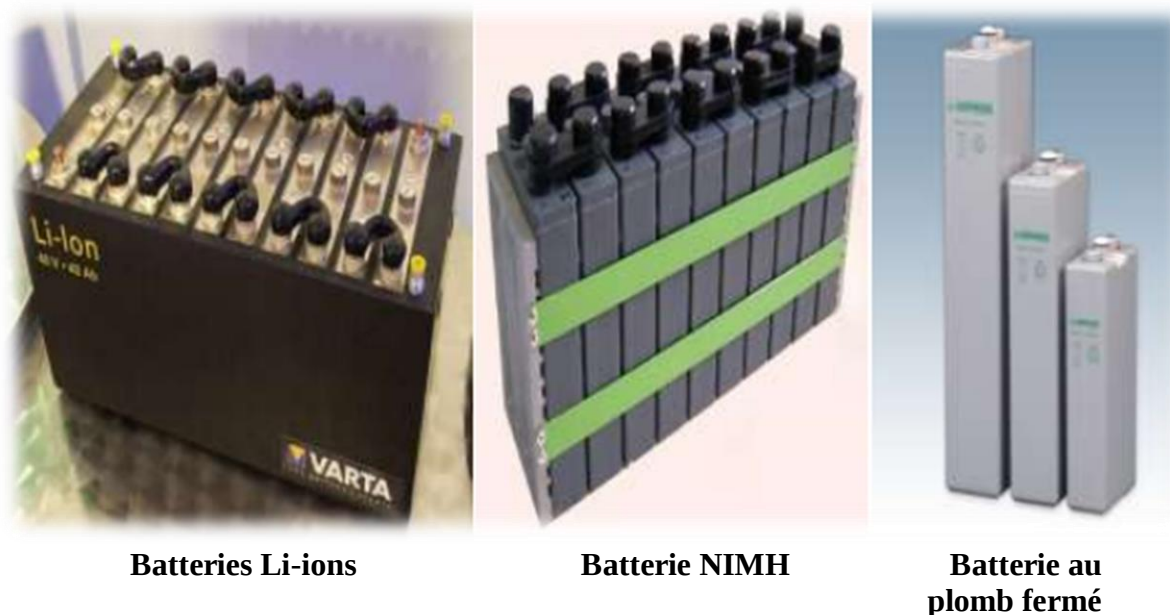


Figure V.25: types de batteries

V.4.3 Les avantages :

- Les panneaux solaires photovoltaïques présentent un certain nombre d'avantages :
- Cette énergie renouvelable est gratuite. Elle n'est pas taxée et n'engendre pas de rejets dans l'environnement tout au long de son utilisation.
- L'énergie photovoltaïque est modulable et permet de répondre à tous les besoins.
- Les panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés aussi bien en ville qu'à la campagne.
- La vente du surplus de production permet aux propriétaires d'amortir les investissements réalisés lors de l'installation.
- Les panneaux résistent aux intempéries et au froid.
- Les panneaux ont une durée de vie de 20 à 35 ans.

V.4.4 Les inconvénients

Bien que les panneaux solaires photovoltaïques présentent de nombreux avantages, ils ont aussi leurs inconvénients :

- Un investissement important lors de leur installation. Exemple : 14 000 € pour des panneaux de 3 000 watts.
- Depuis la suppression du crédit d'impôt, le retour sur investissement est rallongé de 9 à 18 mois .
- L'onduleur doit être remplacé au bout de 10 ans et les panneaux au bout de 25 à 35ans.
- Les démarches administratives pour installer des panneaux photovoltaïques sont longues, environ 2 à 6 mois et même un an en cas de difficultés de raccordement.
- En métropole, la production d'électricité se limite à 1 300 heures par an [44].

V.5 Conclusion :

Le système de pompage photovoltaïque offre une solution efficace et durable pour répondre aux besoins en eau dans les régions éloignées et les zones où l'accès à l'électricité est limité. Ce chapitre a examiné les principaux aspects de ce système, mettant en évidence ses avantages et son fonctionnement.

Chapitre VI: Dimensionnement et simulation du Système de pompage photovoltaïque

VI.1 Introduction :

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque dans un champ isolé est une étape cruciale pour garantir son bon fonctionnement et son efficacité. Il s'agit d'évaluer les besoins en eau, la disponibilité de la ressource solaire, les caractéristiques du site et les contraintes techniques afin de concevoir un système adapté.

Ce chapitre se propose d'explorer les différentes étapes et considérations impliquées dans le dimensionnement d'un tel système. Nous aborderons les aspects techniques, tels que la puissance requise, le choix des composants, ainsi que les aspects pratiques, tels que la gestion de l'eau, la maintenance et la durée de vie du système.

En comprenant les principes fondamentaux du dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, nous serons en mesure de concevoir des installations efficaces, durables et adaptées aux besoins spécifiques des champs isolés. Ce chapitre vise donc à fournir les connaissances et les outils nécessaires pour contribuer à l'essor de l'énergie solaire photovoltaïque dans le domaine de l'approvisionnement en eau.

VI.2 Description du site :

Le site isolé d'irrigation choisi pour cette étude est situé au cœur d'une région rurale reculée. Le principal défi de ce site est l'absence d'accès à l'électricité du réseau conventionnel. Cela nécessite donc une solution d'irrigation autonome et durable. C'est là qu'intervient le système de pompage photovoltaïque. Le site est idéalement situé pour tirer parti de l'énergie solaire abondante tout au long de l'année.

Le système de pompage photovoltaïque est équipé de capteurs et de contrôleurs intelligents.

Ce site représente un exemple concret de l'utilisation efficace de l'énergie solaire pour répondre aux besoins en eau des exploitations agricoles dans des régions éloignées. Il démontre les avantages économiques, environnementaux et sociaux d'un système de pompage photovoltaïque.



Figure VI.1 : Description du site de pompage photovoltaïque

VI.3 Sélection des composants du système :

Les composants essentiels du notre système de pompage sont :

- Panneaux solaires ;
- Hacheur boost avec commande MPPT;
- Batteries ;
- Moteur à courant continu a excitation shunt ;
- Pompe centrifuge.

VI.4 Évaluation des besoins en eau :

Débit : Le besoin en eau du site est de 50 m^3 , une pompe centrifuge dont la vitesse de rotation est : $\omega = 21 \text{ rad/s} = 200.64 \text{ tr/min}$
et le couple est : $C_r = 110 \text{ N.m}$.

Le besoin horaire du client est : $Q_h = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ donc la pompe fonctionne 4 h pour remplir le réservoir en plein en été et $Q_h = 8.33 \text{ m}^3/\text{h}$ donc la pompe fonctionne 6 h pour remplir en hiver.

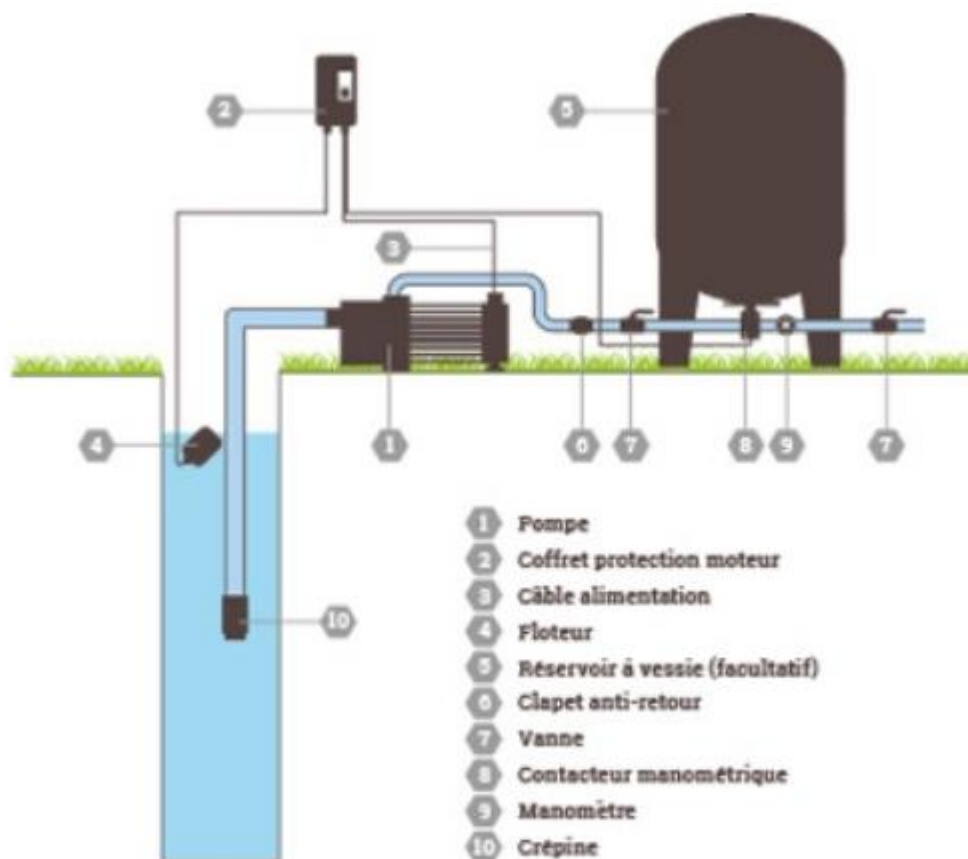


Figure VI.2 : Besoin en eau

VI.5 Calcul de la puissance requise :

Pour faire fonctionner la pompe il est nécessaire d'assurer :

$$C_{em} \geq C_r, C_{em} - C_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (\omega = \text{cste})$$

Donc on doit choisir un moteur de caractéristiques suivantes :

$$P = 45 \text{ Kw}$$

$$I = 129 \text{ A}$$

$$U = 350 \text{ V}$$

Caractéristiques de fonctionnement de moteur :

$$P = 40 \text{ kW}$$

$$I = 125 \text{ A}$$

$$U = 324,7 \text{ V}$$

$$C_{em} \approx 110 \text{ N.m}$$

VI.6 Estimation de la production d'énergie solaire :

On choisit un profil d'éclairement suivant et cela pendant dix heures de la journée :

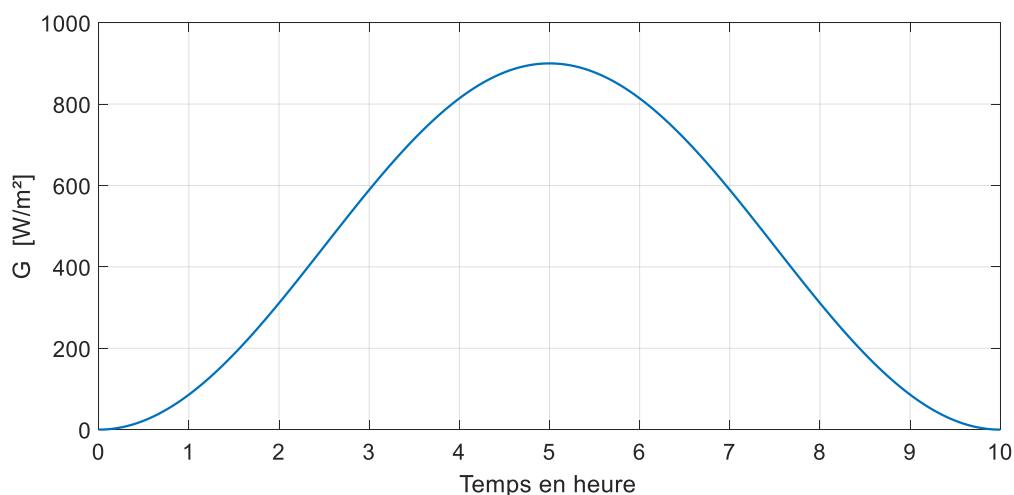


Figure VI.3 : Profil d'éclairement

Dans les conditions nominales ($G = 1000 \text{ W/m}^2$), un seul panneau produit une puissance :
 $P = 305 \text{ W}$

$$\text{Donc : } 33 \times 5 = 165 \text{ PV}$$

$$P_{pv \text{ max}} = 45 \text{ Kw}$$

$$I_{\text{hacheur}} = \frac{P_{pv \text{ max}}}{V_{\text{moteur}}} = \frac{45000}{324,7} = 138,58 \text{ A}$$

VI.7 Dimensionnement des batteries de stockage :

- Charge max : 13Kwh
- Décharge max : 41 Kwh
- Pourcentage de la charge : $\frac{13}{41} \times 100 \% = 31.7 \%$
- On a des batteries de 24V , moteur 324,7V
Donc $\frac{324.7}{24} = 13.57$
Donc on a besoin de 14 batteries de 24V dont la tension est : $24 \times 14 = 336V$
- Energie max de batteries : $E = V.I.t = P.t = 41 \text{ Kwh}$
 $\frac{41.10^3}{14} = 2.92 \text{ Kwh par batterie}$
- Sachant que la tension d'une batterie est 24 V
 $I.t = \frac{2.92 \text{ Kw}}{24V} = 121.66 \text{ Ah}$
Donc on achète des batteries normalisées de 160Ah

VI.8 Simulation :

A fin d'assurer un fonctionnement fiable et efficace et un bon dimensionnement de notre installation de pompage photovoltaïque, on utilise le MATLAB-SIMULINK pour réaliser la simulation suivante :

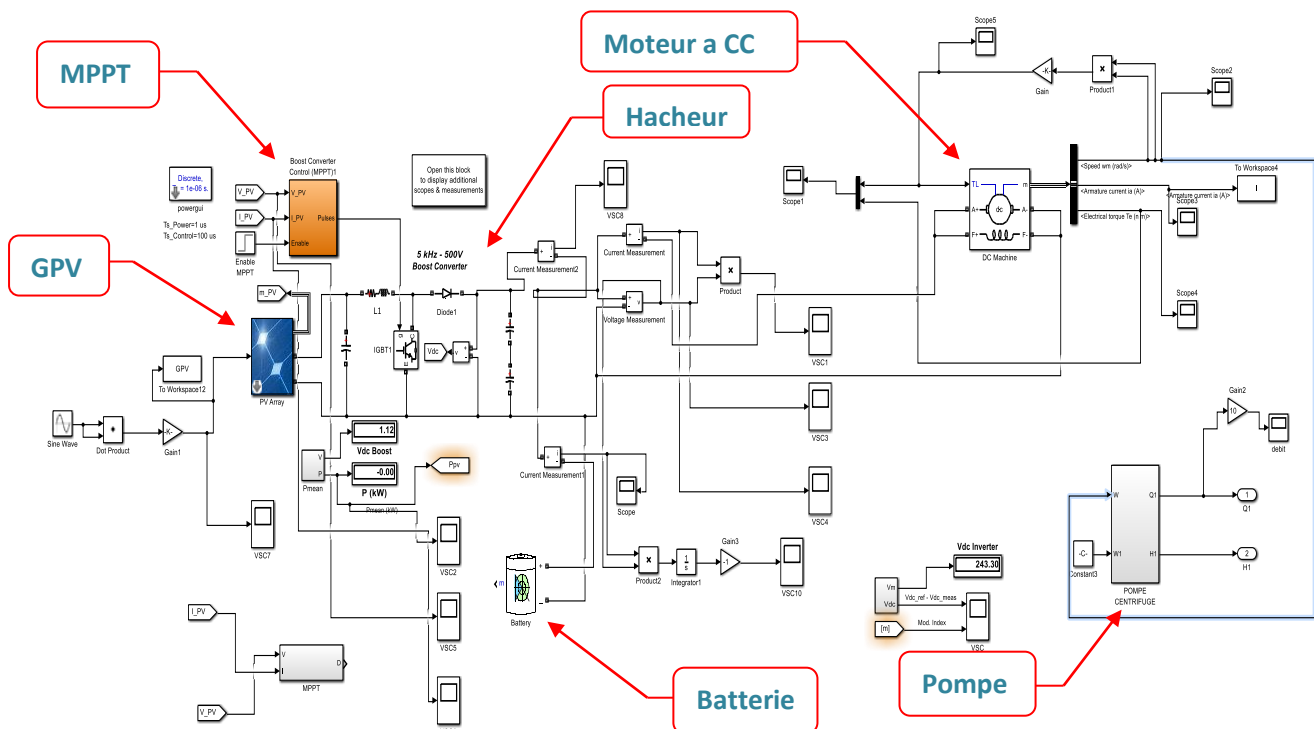
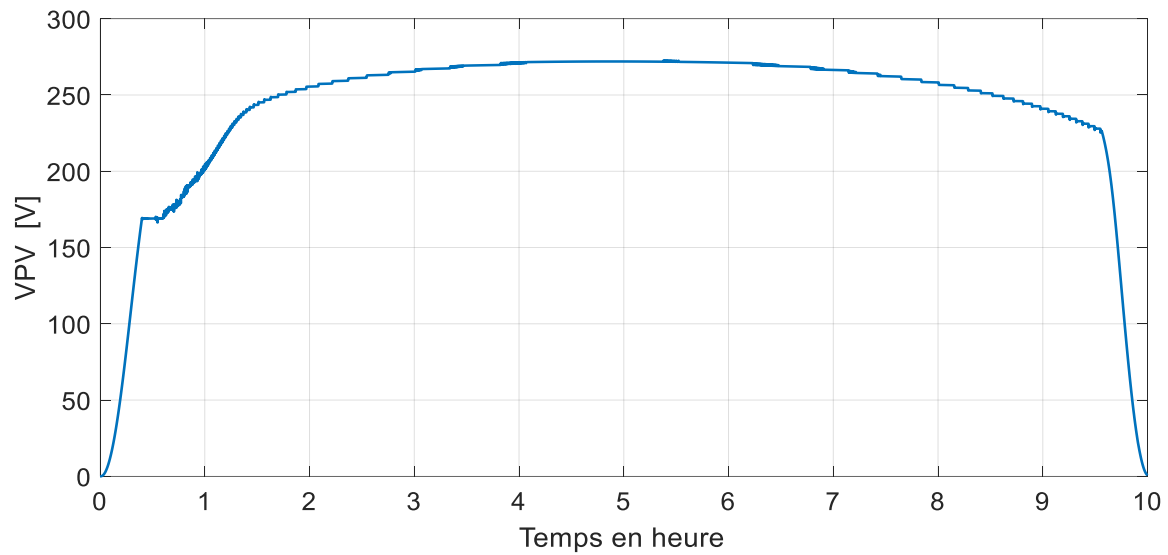
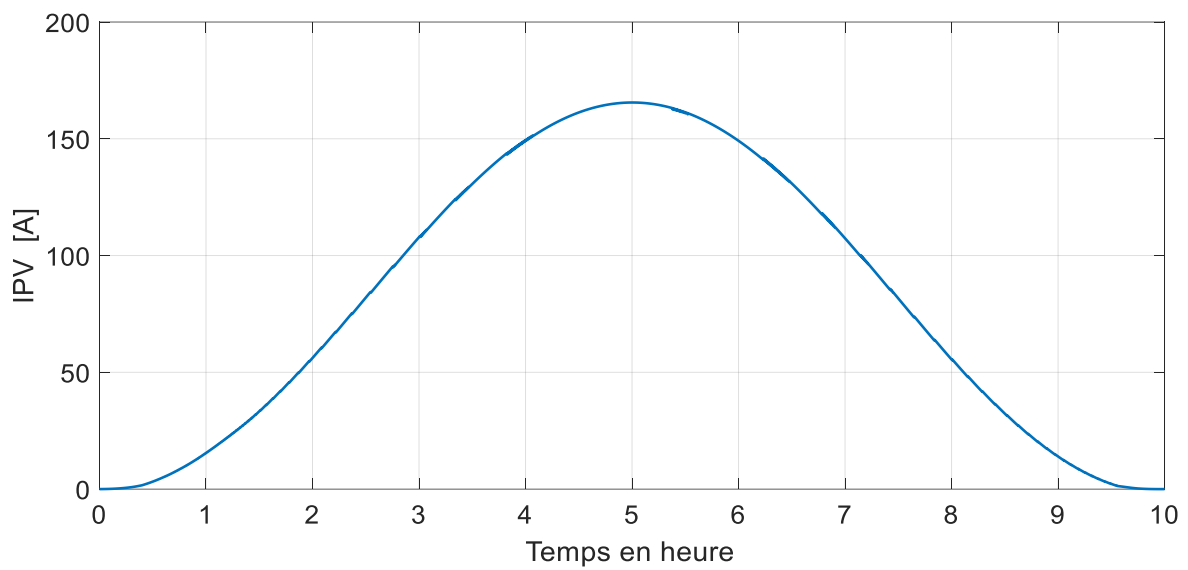
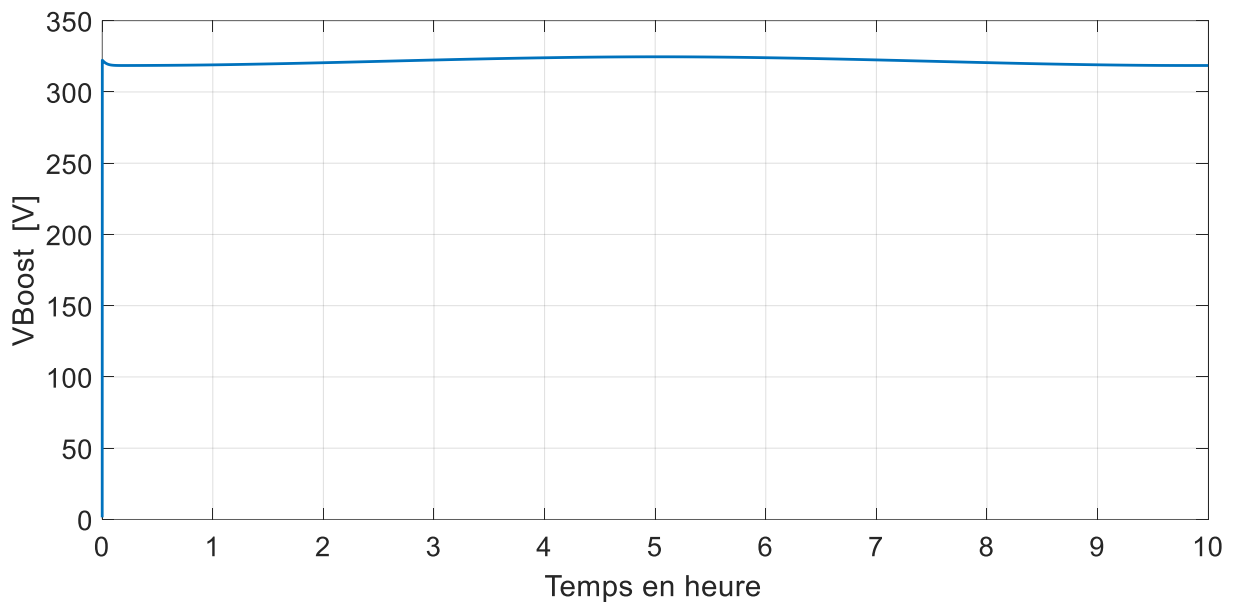
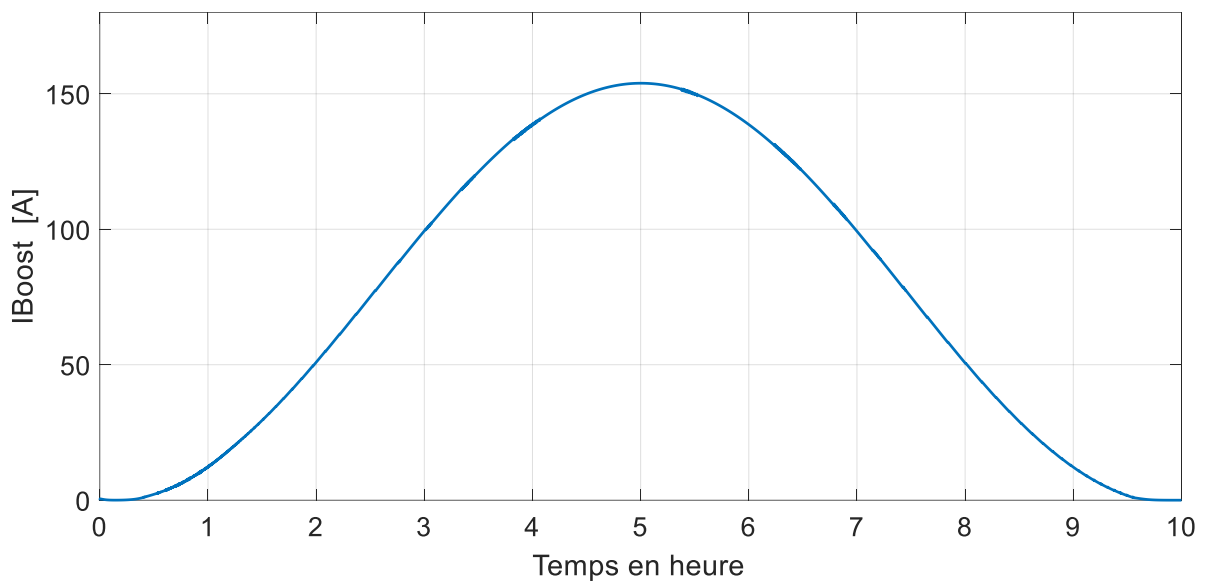
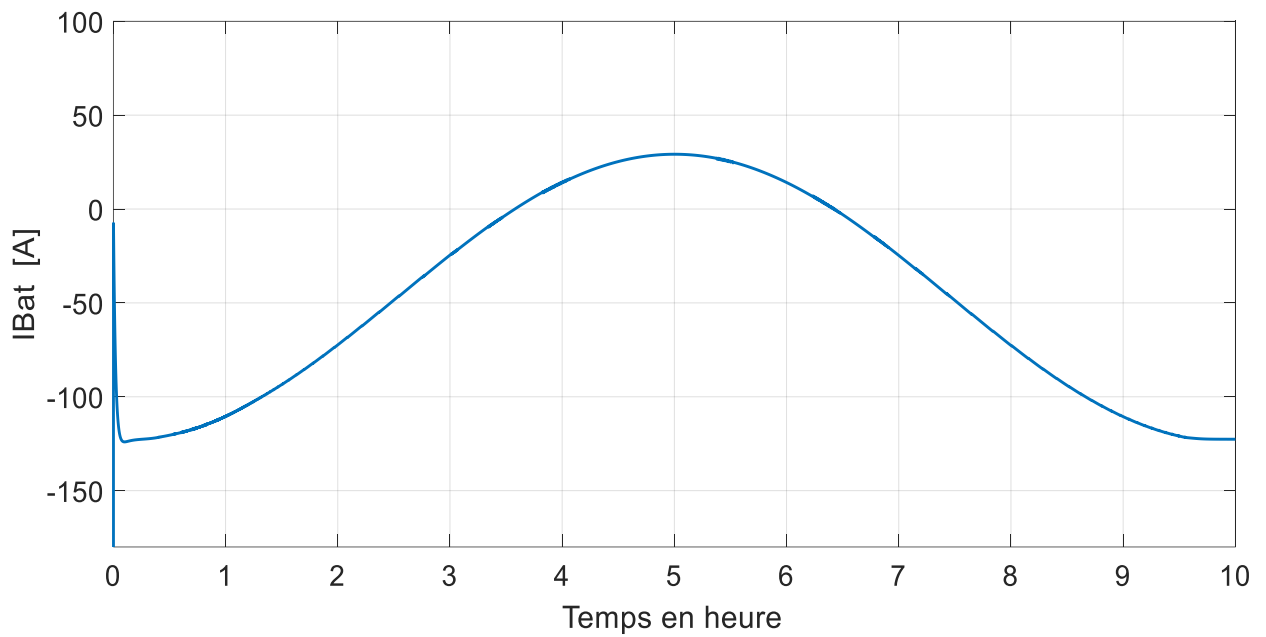
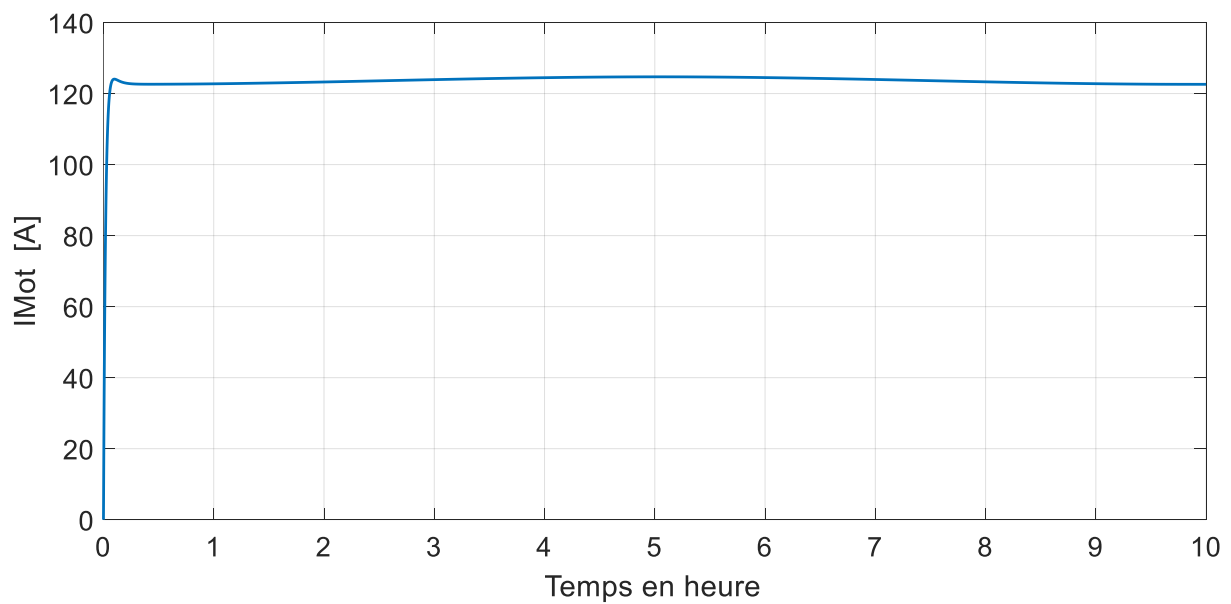
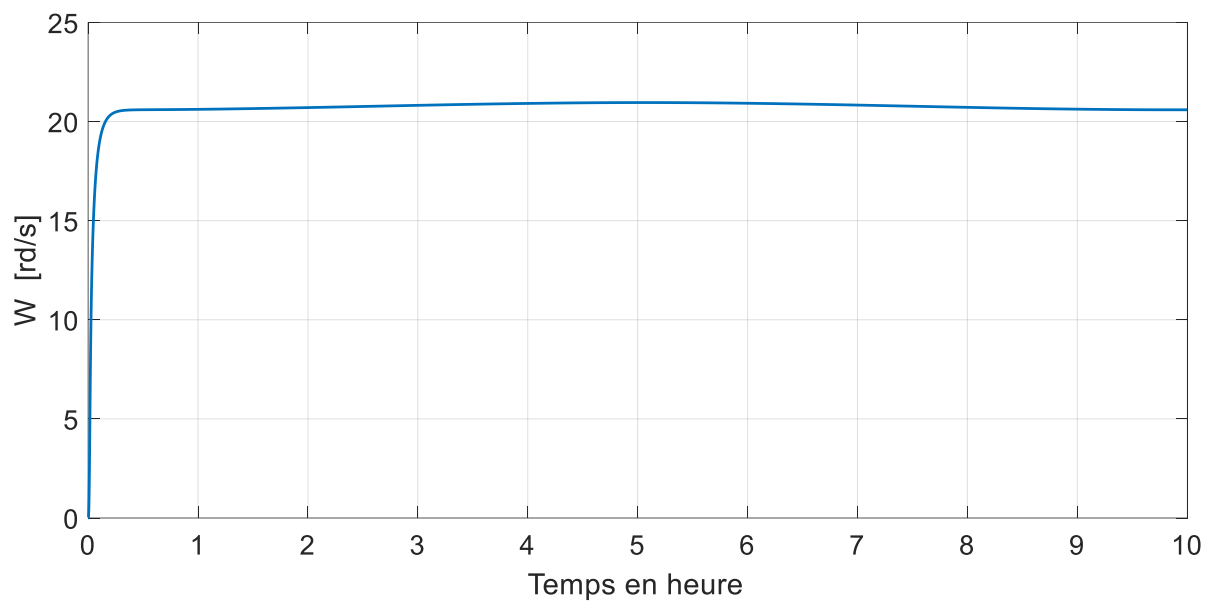
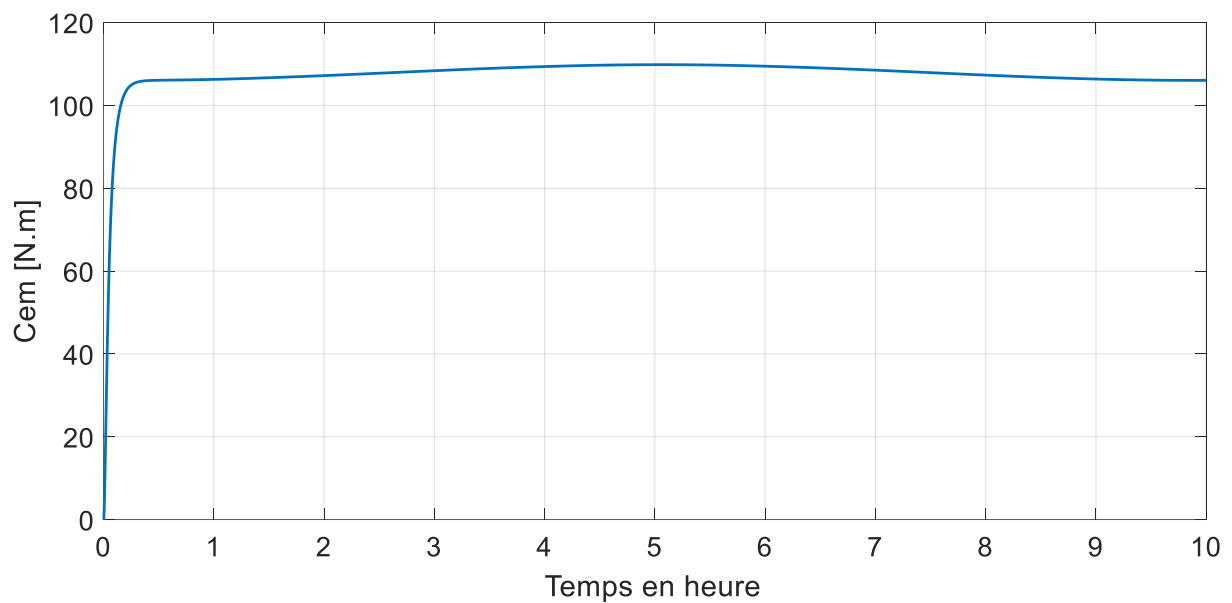


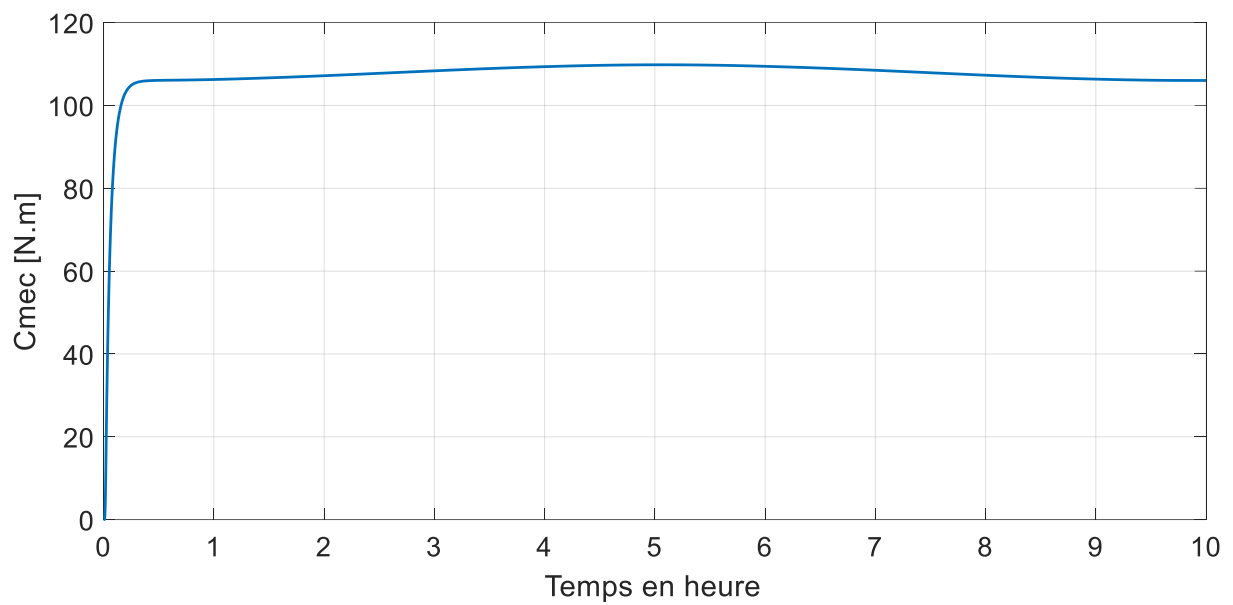
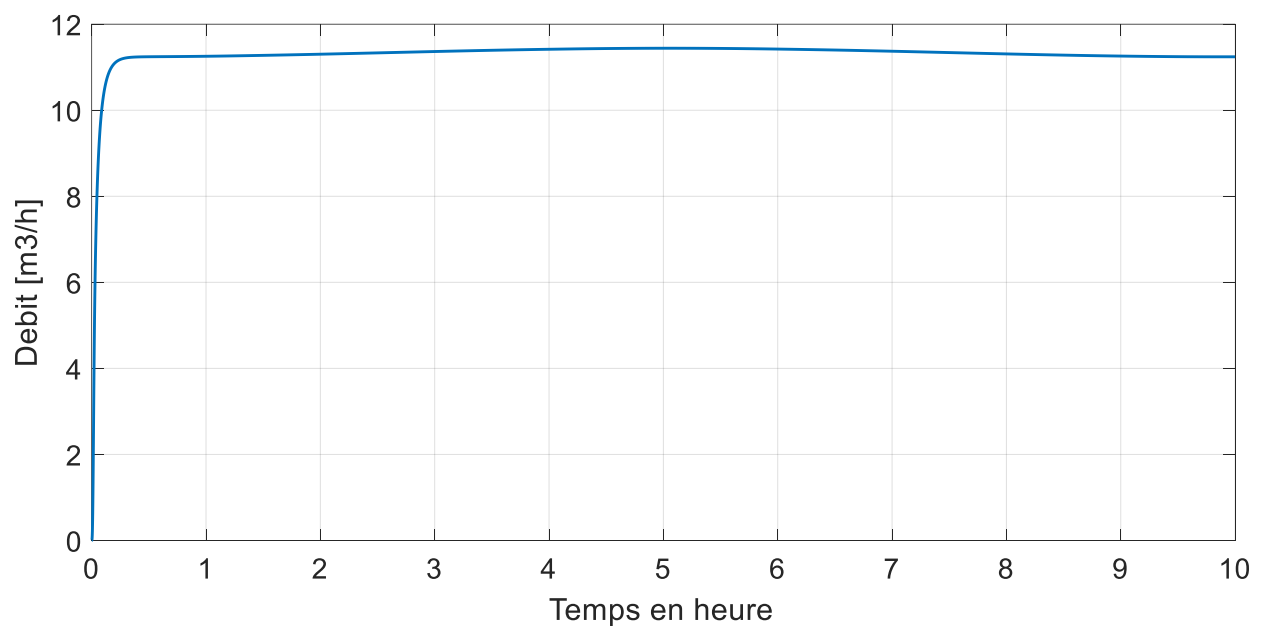
Figure VI.4 : Simulation pompage photovoltaïque

Résultats de simulation :**Figure VI.5 : Tension de panneaux solaires****Figure VI.6 : Courant de panneaux solaires**

**Figure VI.7 : Tension boost de l'hacheur****Figure VI.8 : Courant boost de l'hacheur**

**Figure VI.9 : Courant de batterie****Figure VI.10: Courant du moteur a courant continu**

**Figure VI.11: vitesse du moteur a courant continu****Figure VI.12: Couple du moteur a courant continu**

**Figure VI.13: Couple résistant du pompe****Figure VI.14: Débit de la pompe**

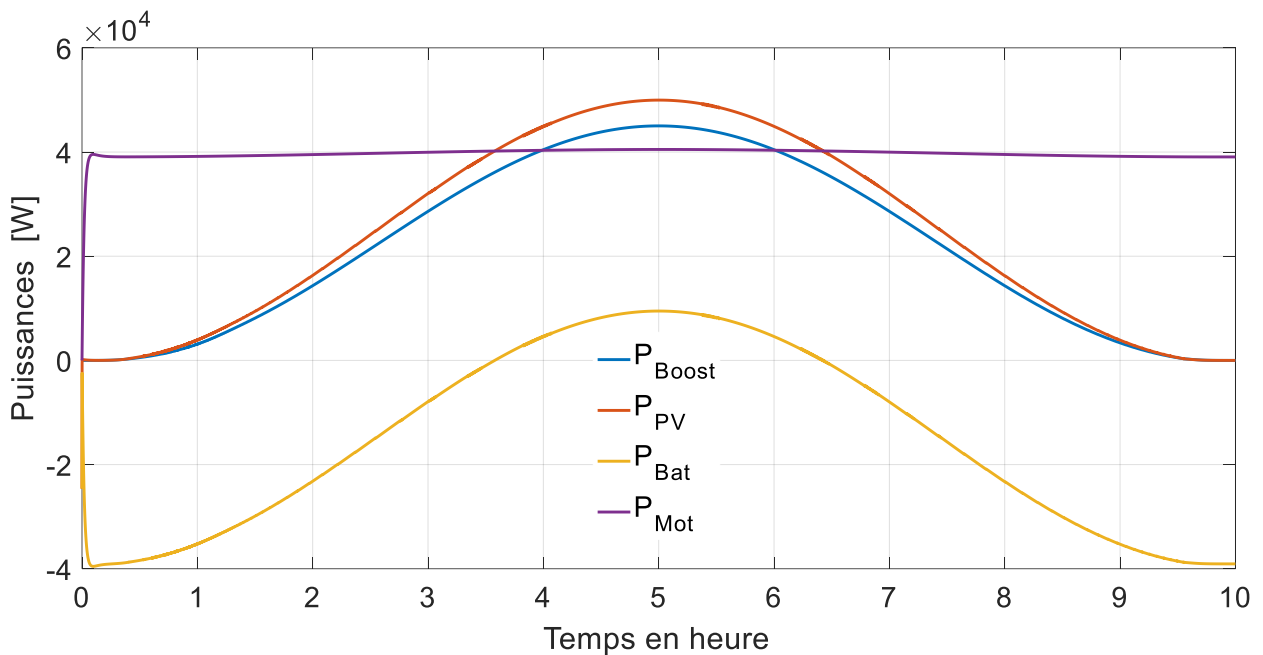


Figure VI.15: les puissances du système de pompage photovoltaïque

Interprétations des résultats :

- La tension des panneaux solaires V_{pv} est constante sauf pour les faibles éclaircements par contre le courant des panneaux solaires I_{pv} suit les variations d'éclairement.
- La tension boost V_{boost} reste aussi constante ceci est due à la mesure de batteries qui augmente ses stabilités en tension. Le courant boost I_{boost} diminue répondant à l'effet de le hacheur utilisé.
- Pour les premières heures ou l'éclairement est faible, la batterie se décharge pour compenser le manque de puissance fourni par le PV au moteur.
- L'hybridation PV, batterie arrive à maintenir le courant du moteur constant.
- Le débit est maintenu constant but atteint ou on arrive à $11\text{m}^3/\text{h}$.
- Pour les faibles éclaircements le manque en puissance est fourni par la batterie, alors que pour l'excès de production du PV est orienté vers la batterie.
- La différence entre P_{boost} et P_{pv} peut déterminer le rendement de la convention utilisé qui est due au potentiel.

VI.9 Conclusion :

Ce chapitre portant sur le dimensionnement et la simulation du système de pompage photovoltaïque, offre ainsi une contribution précieuse à la compréhension et à l'application de cette technologie prometteuse. À travers une analyse approfondie, nous avons examiné les différentes étapes impliquées dans le dimensionnement d'une telle installation, en mettant l'accent sur l'évaluation des besoins en eau, l'analyse des données solaires, la sélection des composants du système et le calcul de la puissance requise.

Conclusion générale

En raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années ; la demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent. Pour palier a ce problème, une orientation vers les énergies renouvelables a vu le jour. Une des énergies renouvelables qui peut satisfaire la demande du monde jusqu'à maintenant, est l'énergie solaire, qui est économique, libre et abondante dans la plupart des régions du monde.

Ce mémoire s'est basé sur l'étude, le dimensionnement et la simulation d'un système de pompage solaire. L'objectif était de développer une solution durable et efficace pour l'approvisionnement en eau dans les régions où l'accès à l'électricité traditionnelle est limité voire inexistant. Grâce à une analyse approfondie des besoins en eau, des conditions solaires et des caractéristiques du site, le dimensionnement du système a été réalisé avec précision, en utilisant des outils de simulation .

Les résultats obtenus ont démontré que le système de pompage solaire offre une alternative fiable et économiquement viable, réduisant les coûts d'exploitation à long terme. De plus, il permet une utilisation durable des ressources en énergies renouvelables.

L'utilisation de simulations a permis d'évaluer les performances du système dans différentes conditions, optimiser sa conception et de prévoir son fonctionnement dans le temps. Cela a permis de garantir une efficacité maximale du système et de prévenir les éventuels problèmes techniques.

Il est important de souligner que ce mémoire contribue à l'avancement des connaissances dans le domaine du pompage solaire et offre des perspectives concrètes pour une utilisation plus répandue de cette technologie. Cependant, il est également essentiel de réaliser des études supplémentaires sur le terrain pour valider les résultats de la simulation et confirmer la faisabilité et la fiabilité du système de pompage solaire dans des conditions réelles.

Référence bibliographique

- [1] : M.Abdelmonaim, << L'énergie éolienne>>, université Constantine 3, 2015.
- [2] : M.alima, M. Karima << L'énergie biomasse>>, , université Constantine 3 2015
- [3] : K.wafa, L.Imane << L'énergie Géothermique>>, Université Constantine 3 2015
- [4] : Dossier présenté par Jade et Odélia, << Les énergies renouvelables >>.
- [5] : Sadi Mohammed El Amine, Hamlat Zohra, << L'impact des énergies renouvelables sur les réseaux électriques Ouest Algérien 220 KV>>, université de Tahar Moulay de Saïda, 2014
- [6] : OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria, << Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau >>, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [7] :SALAMA F.,<< Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique >> , Université de Sétif,
- [8] : NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari << Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque >> Université 8 Mai 1945 – Guelma 2019
- [9] : Zerguine B. << MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION ELECTRIQUE PAR LA CELLULE PHOTOVOLTAIQUE >>, Université BADJI MOKHTAR Annaba, 2010.
- [10] : Kawther A.,<< Production d'énergie électrique à partir de l'énergie photovoltaïque >>, Université de Guelma, 2017.
- [11] : A. Labouret, M. Villoz, << Energie solaire photovoltaïque >> , 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [12] : B. Equer << Energie solaire photovoltaïque (volume1 : physique et technologie de la conversion photovoltaïque) >> , 1ère édition, ELLIPES, Paris, 1993.
- [13] : Mehdi M., << Injection de l'électricité produite par les énergies renouvelables dans le réseau électrique >> Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2010.
- [14] : BENSEDDIK O., DJALOUD F., << Etude et optimisation d'un système photovoltaïque >> Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [15] : BELGHITRI H., << Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque >>, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2009.

[16] : GUEDAOURIA H., << Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar >>, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.

[17] : Ricaud A << Systèmes photovoltaïques >>, Ecole d'ingénieurs 'Polytech' Savoie', octobre 2011

[18] : BENDAHOU Djamel, BOUROUIS El-Abbes, << Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim de particules >> Proposé par : KARA Kamel & CHOUDER Aissa 2012-2013, université de SAAD DAHLAB de Blida.

[19] : Hamouche Newfel , Raghdadi Imed , << Etude comparative des differntes techniques MPPT dans un système PV >>, Université Badji Mokhtar Annaba , Département Electrotechnique (Commande électrique)

[20] : Maouedj Rachid, << Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah >>, 2005.

[21] : « Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants », 2013, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Département Sciences & Technologie.

[22] : C. Cabal, << Optimisation énérgitiques de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque >>, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier , Toulouse 15 Décembre 2008.

[23] : Hamouche Newfel , Raghdadi Imed , << Etude comparative des differntes techniques MPPT dans un système PV >>, 2019 , Université Badji Mokhtar Annaba.

[24] : Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane, Lammouchi zakaria, « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque », université echahid hama lakhder d'el-oued faculté des sciences et de la technologie, el-oued, 2015.

[25] : T. A. B. Raj, R. Ramesh (2014) Modelling and analysis of parallel converter for photovoltaic applications, Journal of Theoretical and Applied Information Technology.

[26] : A. Kalirasu, S. S. Dash (2010) Simulation of Closed Loop Controlled Boost Converter for Solar Installation, Serbian Journal of electrical engineering,

[27] : R. Singh and M. Pandit (2013) Analysis of photovoltaic cells with closed loop boost converter, International Journal of Advances in Engineering & Technology.

[28] : J. K. Shiau, M. Y. Lee, Y. C. Wei and B. C. Chen (2014) Circuit Simulation for Solar Power Maximum Power Point Tracking with Different Buck-Boost Converter Topologies.

[29] : J. K. Shiau, M. Y. Lee, Y. C. Wei and B. C. Chen (2014) Circuit Simulation for Solar Power Maximum Power Point Tracking with Different Buck-Boost Converter Topologies.

[30] : JOEL.M.ZINSALO ,note de cours « pompes et stations de pompage » université d'abomeycalavi.

[31] : HAMAMMED.MOHAMMEDYAHIA,MADONICHOUKRI « Etude de système de refoulement TFNA_DZIOUA », Université AboubakrBelkayid,Tlemcen.

[32] : DINBUTA NSEKA MERVEILLE,KAELA TSHILOMBO ROJER,MWAPE.TONDO Adrien ,NGELEKA.TSHIBANGU.Moxime ;WANDANDA BAUDOUIN JOE- « Eude comparative d'un montage série et d'un montage en parallèle de deux pompes hydraulique » Université de LUBUMBASHI ,Faculté polytechnique .

[33] : Mécanique des fluides I /Rappels de statique des fluide, accademia.edu.

[34] :ABDALLAH Benkhattouhocine « Analyse et diagnostic des pompes industrielles (Etude de cas au niveau de HENKEL Ain Temouchent » Université de Tlemcen.

[35] : www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.
Denis Guérin, « Cours conversion électromécanique Machine à courant continu »

[36] : Anouar Halila, « Etude des machines à courant continu », Université Laval canada,2001.

[37] : Ililten Athmane, « Banc d'essai virtuel pour un moteur à courant continu », Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.

[38] : Ghania Boukerche, « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application », Université Badji Mokhtar

[39] : www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique ».

[40] : Benzenati Siham, Rabiai Meriem, « Commande floue d'un moteur à courant continu à excitation séparée », , Université Abderrahmane Mira Bejaia, 2013.

[41] :PHILIPE, Baret. « Machine électrique », théorie de mise en oeuvre. Edition Dunod. Paris2002.

[42] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI — Convertir L'énergie — Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.

[43]: www.libow.fr << les différents types de batterie solaires >>

[44]: www.maison-travaux.fr << avantages-inconvénients d'une toiture photovoltaïque >>