

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

## MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

**Énergies Renouvelables**

*Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique*

Intitulé :

---

***MODELISATION ET SIMULATION DES CAPTEURS SOLAIRE (HYBRIDE PV/  
CT, PHOTOVOLTAÏQUE***

---

Présenté par :

- Meftah omar
- AMARA ELHASSEN
- BELKHADEM DHIYA ABDELHAMID

*Soutenu le : ...21/06/2020.... devant le Jury :*

|                                |            |                                   |                     |
|--------------------------------|------------|-----------------------------------|---------------------|
| <b>M.DR.BRAHIMI MOHAMED</b>    | <b>MAA</b> | <b>Centre Universitaire Naâma</b> | <b>Président</b>    |
| <b>M. DR.AMIRI BEN AMEUR</b>   | <b>ENF</b> | <b>Université Béchar</b>          | <b>Encadreur</b>    |
| <b>M.DR. IBRAHIM TAIBI</b>     | <b>MCB</b> | <b>Centre Universitaire Naâma</b> | <b>Co-Encadreur</b> |
| <b>M.DR.BEN MOHAMED FAYCEL</b> | <b>MAA</b> | <b>Centre Universitaire Naâma</b> | <b>Examineur</b>    |

## *Remerciements*

*Ma reconnaissance éternelle et mes vifs remerciements à notre grand créateur, « ALLAH », qui m'a donné la santé et la volonté afin d'accomplir ce P.F.E.*

*Tout d'abord nous tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur « **Mr IBRAHIM TAIBI** » de m'avoir orienté et pour ces conseils judicieux, ses riches enseignements et ses orientations, ses suggestions et ses encouragements dans le but de mener à bien ce projet de fin d'études.*

*Mes remerciement vont également à :*

*Tous mes enseignants du ENR en ETT*

*Tous les membres de jury qui mes feront l'honneur d'apprécier nôtre travail.*

*Mes derniers remerciements vont à ma famille, mes amis et toute personne qui m'a aidé de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Merci à tous.*



# Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A mes frères

« Ibrahim, hachemi, abdesadek, MM Anitar. ».

A mes amies et mes camarades

« , R. Habib , Anitar .H ,Hocine.T. ».

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

OMAR MEFTAH



# Dédicace

Je dédie ce mémoire  
A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A mes frères

« Hiba, Mohammad ,Hocine ,Khadidja ».

A mes amies et mes camarades

« K. Hamza, Halima ».

Sans oublier tout les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du  
secondaire ou de l'enseignement supérieur.

AMARA ELHASSEN



# Dédicace

وَقَالُوا الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي هَدَانَا لِهَذَا وَمَا كُنَّا لِنَهْتَدِيَ لَوْلَا أَنْ هَدَانَا اللَّهُ

Je tiens avant tout à exprimer ma gratitude à TAIBI BRAHIM pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude. Je le remercie pour son implication, son soutien et ses

encouragements tout au long de ce travail.

J'adresse des remerciements particuliers à AMARA LAHCEN et MEFTAH OMAR, qui ont

accepté de participer à cette étude et sans qui ce travail n'aurait jamais vu le jour.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont apporté leur support moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Enfin, je n'oserais jamais oublier de remercier ma famille pour son soutien. Merci à ma très

chère mère, mes sœurs et mon frère.

Et dans l'impossibilité de citer tous les noms, nos sincères remerciements vont à tous ceux

et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la

réalisation de ce mémoire

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

BELKHADEM DHIYA ABDELHAMID



# SOMMAIRE

|                            |    |
|----------------------------|----|
| Introduction Générale..... | 01 |
|----------------------------|----|

## *Chapitre I: Système photovoltaïque*

|  |    |
|--|----|
| I.1.Introduction.....                                      | 02 |
| I.2.L'effet photovoltaïque .....                           | 02 |
| I.3.Système photovoltaïque .....                           | 03 |
| I.3.1.Définition .....                                     | 03 |
| I.3.2.Le rôle principal du convertisseur statique .....    | 03 |
| I.3.2.1. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....          | 04 |
| I.3.2.2.Définition du rapport cyclique.....                | 07 |
| I.3.2.3.Types des convertisseurs DC/DC.....                | 07 |
| I.3.2.3.a. Hacheur dévolteur (Buck converter).....         | 07 |
| I.3.2.3.b. Convertisseur survolteur (Boost converter)..... | 10 |
| I.3.2.3.c. Convertisseur Buck-Boost.....                   | 11 |
| I.3.3.Types d'un système solaire photovoltaïque .....      | 13 |
| I.3.3.1.Système autonome .....                             | 13 |
| I.3.3.1.1.Système autonome sans batterie .....             | 13 |
| I.3.3.1.2.Système autonome avec batterie .....             | 14 |
| I.3.3.2.Système hybride .....                              | 14 |
| I.3.3.3.Système raccordé au réseau électrique .....        | 15 |
| I.4.La cellule PV .....                                    | 16 |
| I.4.1.Définition .....                                     | 16 |
| I.4.2.Technologie photovoltaïque .....                     | 17 |

|  |    |
|--|----|
| I.4.2.1.Cellules de première génération .....                      | 17 |
| I.4.2.1.a. Cellule au silicium mono - cristallin .....             | 17 |
| I.4.2.1. b. Cellule au silicium poly-cristallin.....               | 18 |
| I.4.2.2.Cellules de deuxième génération .....                      | 18 |
| I.4.2.3.Cellules de troisième génération .....                     | 19 |
| I.4.3.Comparaison entre les différents types .....                 | 19 |
| I.5.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque..... | 20 |
| I.5.1.Tension de circuit ouvert VCO .....                          | 20 |
| I.5.2.Courant de court-circuit ICC.....                            | 21 |
| I.5.3.Puissance .....  | 21 |
| I.5.4.Le rendement énergétique.....                                | 21 |
| I.5.5.Facteur de forme.....  | 21 |
| I.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....                | 22 |
| I.7.Conclusion.....  | 23 |

## *Chapitre II : les capteurs solaires*

|   |    |
|---|----|
| II.1.Introduction.....                          | 24 |
| II.2.Capteur thermique .....                    | 24 |
| II.2.1.Types des capteurs .....                 | 24 |
| II.2.2.Fonctionnement.....                      | 26 |
| II.2.3.Efficacité et rendement .....            | 27 |
| II.2.4.Application .....                        | 27 |
| II.2.4.1.Chauffage et eau chaude combinés ..... | 28 |
| II.2.4.2.Eau chaude solaire .....               | 29 |
| II.2.4.3.Chauffage solaire .....                | 30 |
| II.3.capteur photovoltaïque.....                | 34 |
| II.3.1.Caractéristique.....                     | 34 |

|   |    |
|---|----|
| II.3.2.APPLICATION.....                       | 35 |
| II.4.Capteur photovoltaïque et thermique..... | 36 |
| II.4.1.Fonctionnement.....                    | 36 |
| II.4.2.Avantage .....                         | 37 |
| II.4.3.Installation .....                     | 38 |
| II.5.conclusion.....                          | 38 |

### *Chapitre III : Modélisation des capteurs solaires*

|  |    |
|--|----|
| III.1.Introduction.....  | 39 |
| III.2.Une synthèse sur les capteurs solaire a concentration .....                          | 39 |
| III.3.Modélisation et simulation numérique.....  | 40 |
| III.3.1.Hypothèses simplificatrice.....  | 40 |
| III.4.Analyse thermique de capteur solaire plan à air.....                                 | 41 |
| III.4.1.Bilan thermique et calcul de rendement.....  | 41 |
| III.4.2.Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire.....                  | 42 |
| III.4.2.1.Méthode par tranche.....   | 42 |
| III.5.Les échanges dans un capteur solaire plan à air.....                                 | 48 |
| III.5.1.Les échanges radiatifs .....   | 48 |
| III.5.1.1.Echanges radiatifs entre les vitrages et la voûte céleste.....                   | 48 |
| III.5.1.2.Echanges radiatifs entre la vitre et l'absorbeur.....                            | 48 |
| III.5.1.3.Echanges radiatifs entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium sur l'isolant..... | 49 |
| III.5.2.Les échanges convectifs.....   | 49 |
| III.5.2.1.Echanges convectifs entre le capteur et le milieu environnant.....               | 49 |
| III.5.2.2.Echanges convectifs entre l'absorbeur et la vitre .....                          | 49 |
| III.5.2.3.Echanges convectifs dans la lame d'air mobile.....                               | 50 |
| III.6.Rendement thermique du capteur solaire plan $\eta$ .....                             | 51 |
| III.7.Conclusion.....  | 51 |



## *Chapitre VI : Simulation des Résultats et Discussion*

|  |    |
|--|----|
| VI.1.Introduction.....   | 52 |
| <b>Erreur ! Signet non défini.</b>   |    |
| IV.2.Les températures des différents composants du capteur... ..   | 52 |
| IV.3.L'influence de l'éclairement sur le rendement thermique de capture et électrique de la cellule solaire.....         | 55 |
| IV.4.Simulation du générateur PV.....  | 55 |
| IV.4.1.L'outil Matlab/Simulink.....  | 55 |
| IV.5.L'influence de l'éclairement sur la caractéristiques Les caractéristiques (I <sub>pv</sub> , V <sub>pv</sub> )..... | 57 |
| IV.6.Commande MPPT par La méthode de perturbation et observation (P&O).....  | 61 |
| IV.7.Conclusion.....   | 66 |

### *Conclusion général*

|                         |    |
|-------------------------|----|
| Conclusion général..... | 67 |
|-------------------------|----|

# LISTE TABLAUX

## *Chapitre I: Système photovoltaïque*

**Tableau. I -1:** Comparaison entre les différents types.....20

## *Chapitre IV : Simulation des Résultats et Discussion*

**Tableau. IV.1:** Spécifications du module PV.....57

**Tableau. IV.2:** Paramètres extraits du module.....57

# LISTE FIGURE

## *Chapitre I: Système photovoltaïque*

|  |    |
|--|----|
| Fig. I-1.Convertisseur DC/DC.....  | 04 |
| Fig. I-2.Schéma d'un quadripôle électrique.....  | 04 |
| Fig. I-3.périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....                                     | 05 |
| Fig. I-4.Montage potentiomètre.....  | 05 |
| Fig. I-5.Principe du hacheur série.....  | 06 |
| Fig. I-6.Comparaison du hacheur série avec le montage potentiométrique.....                        | 07 |
| Fig. I-7.Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.....                                      | 08 |
| Fig. I-8.Convertisseur Buck durant l'état ON.....  | 08 |
| Fig. I-9.Convertisseur Buck durant l'état off.....   | 09 |
| Fig. I-10.formes d'onde des tensions $V_{pv}$ et $V_{load}$ dans le cas du convertisseur Buck..... | 09 |
| Fig. I-11.Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost.....                               | 10 |
| Fig. I-12.Convertisseur Boost durant l'état OFF.....   | 11 |
| Fig. I-13.Tensions $V_{PV}$ et $V_{Load}$ dans le cas du convertisseur Boost.....                  | 11 |
| Fig. I-14.Circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost.....                                    | 12 |
| Fig. I-15.Convertisseur Buck-Boost durant L'état OFF.....  | 12 |
| Fig. I-16.Système autonome sans batterie .....   | 13 |
| Fig. I-17.Système autonome avec batterie .....   | 14 |
| Fig. I-18.Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER)<br>.....                    | 15 |
| Fig. I-19.Système raccordé au réseau électrique.....   | 16 |
| Fig. I-20.La jonction PN.....  | 17 |
| Fig. I-21.Cellule au Silicium Mono –cristallin.....  | 18 |
| Fig. I-22.Cellule au Silicium Poly-cristallin.....   | 18 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. I-23. Cellule au Silicium amorphe (couche mince)..... | 19 |
| Fig. I-24. Modèle électrique d'une cellule PV.....         | 22 |

## *Chapitre II : les capteurs solaires*

|  |    |
|--|----|
| Fig. II-1. Les capteurs à tubes sous vide.....       | 25 |
| Fig. II-2. Les capteurs plans vitrés.....            | 25 |
| Fig. II-3. Les capteurs non-vitrés.....              | 26 |
| Fig. II-4. Chauffage et eau chaud combinés.....      | 29 |
| Fig. II-5. Eau chaud solaire.....                    | 30 |
| Fig. II-6. Chauffage solaire par air.....            | 31 |
| Fig. II-7. Plancher solaire direct.....              | 32 |
| Fig. II-8. Climatisation solaire.....                | 33 |
| Fig. II-9. Electricité solaire thermique.....        | 34 |
| Fig. II-10. Capteur photovoltaïque.....              | 35 |
| Fig. II-11. Capteur photovoltaïque et thermique..... | 36 |

## *Chapitre III : Modélisation des capteurs solaires*

|   |    |
|---|----|
| Fig. III.1. Schéma de principe d'un capteur solaire plan à air..... | 41 |
| Fig. III.2. Schéma électrique relatif à une section du capteur..... | 43 |
| Fig. III.3. Schéma générale de la simulation photovoltaïque.....    | 44 |
| Fig. III.4. Schéma détaillé de la simulation photovoltaïque.....    | 44 |
| Fig. III.5. Schéma de photo current.....                            | 45 |
| Fig. III.6. Schéma de saturation current.....                       | 45 |
| Fig. III.7. schéma de reverse current.....                          | 46 |
| Fig. III.8. schéma de température (k).....                          | 46 |
| Fig. III.9. schéma détaillé de nombre module en série.....          | 47 |
| Fig. III.10. teste du courant.....                                  | 47 |

## *Chapitre IV : Simulation des Résultats et Discussion*

|   |    |
|---|----|
| Fig. IV.1.Variation des températures des composants du capteur en fonction du rayonnement global.....   | 53 |
| Fig. IV.2.les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire .....                                   | 54 |
| Fig. IV.3.le rendement thermique et électrique.....   | 55 |
| Fig. IV.4.Accueil Matlab.....   | 56 |
| Fig.VI.5.Schéma du module photovoltaïque sous matlab/Simulink.....                                      | 56 |
| Fig.VI.6.Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire.....      | 59 |
| Fig.VI.7. Influence de température sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire.....       | 60 |
| Fig.VI.8. Influence de nombre de cellule sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire..... | 61 |
| Fig.VI.9.Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV.....                              | 62 |
| Fig.VI.10.Organigramme de la méthode P&O.....   | 63 |
| Fig.VI.11.Système photovoltaïque (système+convertiseur+MPPT+charge DC).....                             | 64 |
| Fig. IV.12.schéma détaillé Système photovoltaïque.....  | 64 |
| Fig. IV.13.la courbe de tension en fonction de temps avec MPPT.....                                     | 65 |
| Fig.VI.14.la courbe de puissance en fonction de temps avec MPPT.....                                    | 65 |
| Fig.VI.15.rapport cyclique en fonction de temps.....  | 66 |

# BIBLIOGRAPHIE

## *Chapitre I: Système photovoltaïque*

- [1] [http://www.grenoble-isere.com/etudes-et-territoires/pdf\\_filieres/Photovoltaique\\_Etude2010\\_V14- Fr.pdf](http://www.grenoble-isere.com/etudes-et-territoires/pdf_filieres/Photovoltaique_Etude2010_V14- Fr.pdf)
- [2] Antonio Luque And Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [3] Centre de ressources documentaires sur le photovoltaïque raccordé au réseau en France
- [4] F. Kininger, "photovoltaic systems technology", university of kassel, 2003
- [5] Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque
- [6] Informations et dépannage photovoltaïque techniques photovoltaïques et onduleurs.
- [7] F. Zerhouni, M. Zegrar, S. K. Brahimi et S. Stanbouli, "Optimisation d'un système . à énergie verte avec validation pratique", Rev. Energ. Ren. Vol.11, 2008, pp.41 –49
- [8] Bendjelloul Zakaria: «Contribution à la modélisation d'une cellule solaire», Magistère en Micro-électronique-photovoltaïque, Université de Bechar, 2009.
- [9] Cédric CABAL "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque." Université Toulouse III – Paul Sabatier.
- [10] B. Chaouki, B. Tarek "Optimisation floue neuronale et génétique d'un système photovoltaïque connecté au réseau", Mémoire ingénieurs. Biskra, 2007.
- [11] B. Omar, C. Idris, " L'intégration du photovoltaïque Au Réseau électrique Problèmes et Perspectives", Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006.
- [12] B. Wafa S. Samah, " étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque" Mémoire ingénieurs. Biskra, 2006
- [13] MAKHLOUF MESAUD, "étude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage" Mémoire magister. Mentouri de Constantine, 2006 .

## *Chapitre II : les capteurs solaires*

- [1] John Wiley and Sons, Inc., 1991, 2 eéd ,p 919 .
- [2] (En) Mauthner , F. et Weiss, W., Solar Heat Worldwide: Market and Contribution to the Energy Supply 2012, AEE Intec, Juin 2014, 62 p
- [3] (En) Performance of 172 grid connected PV plants in Northern Germany (Decker B, John U 1994)
- [4] (es) E. Lorenzo, Radiation solar y dispositivos fotovoltaicos, 2006.
- [5] Dupeyrat P, Pabiou H, Kwiatkowski G, Ménéz C (2011) Optimisation de la conversion solaire grâce au concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique. Conférence SFT
- [6] Dupeyrat P, Pabiou H, Kwiatowski J & Menezo C (2011) Optimisation de la conversion solaire grâce au concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique (PDF, 6pp)
- [7] Fraisse G, Ménéz C & Johannes k (2007), Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. Solar Energy, Volume 81, Issue 11, Nov. 2007, Pages 1426-1438.
- [8] Touafek K (2005) Étude d'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque Thermique. Mémoire de magister, École Nationale Polytechnique, Alger.
- [9] Touafek K, Malek A & Haddadi M (2006) Étude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique Revue des énergies renouvelables, 9(3), 143-154 (résumé .
- [10] Touafek K, Haddadi M, Malek A & Bendaikha-Touafek W (2008) Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique ] Revue des Energies Renouvelables, 11(1), 153-165.
- [11] site internet.

## *Chapitre III : Modélisation des capteurs solaires*

- [1] Chemisana, J.lopez-villada, Al.coronas, J.ignasirosell, building integration of concentrating systems for solar cooling applications, 2nd European conference on polygeneration, (2011).
- [2] H.helmers, Andreas W. Bett, Jorgen Parisian Carsten agert, modeling of concentrating photovoltaic and thermal, progress in photovoltaics: research and applications, (2012).
- [3] Weidong huanga, Peng Hu, zeshao chen, performance simulation of a parabolic trough solar collector, solar energy, (86) 746–755 (2012).

- [4] D.saad . odeh,n,yand G. L. morrison, optimization of parabolic trough solar collector system, *Int. J. energy res*, (30) 259–271 (2006).
- [5] D.E. prapas, B.nortonand S.D. prober, optics of parabolic-trough, solar energy collectors, possessing small concentration ratios, *solar energy*, (39)(6)541-550 (1987).
- [6] R.tchinda, E.kaptouom, D.njomo, study of the C.P.C. collector thermal behavior, *energy converse. mgmt*, (39) (13) 1395-1406 (1998).
- [7] Li Guiqiang , Pei Gang , Su yuehong, JiJie , Saffat, B.riffat, experiment and simulation study on the flux distribution of lens-walled compound parabolic concentrator compared with mirror compound parabolic concentrator, *energy* ,(58) 398-403 (2013).
- [8] Ajitkumar S. gudekar, Atul S. jadhav, sudhir V. panse, Jyeshtharaj B. Joshi,Aniruddha B.Pandit,cost effective design of compound parabolic collector for steam generation, *solar energy*, (90) 43–50(2013).
- [9] K. Gouthamraj, K. Jamuna Rani, G. satyanarayana, design and analysis of rooftop linear Fresnel, *international journal of engineering and innovative technology*, (2)(11) (2013).
- [10] H.Zheng, C.Feng, Y.Su, J.Dai, X.Ma, design and experimental analysis of a cylindrical compound Fresnel solar concentrator, *solar energy*, (107) 26–37 (2014).
- [11] M.Boyd, analytical model for solar irradiance near a planar vertical diffuse reflector–formulation, validation, and simulations, *solar energy*, (91) 79–92 (2013).
- [12] Bengtperers ,bjornkarlsson, external reflectors for large solar collector arrays simulation model and experimental results, *solar energy*, ( 51) (5) 327-337 (1993).
- [13] K.lovegrove,w.stein, concentrating solar power technology principles, developments and applications, woodhead publishing series energy , (21) (2012).
- [14] Omar z. sharaf, mehmet f. Orhan, concentrated photovoltaic thermal (CPVT) solar collector systems: part II–implemented systems, performance assessment, and future directions, *renewable and sustainable energy reviews*, (2014).
- [15] A.V.Narasimha RAO, R.V.Chalam, S. subramanyam and .L.sitharama RAO, energy contribution by booster mirrors, *energy converse. mgmt* (34) (4) 309-326 (1993).
- [16] H.M.S. Hussein, G.E. Ahmad, M.A. mohamad, optimization of operational and designparameters of plane reflector-tilted flat plate solar collector systems, *Energy*, (25) 529–542 (2000).
- [17] M.D.J.Pucara, A.R.Despic, the enhancement of energy gain of solar collectors and photovoltaic panels by the reflection of solar beams, *energy*, (27) 205–223 (2002).



- [18] Ibrahim S. Taha and Shawki M.Eldighidy, effect of off-south orientation on optimum conditions for maximum solar energy absorbed by flat plate collector augmented by plane reflector, solar energy, (25) 373-379 (1980).
- [19] A.a.arata and R.W.Geddes, combined collector-reflector systems, energy, (11) (6) 621-630 (1986).
- [20] D.K. Mcdaniels and D.H.Lowndes, enhanced solar energy collection using reflectorsolar thermal collector combinations, solar energy, (17) 277-283 (1975).
- [21] H. P. Gang and D. S. Hrishmesas, enhancement of solar energy on flat-plate collector by plane booster mirrors, solar energy, (40) (4) 295-307 (1988).
- [22] E.A.Onyango,T.F.N. Thoruwa,S.M. Maingi and E.M. Njagi, performance of a 2-element plane reflector augmented galvanized pipe flat plate collector for water pasteurization, journal of food technology, (7)(1) 12-19 (2009).
- [23] A. F.Muftah, M.A.Alghoul, A.Fudholi, M.M. Abdul-Majeed, K.Sopian, factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review, renewable and sustainable energy reviews, (32) 430–447 (2014).
- [24] C. Elango,a, N. Gunasekaran, K. Sampathkumar, thermal models of solar still—A comprehensive review, renewable and sustainable energy reviews, (47) 856–911(2015).
- [25] H.Tanaka, Y.Nakatake, increase in distillate productivity by inclining the flat plate external reflector of a tilted-wick solar still in winter, solar energy, (83) 785–789 (2009).
- [26] H.Tanaka, Y.Nakatake, outdoor experiments of a vertical diffusion solar still coupled with a flat plate reflector, desalination, (214) 70–82 (2007).
- [27] N.Bellel, I.Tabet,L.maifi, theoretical study of solar stills with reflector external, 16emesJournées internationales de thermique, Marrakech Maroc, du 13 au 15 novembre, (2013).

#### ***Chapitre IV : Simulation des Résultats et Discussion***

- [1] N. Abouchabana, « *Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT* », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

# NOMENCLATURE

|        |  |                     |
|--------|--|---------------------|
| PV     | Photovoltaïque   |                     |
| ICC    | courant en court circuit   | [A]                 |
| VCO    | Tension en circuit ouvert  | [V]                 |
| SHSER  | Un système hybride à sources d'énergie renouvelables   |                     |
| $I_d$  | Courant de la diode  | [A]                 |
| $I$    | Courant de la charge   | [A]                 |
| $V_c$  | Tension de charge  | [V]                 |
| RS     | Résistance qui modélise les pertes aux contacts (Résistance série)   | [ $\Omega$ ]        |
| RSH    | Résistance qui modélise les courants de fuites dus aux effets de bord de la jonction PN (Résistance shunt) | [ $\Omega$ ]        |
| ISH    | Courant qui passe par Rsh  | [A]                 |
| V      | Tension de la charge   | [V]                 |
| q      | Charge électrique élémentaire  | [C]                 |
| $K_0$  | Constante de Boltzmann   | [J/K]               |
| T      | Température  | [K]                 |
| $I_0$  | Courant de saturation  | [A]                 |
| VOPT   | Tension optimale des panneaux photovoltaïques  | [V]                 |
| IOPT   | Courant optimal des panneaux photovoltaïques   | [A]                 |
| PPM    | Point de puissance maximale  |                     |
| TREF   | Température de référence   | [K]                 |
| E      | Eclairement  | [W/m <sup>2</sup> ] |
| P      | Puissance  | [W]                 |
| EG     | Énergie de gap   | [J]                 |
| DC-AC  | Continu-Alternatif   |                     |
| DC-DC  | Continu-Continu  |                     |
| $T_a$  | Température ambiante   | [K]                 |
| $\eta$ | Rendement  |                     |
| S      | Surface de module photovoltaïque   | [m <sup>2</sup> ]   |
| N      | Nombre du module constituant le champ photovoltaïque.  |                     |
| E0     | Irradiation solaire de référence   | [W/m <sup>2</sup> ] |
| FF     | Facteur de forme.  |                     |
| a-Si   | silicium non cristallisé de couleur gris foncé   |                     |
| CDTE   | Tellure de Cadmium   |                     |

# NOMENCLATURE

| CIGS         | Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium   |               |
|--------------|---|---------------|
| $Q_{sa}$     | Flux solaire absorbé  | $[w/m^2]$     |
| $Q_p$        | Flux perdu par la paroi absorbante  | $[w/m^2]$     |
| $Q_u$        | Flux utile transmis au fluide caloporteur                                     | $[w/m^2]$     |
| $Q_{st}$     | Flux stocké dans le capteur   | $[w/m^2]$     |
| $I_{ph}$     | le photo-courant  | [A]           |
| Ns           | nombre des cellules en série  |               |
| G            | facteur d'idéalité  |               |
| $T_a$        | Température ambiante  | $[^{\circ}C]$ |
| $T_v$        | Température de la vitre   | $[^{\circ}C]$ |
| $T_p$        | Température d'absorbeur   | $[^{\circ}C]$ |
| $T_f$        | Température du fluide caloporteur, air  | $[^{\circ}C]$ |
| $T_{Al}$     | Température de la plaque d'aluminium près de l'isolant                        | $[^{\circ}C]$ |
| $U_{av_1}$   | Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre                       | $[w/m^2]$     |
| $U_{ar}$     | Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur                      | $[w/m^2]$     |
| $h_{r,p-v}$  | Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la vitre               | $[w/m^2]$     |
| $h_{c,p-v}$  | Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre              | $[w/m^2]$     |
| $h_{c,p-f}$  | Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide             | $[w/m^2]$     |
| $h_{r,p-Al}$ | Coefficient de transfert radiatif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium  | $[w/m^2]$     |
| $h_{c,f-Al}$ | Coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium | $[w/m^2]$     |
| $I_g$        | Flux solaire global reçu par le capteur plan                                  | $[w/m^2]$     |
| $\tau_v$     | Coefficient de transmission des couvertures transparentes                     | $[w/m^2]$     |
| $\alpha_p$   | Coefficient d'absorption de l'absorbeur                                       | $[w/m^2]$     |

# NOMENCLATURE

|             |   |                              |
|-------------|---|------------------------------|
| $U_{av_1}$  | : Coefficient des pertes thermiques à l'avant de la vitre   | $[w/m^2]$                    |
| $h_{c,v-a}$ | Coefficient de transfert convectif entre la vitre et l'ambiance   | $[w/m^2]$                    |
| $h_{r,v-a}$ | Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et l'ambiance  | $[w/m^2]$                    |
| $U_{ar}$    | Coefficient des pertes thermiques à l'arrière du capteur  | $[w/m^2]$                    |
| $e_{is}$    | Épaisseur de l'isolant placé à l'arrière du capteur   | $[w/m^2]$                    |
| $\varphi$   | étant l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale, les températures $T_v$ et $T_c$ sont les températures absolues. | [K]                          |
| $T_c$       | Températures équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank   | [K]                          |
| $R_a$       | Etant le nombre de Rayleigh,<br>$R_a = \frac{g\beta\Delta T e_v^3}{av}$   |                              |
| $g$         | Accélération de la pesanteur  | $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ |
| $\beta$     | Coefficient de dilatation thermique de l'air<br>$\beta = \frac{1}{T} \left[ \frac{1}{K^\circ} \right]$                      | [1/k]                        |
| $\Delta T$  | Écart de température entre la vitre et l'absorbeur  | [K]                          |
| $e_v$       | Distance entre la vitre et l'absorbeur  | [m]                          |
| $a$         | Diffusivité thermique de la lame d'air entre la vitre et l'absorbeur  | $\left[\frac{m}{2}\right]$   |
| $\nu$       | Viscosité cinétique du milieu   | $\left[\frac{m^2}{2}\right]$ |
| $\varphi$   | Angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal en degré  |                              |

## ***NOMENCLATURE***

---

|             |   |                                |
|-------------|---|--------------------------------|
| $\lambda_a$ | Conductivité thermique de la lame d'air entre la vitre et l'absorbeur (air) | $\left[ \frac{w}{m.K} \right]$ |
| $\lambda_a$ | Conductivité thermique du fluide, l'air en écoulement                       | $\left[ \frac{w}{m.K} \right]$ |
| $D_h$       | Diamètre hydraulique équivalent du conduit utile                            | $[m]$                          |
| $N_u$       | Nombre de Nusselt   |                                |
| $R_e$       | étant le nombre de Reynolds,<br>$R_e = \frac{U_f D_h}{\nu}$                 |                                |
| $P_r$       | Nombre de Prandtl,<br>$P_r = \frac{\mu C_p}{\lambda}$                       |                                |
| $U_f$       | Vitesse d'écoulement dans le conduit utile d'écoulement d'air               | $[m/s]$                        |
| $D_h$       | Diamètre hydraulique équivalent du conduit utile                            | $[m]$                          |

---

### المخلص

في هذا العمل ، لدينا تحليل النمذجة و المحاكاة للأداء الكهربائي والحراري لمجمعات الطاقة الشمسية (الهجين، الكهروضوئية). في تحليلنا قمنا بتصميم نظام كهر وضوئي (نظام + محول+حمولة+ تتبع اقصى نقطة للطاقة) . تظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام نظام المحاكاة ماطلاب, أداء التحكم في السلوك الديناميكي للأنظمة الكهروضوئية.

**الكلمات الرئيسية:** نظام – محول- تتبع اقصى نقطة للطاقة -نمذجة\محاكاة.

### Résumé

Dans ce travail, on a l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique et thermique des capteurs solaires (Hybride PV/T, photovoltaïque (PV)). Dans notre analyse, on a conçu un système photovoltaïque (système + convertisseur +MPPT+charge DC).

Les résultats de simulation obtenus sous Matlab/Simulink montrent la performance du contrôle dans le comportement dynamique des systèmes photovoltaïques.

**Mots clés:** Système PV – Convertisseur - Commande MPPT –Modélisation – Simulation.

### Abstract

In this work, we have the analysis of a modeling and simulation of the electrical and thermal functioning of solar collectors (PV / T hybrid, photovoltaic (PV)). In our analysis, we designed a photovoltaic system (system + converter + MPPT + DC load).

The simulation results obtained with Matlab / Simulink show the performance of the control in the dynamic behavior of photovoltaic systems.

**Keywords:** PV system - Converter - MPPT command - Modeling - Simulation.

---

# **Introduction générale**

La production d'énergie est un domaine de grande importance pour les années de future slon , les besoins énergétiques des sociétés industrialisées. Par Ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leurs économies. De nos jours, une grande partie de la production d'énergie est assurée à partir des sources fossiles. La consommation de ces sources produit des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution.

Energie renouvelable, basé sur des énergies issues du soleil, vent, , de l'eau ou encore de la biomasse sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et L'énergie utile obtenue pour cela nous intéressons à la modélisation de système photovoltaïque avec ses différents composants (capteurs solaires « PV ; T ; PVT ») et commandes comme algorithme Perturbation et observation pour obtenir le point puissance maximal traing .

Au premier chapitre, on fait une description générale sur le système photovoltaïque ses et les capteurs solaires

Le deuxième chapitre, présente les convertisseurs statistiques et leur fonctionnement.

Le troisième chapitre consiste à l'étude de la commande qui on utilisée pour obtenir le point puissance maximal traing .

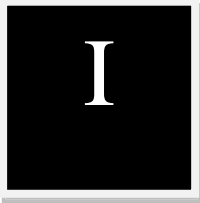
Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation du système et discussions sur les capteurs solaire et le principe de la recherche du point de puissance maximal).

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

# CHAPITRE I

*Système photovoltaïque*





# Système photovoltaïque

---

## **I.1 Introduction :**

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie.

C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, et il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

On peut ainsi compter sur 1000 w/m<sup>2</sup> crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

Dans ce premier chapitre, nous allons parler d'une manière générale des systèmes photovoltaïques(PV), les éléments de captage d'un système PV (source d'énergie PV) et leur modélisation.

Nous aborderons le domaine photovoltaïque dans sa généralité, nous rappellerons brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Après, nous développerons les caractéristiques des cellules photovoltaïques et leur modélisation afin de définir leurs modes de fonctionnement [1].

## **I.2. L'effet photovoltaïque :**

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827)

qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Le photovoltaïque signifie littérairement la «lumière électricité».

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ces bombardements, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [1].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel.

Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [02].

### **I.3. Système photovoltaïque :**

#### **I.3.1 Définition :**

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statique **DC-DC** et **DC-AC** avec un système de commande) et une charge [3].

#### **I.3.2. Le rôle principal du convertisseur statique :**

Les convertisseurs statiques : est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement. Avec l'apparition des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, avec les diodes, les transistors, thyristors etc...Les systèmes de conversion deviennent de plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques:

Continu -----> Continu (Hacheur)

Continu -----> Alternatif (Onduleur)

Alternatif -----> Alternatif (Gradateur) Alternatif -----> Continu (Redresseur) [04].

### I.3.2.1. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs):

La figure (I.1) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge. [9]

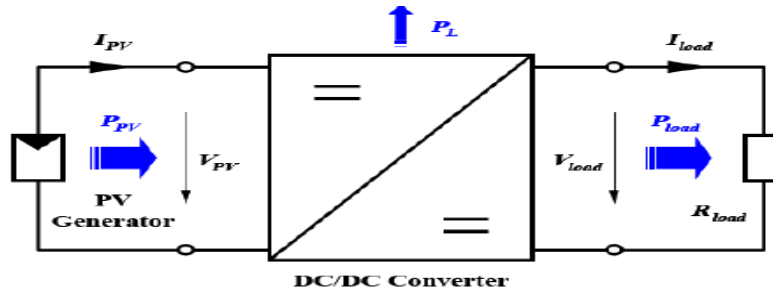


Fig. I-1. Convertisseur DC/DC .

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

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande. Si les pertes internes  $P_L$  du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales. Dans ce qui suit, le principe de fonctionnement de quelques types de convertisseurs DC/DC est décrit. [9]

D'un point de vue circuit, le hacheur apparaît comme un quadripôle figure (I.2), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues. [10]

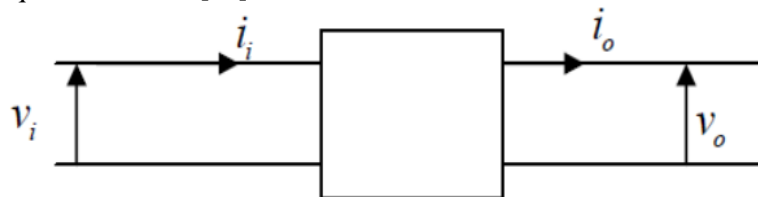


Fig. I-2. Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant figure (I.3). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est

zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. [10]

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante  $f_s$  avec un temps de fermeture  $=Tsd$  et un temps d'ouverture  $= (1-d) Ts$ . Où:

- $T_s$  est la période de commutation qui est égale à  $\frac{1}{f_s}$
- $d$  le rapport cyclique du commutateur ( $d \in [0, 1]$ ).

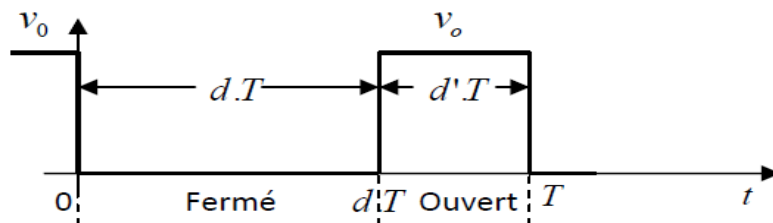


Fig. I-3.périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

Il est évident que le procédé le plus simple pour transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable est le montage en potentiomètre diviseur de tension décrit sur Figure (I.4). [13]

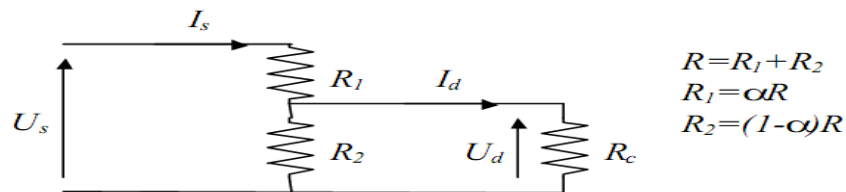


Fig. I-4.Montage potentiomètre.

Le réglage de  $\alpha$  permet de faire varier la tension disponible aux bornes de la charge  $U_d$ :

$$U_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_s = (1 - \alpha) U_s \quad \text{à vide } (R_s + \infty) \quad \text{I.1}$$

Pour  $\alpha = 0$ , on a :  $U_d = U_s$ .

Pour  $\alpha = 1$ , on a :  $U_d = 0$ .

L'inconvénient de ce montage est son rendement médiocre, ce qui s'avère critique pour des applications faisant intervenir des puissances non négligeables.

$$\eta = \frac{P_d}{P_s} \tag{I.2}$$

Le rendement s'écrit :

Avec :  $P_d = U_d \cdot I_d$  et  $P_s = U_s \cdot I_s$  .

Soit après calculs :  $\eta = \frac{R_c \cdot R_2^2}{(R_c + R_2)((R_c + R_2)R_1 + R_c R_2)}$  I.3

Ou encore :  $\eta = \frac{R \cdot R_c (1 - \alpha)^2}{R_c^2 + R_c R + \alpha R^2 - \alpha^2 (R R_c + 2 R^2) + \alpha^3 R^2}$  I.4

Ainsi les montages potentiométrique sont utilisés uniquement en électronique de faible puissance (quelques Watts maximum). En électronique de puissance, on fera systématiquement appel à des hacheurs. On distingue plusieurs types de hacheurs, les deux types de base étant le montage série et le montage parallèle.

Le principe consiste à interrompre périodiquement l'alimentation de la charge par la source. Ce principe est illustré par le schéma de la figure (I.5). [11]

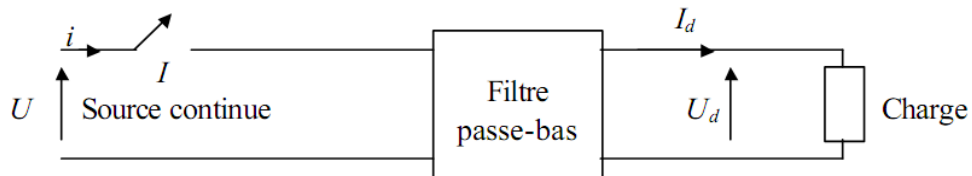


Fig. I-5.Principe du hacheur série.

L'interrupteur commandé hache la tension d'alimentation U. Après filtrage, on obtient une tension Ud constante (avec ici : Ud < U).

En faisant abstraction du filtre passe-bas, on peut comparer ce montage au montage potentiométrique figure (I.6). [11]

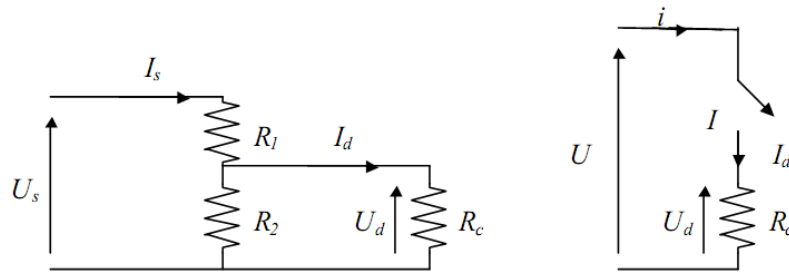


Fig. I-6. Comparaison du hacheur série avec le montage potentiométrique.

### I.3.2.2. Définition du rapport cyclique :

Le rapport cyclique est défini comme le temps  $t_{ON}$  pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage  $T$ , soit : [11]

$$\alpha = \frac{t_{ON}}{T} \quad \text{I.5}$$

On définit également le temps pendant lequel l'interrupteur est fermé par :

$$t_{OFF} = T - t_{ON} \quad \text{I.6}$$

### I.3.2.3. Types des convertisseurs DC/DC :

#### I.3.2.3.a. Hacheur dévolteur (Buck converter) :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La figure (I.7) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [10].

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion  $M = \frac{V_0}{V_i}$  change avec le rapport cyclique du commutateur.

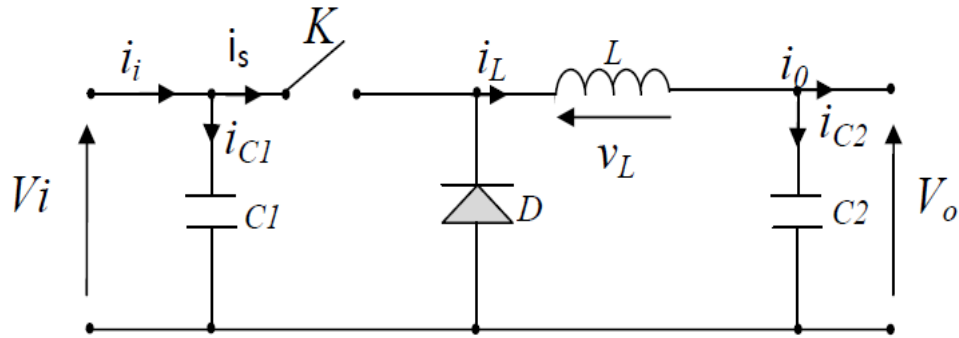


Fig. I-7.Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.

Si le commutateur S1 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 . [ 9 ]

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv} - V_{Load}}{L} \quad I.7$$

Pendant ce temps, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Si S1 est désactivé après  $t = t_1$ , 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. Selon l'équation (I.8), le courant décroît, puisque

$$\frac{di_L}{dt} = - \frac{V_{Load}}{L} \quad I.8$$

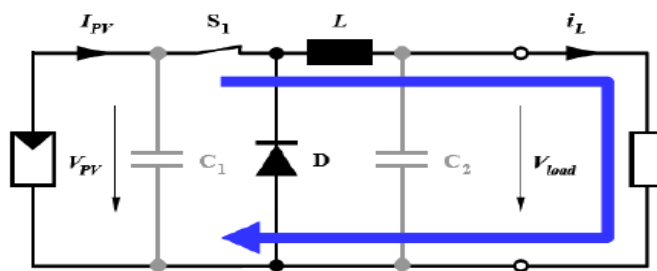


Fig. I-8.Convertisseur Buck durant l'état ON

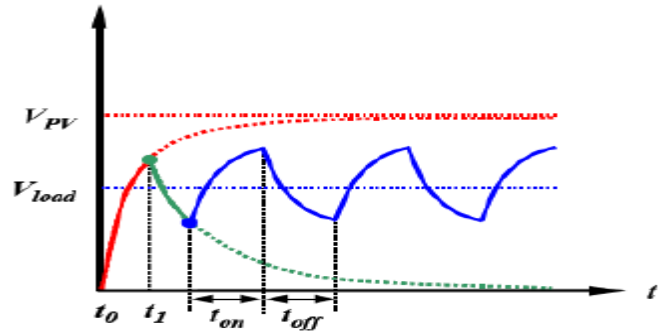
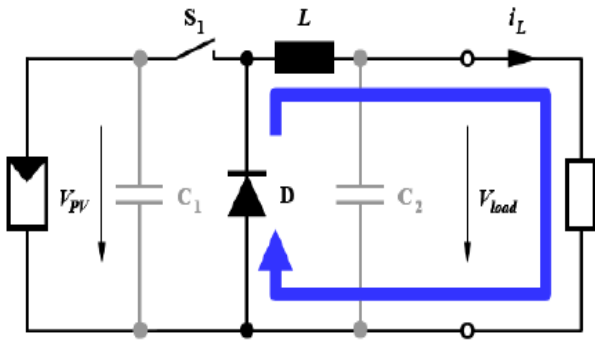


Fig. I-9. Convertisseur Buck durant l'état off

Fig. I-10. formes d'onde des tensions

Vpv et Vload dans le cas du convertisseur Buck

Le condensateur C1 permet de réduire les pics du courant tiré du GPV, de soutenir la tension d'alimentation VPV et d'atténuer les bruits. Le commutateur S1 est activé et désactivé avec une fréquence de commutation  $f = \frac{1}{T}$ . Comme l'illustre la figure (I.10), la tension aux bornes de la charge présente une ondulation qui peut être lissée par l'ajout d'un condensateur C2. Quoiqu'il en soit, la valeur moyenne  $V_{load}$  est inférieure à VPV. Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'au kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. [9]

La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_{load} = \frac{t_{on}}{T} V_{pv} = D \cdot V_{pv} \tag{I.9}$$

Avec :  $T = t_{on} + t_{off}$  : est la période de commutation.

$D = \frac{t_{on}}{T}$  : est le rapport cyclique ( $0 < D < 1$ )

Grâce à cette équation, on peut voir que la tension de sortie varie linéairement avec le rapport cyclique D.

Il est à noter que l'interrupteur utilisé est un dispositif à semi-conducteur en commutation. Généralement, un transistor MOSFET est utilisé pour son faible temps de commutation afin de minimiser les pertes de puissance.



I.3.2.3.b. Convertisseur survolteur (Boost converter) :

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP. [9]

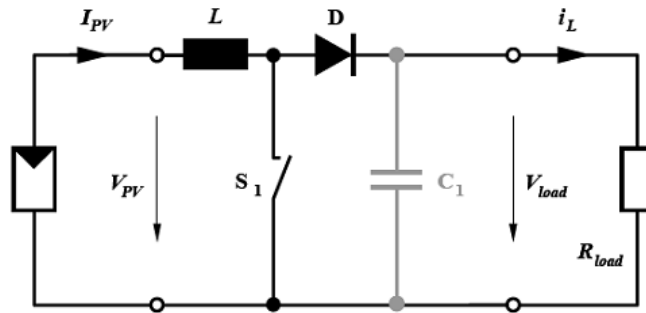
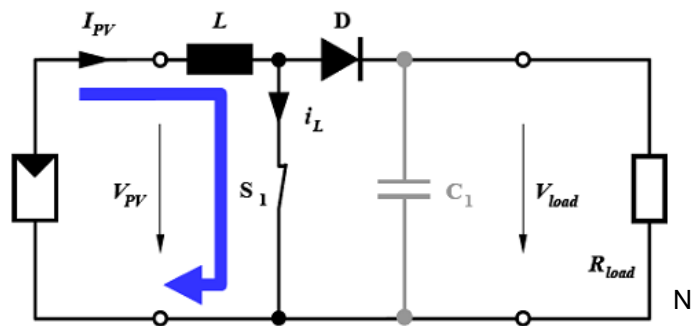


Fig. I-11.Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost



Si le commutateur  $S_1$  est activé à  $t_0$  et si la chute de tension aux bornes de la diode est négligée, alors  $V_{Load}$  est égale à  $V_{PV}$ . Lorsque le commutateur est activé figure (I.11), la tension de la charge chute immédiatement à zéro si le condensateur  $C_1$  est omis. Le courant du circuit  $i_L$  circule à travers l'inductance  $L$  et augmente suivant l'équation : [1]

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L} \tag{I.10}$$

Lorsque  $S_1$  est désactivé figure (I.12), l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant  $i_L$  traversant l'inductance traverse ensuite la diode  $D$ , le condensateur  $C_1$  et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Le courant décroît ensuite progressivement, car  $V_{load} > V_{PV}$  :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv} - V_{Load}}{L} \tag{I.11}$$

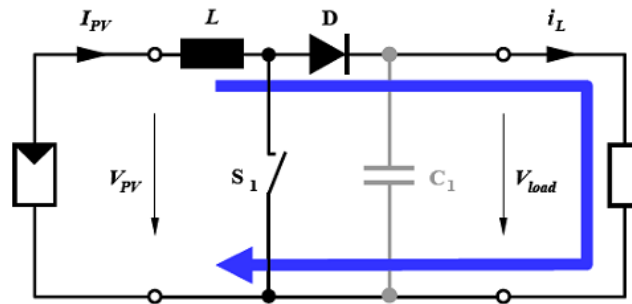


Fig. I-12. Convertisseur Boost durant l'état OFF.

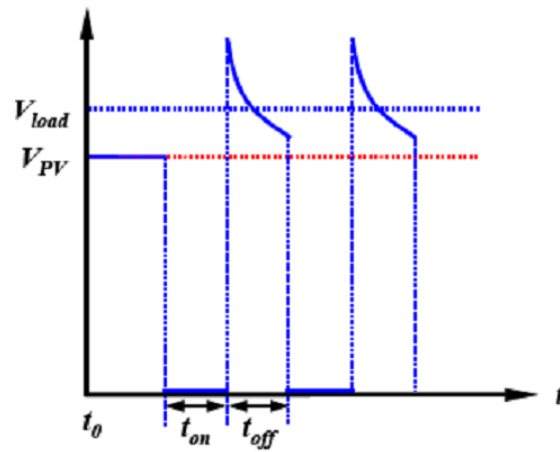


Fig. I-13. Tensions  $V_{PV}$  et  $V_{Load}$  dans le cas du convertisseur Boost .

La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur  $C_1$ , lorsque le commutateur est activé. Le condensateur est supposé assez grand pour pouvoir lisser la tension de la charge. La tension de la charge est donnée par :

$$V_{load} = \frac{T}{t_{off}} V_{PV} = \frac{1}{1-D} V_{PV} \tag{I.12}$$

Avec :  $D = \frac{t_{on}}{T}$  : est le rapport cyclique ( $0 < D < 1$ )

### I.3.2.3.c. Convertisseur Buck-Boost :

Un convertisseur Buck-Boost 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.

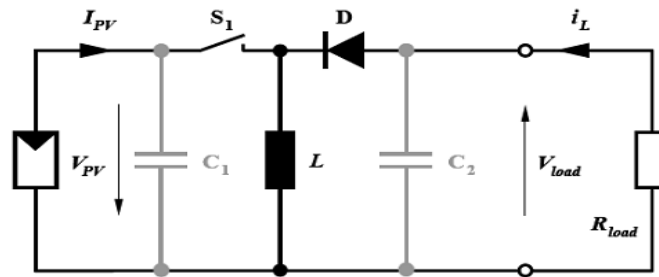


Fig. I-14.Circuit électrique d'un convertisseur Buck-Boost .

Durant l'état «ON», l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance L figure(I.11). L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état «OFF» Figure (I. 12). En raison de la présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent,  $V_{load}$  a une polarité opposée à  $V_{pv}$ . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravant. Comme indiqué précédemment, le condensateur  $C_1$  soutient la tension d'alimentation  $V_{PV}$ ,  $C_2$  lisse la tension de la charge. En conclusion, l'amplitude de  $V_{Load}$  peut être inférieure ou supérieure à  $V_{PV}$  suivant la valeur de  $t_{on}$  et  $t_{off}$  : [10]

$$-\frac{t_{on}}{t_{off}} V_{PV} = -\frac{D}{1-D} V_{PV} \tag{I.13}$$

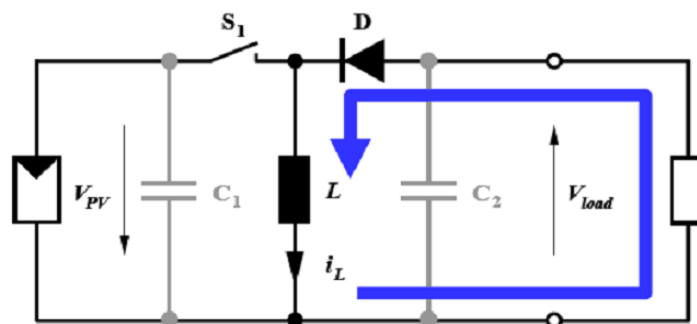


Fig. I-15.Convertisseur Buck-Boost durant L'état OFF.

Dans les trois cas cités en haut, l'adaptation entre la source et la charge est réalisée en choisissant des valeurs adéquates du rapport cyclique.

Généralement, pour les convertisseurs DC/DC, l'interrupteur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Un signal PWM est un

signal rectangulaire de fréquence ...fixe, mais dont le rapport cyclique D est variable. La valeur du rapport cyclique permet de contrôler la quantité d'énergie transmise. [10]

### **I.3.3. Types d'un système solaire photovoltaïque :**

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

#### **I.3.3.1. Système autonome :**

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types [05].

##### **I.3.3.1.1. Système autonome sans batterie :**

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque: le Réservoir d'eau sert de stockage) [5].

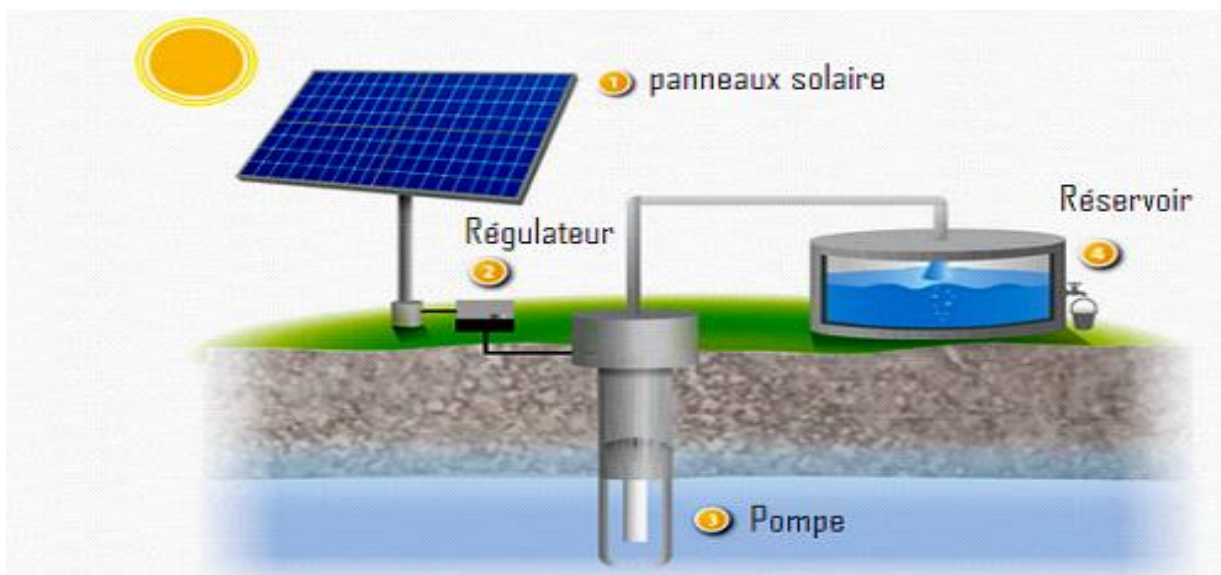


Fig. I-16. Système autonome sans batterie .

### I.3.3.1.2. Systeme autonome avec batterie :

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ **PV** sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit) [5].



Fig. I-17. Systeme autonome avec batterie .

### I. 3.3.2. Systeme hybride :

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (**SHSER**) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.

Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport décarburant sont élevées où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. [2]

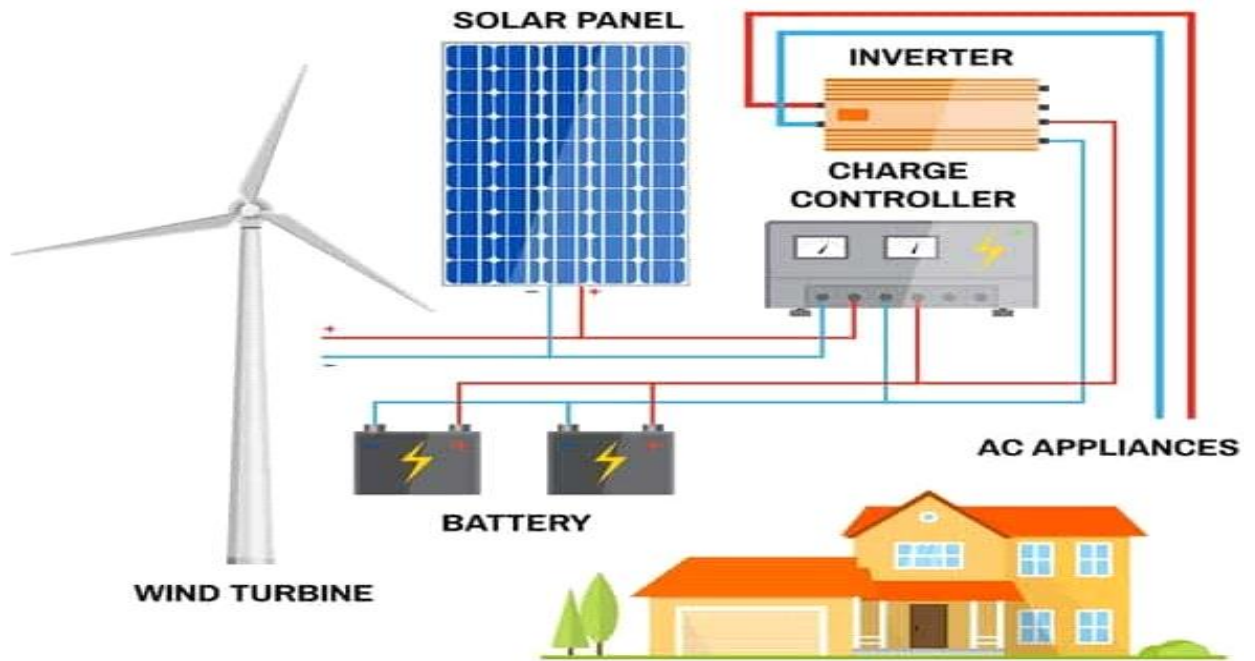


Fig. I-18. Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) .

### **I.3.3.3. Système raccordé au réseau électrique :**

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC-AC). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même [5].

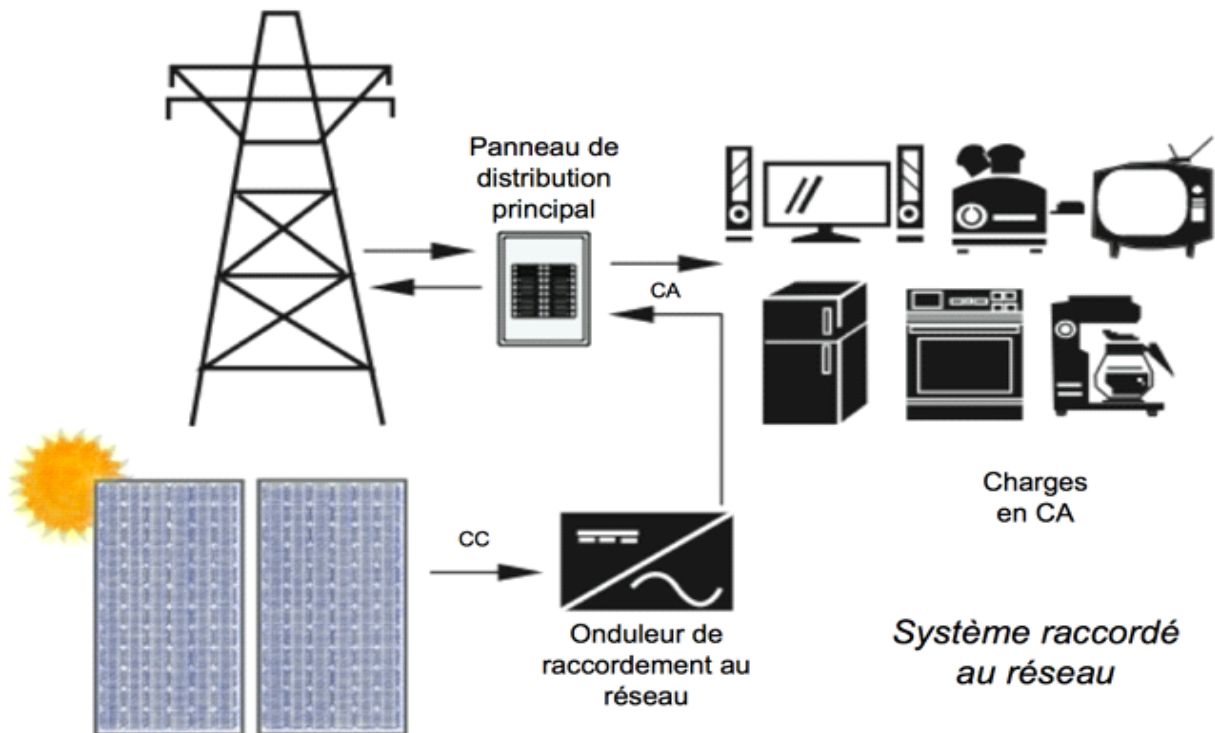


Fig. I-19. Système raccordé au réseau électrique .

### I.4. La cellule PV:

#### I.4.1. Définition :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [06].

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction).

Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

La cellule solaire est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque.

Elle est basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre **0.3V** et **0.7V** en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

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 (bande interdite) [8].

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur et son énergie supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite du matériau  $E_g$ , 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 crée un champ  $E$  qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions **P** et **N**.

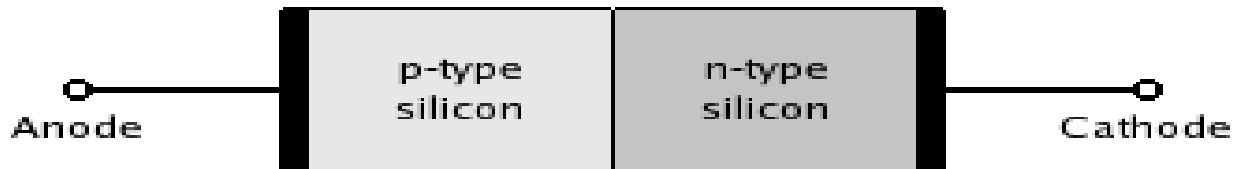


Fig. I-20. La jonction PN .

### I.4.2. Technologie photovoltaïque :

Les cellules solaires sont classées en trois générations.

À l'heure actuelle il y a des recherches simultanées sur les trois générations. Suite alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule **PV** [07].

#### I.4.2.1. Cellules de première génération :

Elles sont basées sur une seule jonction **P-N** et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque. Cette méthode de production est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté.

On différencie les cellules en silicium monocristallin et en silicium poly-cristallin [08].

##### I.4.2.1. a. Cellule au silicium monocristallin :

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher. Est présentée sur la Figure.6. [09].



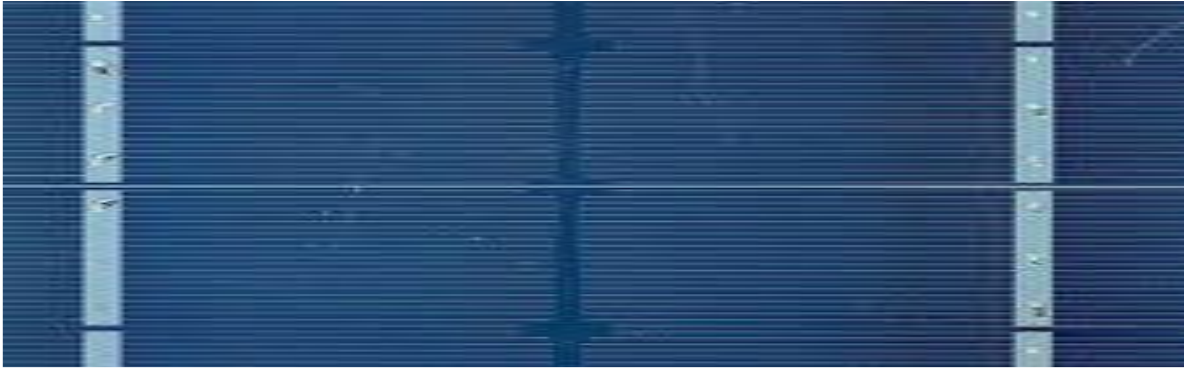


Fig. I-21. Cellule au Silicium Mono –cristallin .

#### **I.4.2.1. b. Cellule au silicium poly-cristallin:**

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser, est présentée sur la Figure .7. [09].

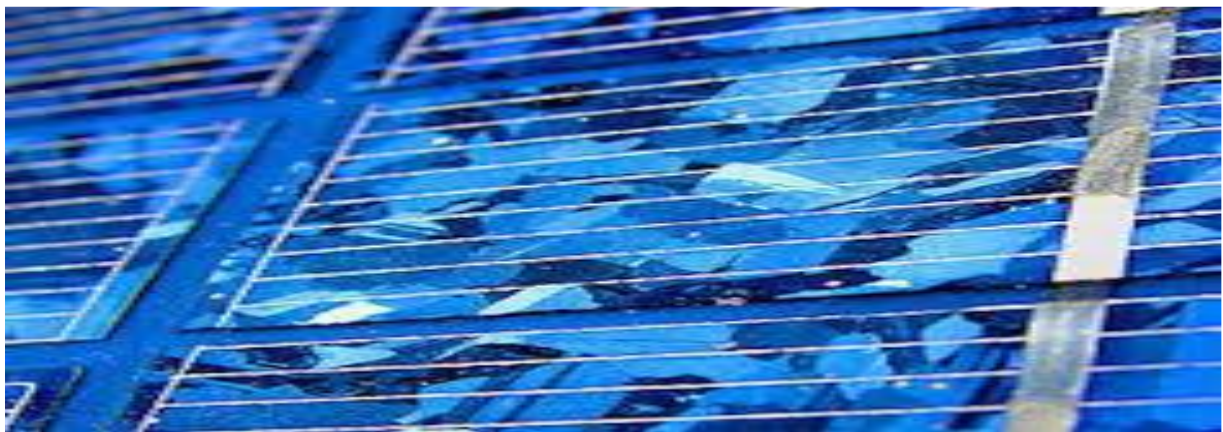


Fig. I-22. Cellule au Silicium Poly-cristallin .

#### **I.4.2.2. Cellules de deuxième génération :**

Les couches minces constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans ce cas, le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple).

Le silicium amorphe (**a-Si**) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le **CDTE** (Tellure de Cadmium) et le **CIGS** (Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium) font notamment partie de cette génération.

La production de ce type de cellules est moins coûteuse que celle de la **1ère** génération puisqu'elles consomment moins de matériaux semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation en « wafers ».

Elles présentent l'avantage de fonctionner avec un éclairage faible, et d'être moins sensible aux températures élevées que les cellules mono ou poly cristallines.

En revanche, leur rendement est faible, compris entre 5 et 10%, soit environ 16m<sup>2</sup> pour obtenir 1kWc [10].

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces est présentée sur la Figure.8.[9].



Fig. I-23. Cellule au Silicium amorphe (couche mince) .

### **I.4.2.3. Cellules de troisième génération :**

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles qui sont développées en ce moment en laboratoire, mais qui ne sont pas encore industrialisées.

Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif [04] :

- ❖ Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes) ;
- ❖ Cellules à concentration (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont Habituellement pas absorbés par la cellule) ;
- ❖ Cellules à électrons chauds produisant plus de paires d'électron/trou pour des énergies Supérieures à la bande d'énergie ;
- ❖ Cellules organiques.

### **I.4.3. Comparaison entre les différents types :**

De nombreuses informations ont été fournies pour chaque cellule photovoltaïque, qu'elles soient de première, de deuxième ou de troisième génération.

Les plus intéressantes d'entre elles ont été rassemblées sous la forme d'un tableau, l'objectif étant de faciliter les comparaisons. Les rendements indiqués ont été vérifiés en 2015 [11].

Tableau. I -1. Comparaison entre les différents types .

| Types                        | Rendement en Labo (%) | Rendement commercial | Epaisseur ( $\mu\text{m}$ ) | Niveau de développement  |
|------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|--|
| 1 <sup>ere</sup> generation  |                       |                      |                             |  |
| Monocristallin               | 27.70                 | 12-20                | 200-350                     | Production industrielle  |
| Poly cristallin              | 20.80                 | 11-15                | 200-350                     | Production industrielle  |
| 2 <sup>eme</sup> génération  |                       |                      |                             |  |
| Silicium amorph              | 13.40                 | 5-9                  | 1                           | Production industrielle  |
| CIGS                         | 23.30 9-              | 9-11                 | 1-2                         | Production industrielle  |
| CDTE                         | 21.60                 | 6-9                  | 2-8                         | Production industrielle  |
| 3 <sup>eme</sup> génération  |                       |                      |                             |  |
| Cellule organique            | 11.10                 | /                    | 0.1                         | Au stade de la recherche   |
| Cellule multi-jonctions (4j) | 46.00                 | /                    | Non connue                  | Au stade de la recherche, Production exclusivement pour applications spatiales |
| Cellule de Grätzel           | 15.00                 | /                    | 1                           | Au stade de la recherche   |

### I.5.Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque :

#### I.5.1. Tension de circuit ouvert VCO :

Si on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0.6V, appelée tension en circuit ouvert VCO (elle varie légèrement avec l'éclairement). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une

diode, ce qui confirme le fait qu'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction **PN**. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série [12]

### I.5.2. Courant de court-circuit **ICC** :

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une cellule en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit **ICC**. De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module [13].

### I.5.3. Puissance :

Le but recherché par tous les utilisateurs de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible.

la caractéristique courant tension d'une cellule sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension × intensité).

Pour l'éclairement considéré, le point de puissance maximale **MPPT** représente le point où la puissance de la cellule est maximale. Ce point, est associé à une tension maximale **VOPT** et à une intensité maximale **IOPT**.

C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (**WC**) [13].

### I.5.4. Le rendement énergétique :

Est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite **Pm** et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module.

Soit (**S**) la surface du module et (**E**) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\eta = \frac{P_m}{E S} = \frac{V_{OPT} I_{OPT}}{E S} \quad I.14$$

### I.5.5. Facteur de forme :

On appelle facteur de forme **FF**, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule **P<sub>MAX</sub>** (**IOPT**, **VOPT**) et le produit du courant de court-circuit **ICC** par la tension de circuit-ouvert **VCO** (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température.

Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites **RS** et **RSH** [10].

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} V_{OC}} = \frac{I_{OPT} V_{OPT}}{I_{CC} V_{OC}} \quad I.15$$

### I.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la figure .9. Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt. [10].

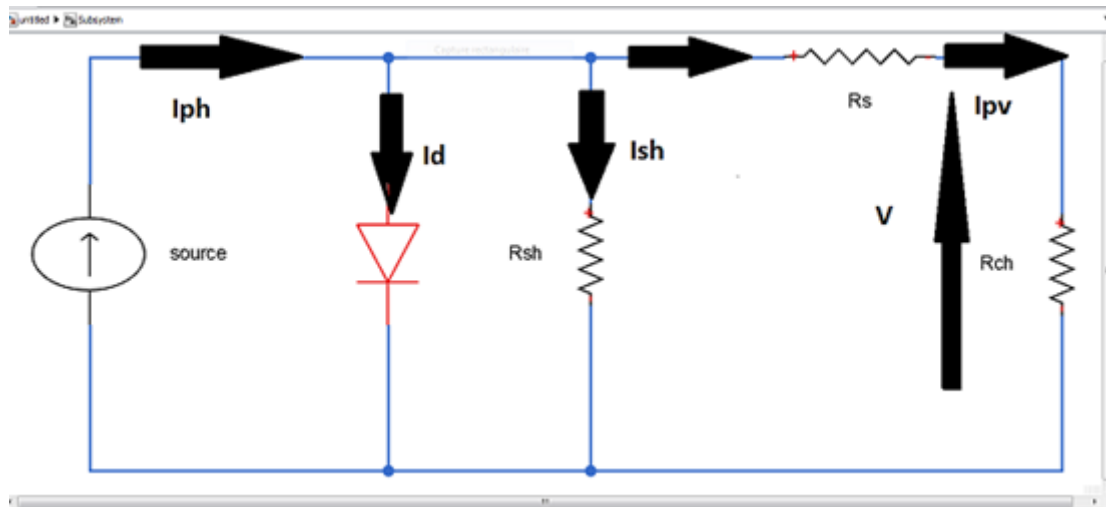


Fig. I-24 .Modèle électrique d'une cellule PV

En se basant sur le circuit, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante :

$$I = I_{PH} - I_d - I_{sh} \quad I.16$$

Dans ces équations suivantes ,  $I_{ph}$  est le photo-courant d'une cellule,  $I_0$  est le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule,  $q$  et  $a$  et  $K$  et  $T$  désignent respectivement la charge de l'électron, facteur d'idéalité de la diode, Constante de Boltzmann et la température de la cellule,  $V$ , est la tension aux bornes de la cellule,  $I$ , est le courant de la cellule,  $R_s$ , et  $R_{sh,c}$  sont les résistances série et shunt de la cellule

L'équation de base (1) de la cellule photovoltaïque élémentaire ne représente pas la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque. Les modules sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle. Les cellules connectées en série augmentent la tension et les cellules connectées en parallèle augmentent le courant.

Le logiciel MATLAB offre ses paramètres et ses caractéristiques I-V, P-V, donc nous pouvons valider notre modélisation en se basant sur tout ce qu'est fourni par le logiciel MATLAB

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{q(v + R_s I)}{\alpha T K N_s} - 1 \right) - \frac{V + r_s I}{r_{sh}} \quad \text{I.17}$$

Ou :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad \text{I.18}$$

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left( \frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot \left[ \frac{q \cdot E_{g0} \cdot (1/T_n - 1/T)}{n \cdot K} \right] \quad \text{I.19}$$

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left( \frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T} \right) - 1}} \quad \text{I.20}$$

$$I_{sh} = \frac{V + r_s I}{r_{sh}} \quad \text{I.21}$$

Par conséquent, le comportement physique du module photovoltaïque est en relation avec **I<sub>ph</sub>**, **I<sub>0</sub>**, **R<sub>s</sub>** et de **R<sub>sh</sub>** d'une part, et d'une autre part avec deux autres paramètres environnementaux à savoir la température et l'irradiation solaire. Puisque la modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement matlab. [8]

cellules sont connectées en série alors, **I<sub>ph</sub>** = **I<sub>ph,c</sub>** et **I<sub>0</sub>** = **I<sub>0,c</sub>** et **V** = **V<sub>c</sub>** \* **N<sub>s</sub>** et **R<sub>s</sub>** = **R<sub>s,c</sub>** \* **N<sub>s</sub>** et **R<sub>sh</sub>** = **R<sub>sh,c</sub>** \* **N<sub>s</sub>**. [8].

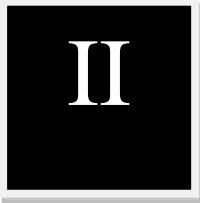
Spécifications du module PV dans les conditions de test standard (STC):

### I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu des notions sur l'énergie solaire et ses caractéristiques ainsi que les différents types de systèmes d'alimentations photovoltaïques et nous avons présenté le système de conversion photovoltaïque avec ses différents constituants et des différentes architectures.

# CHAPITRE II

*les capteurs solaire*



## **Les capteurs solaires**

---

### **II.1 Introduction :**

Un panneau solaire est un dispositif convertissant une partie du rayonnement solaire en énergie thermique ou électrique, grâce à des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques respectivement [1].

### **II .2.Capteur thermique :**

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique, ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur[1]

#### **II.2.1.Types des capteurs :**

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considéré, la nature du fluide caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre. Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigel, un fluide à changement de phase, ou encore une huile possédant une température de vaporisation élevée pour les applications nécessitant de hautes températures. [2].

Les capteurs à fluide caloporteur liquide (aussi appelés abusivement capteurs à eau) se répartissent en trois familles :

#### **Les capteurs à tubes sous vide :**

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un tube sous vide simple ou double. Le vide améliore l'isolation contre les pertes en convection, par rapport au capteur précédent. Deux principes sont rencontrés : le premier principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, le fluide caloporteur parcourt le tube en aller et retour pour recueillir la chaleur ; le second est plus poussé technologiquement, il fait appel à un caloduc, utilisant un second fluide caloporteur restant dans le tube (voir article détaillé, à faire dans tube sous vide) [3].



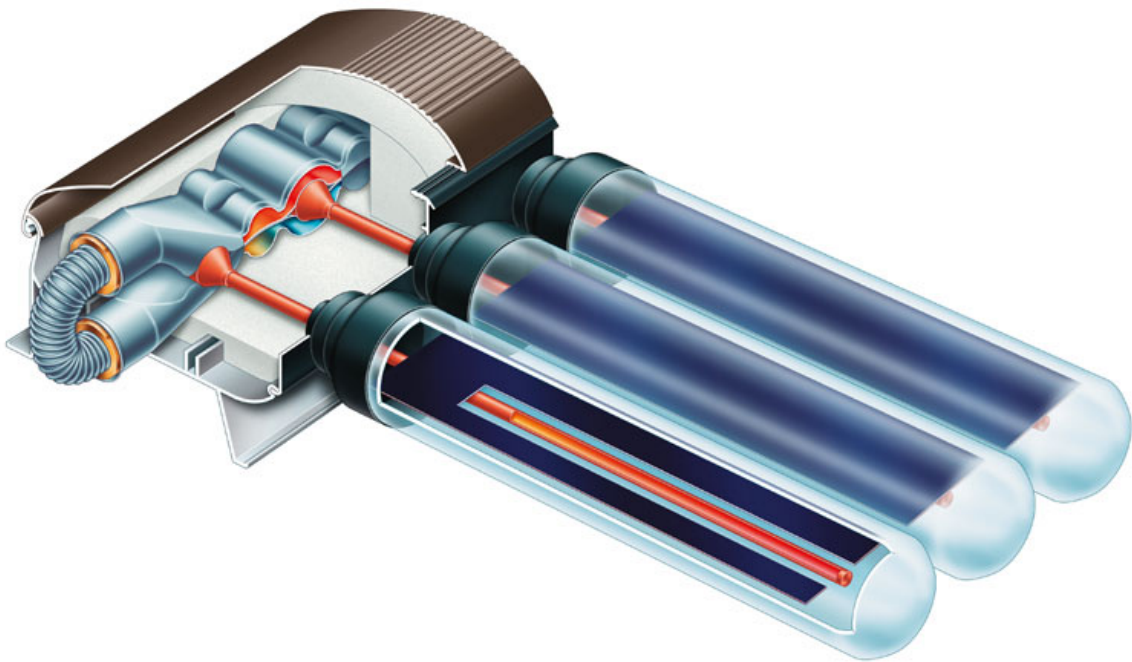


Fig. II-1- Les capteurs à tubes sous vide .

### **Les capteurs plans vitrés :**

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel alimentaire, de type mono-propylène glycol, passe dans un serpentin plaqué en sous face d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé de laine minérale et/ou de mousses composites polyuréthanes ; la vitre est transparente à la lumière du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de l'intérieur, ce qui piège la chaleur [3].

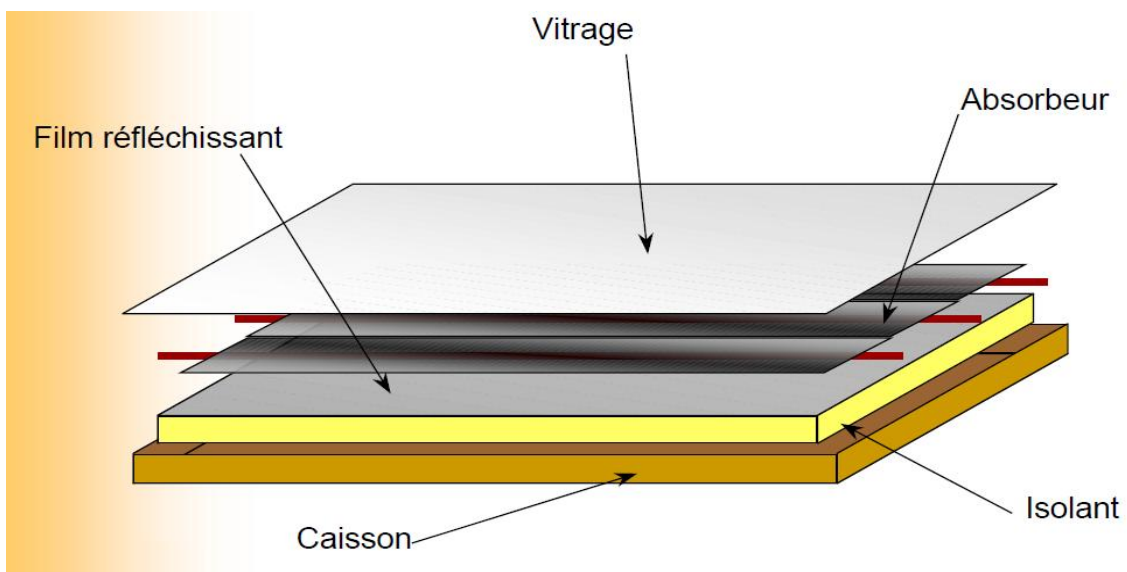


Fig. II-2- Les capteurs plans vitrés .

### **Les capteurs non-vitrés :**

Par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple (réseau de tubes plastiques noirs, le plus souvent en EPDM) utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été ; ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines [3].

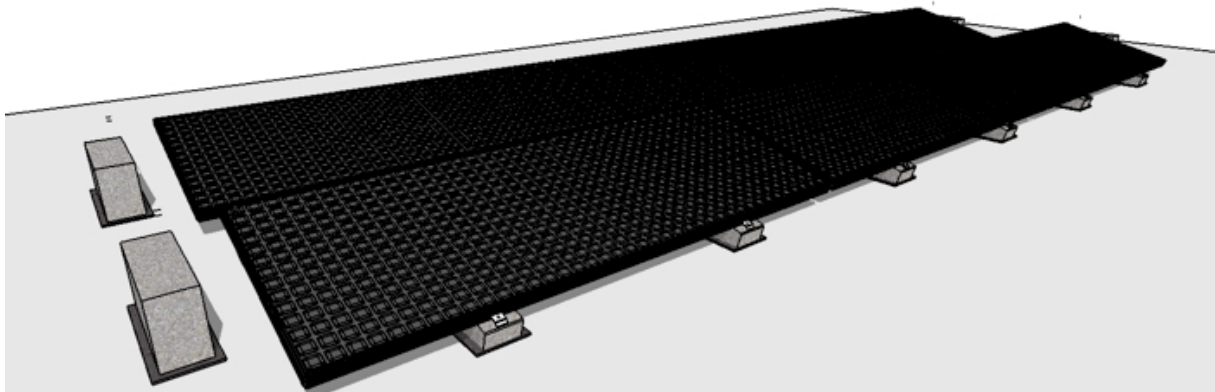


Fig. II-3- Les capteurs non-vitrés .

### **II.2.2.Fonctionnement :**

Dans les capteurs thermiques, le liquide circule dans des tubes soudés sur une plaque noire appelée absorbeur. Pour obtenir un meilleur rendement, l'ensemble est placé dans une boîte vitrée isolante afin d'obtenir une couche d'air isolante. Avec un bon ensoleillement, et si la température ambiante n'est pas trop basse, un simple réseau de tubes à ailettes peut constituer un panneau avec un bon rendement. L'absorbeur est chauffé par le rayonnement solaire et transmet sa chaleur à l'eau qui circule dans les tubes. [2].

Les premiers absorbeurs étaient peints en noir mat afin de capter un maximum d'énergie lumineuse. Mais la peinture noire mate a souvent l'inconvénient d'avoir une émissivité importante dans l'infrarouge. Ce qui provoque un rayonnement plus élevé depuis l'absorbeur. Ce rayonnement réchauffe la vitre, qui dissipe une partie de cette énergie à l'extérieur, par convection et rayonnement. Ce phénomène augmente les déperditions et nuit au rendement. C'est pourquoi il est intéressant d'utiliser des absorbeurs traités au chrome (par exemple), qui émettent un rayonnement infrarouge beaucoup plus faible. On parle de surfaces sélectives, elles absorbent bien le rayonnement visible où se situe la grande partie de l'énergie provenant du Soleil (un corps noir à haute température), mais réémettent peu dans l'infrarouge (rayonnement de l'absorbeur, corps à relativement basse température).

Si l'eau ne circule pas, la température interne au capteur monte jusqu'à ce que les déperditions soient égales à l'énergie reçue, ce qui peut entraîner l'ébullition de l'eau. Cette température peut être très élevée en été, l'après-midi, quand les besoins de chauffage sont déjà couverts. On appelle température de stagnation la température de l'absorbeur dans cette situation [4].

De nombreuses autres innovations techniques ont permis d'augmenter le rendement des panneaux thermiques, telles que :

- des vitres ayant une faible teneur en fer pour améliorer la transparence (de 85 % à 95 %, si on y ajoute un traitement antireflet);
- des soudures entre la plaque absorbante et le réseau de tuyauterie réalisées par impacts lasers au lieu de sonotones (soudure ultrason);

Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour le chauffage et/ou pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) dans un chauffe-eau solaire [3].

Dans les capteurs thermiques à air, c'est de l'air qui circule et qui s'échauffe au contact des absorbeurs. L'air ainsi chauffé est ensuite ventilé dans les habitats pour le chauffage ou dans des hangars agricoles pour le séchage des produits.

### **II.2.3.Efficacité et rendement :**

La mesure de l'efficacité du capteur est le rapport entre la puissance thermique qu'il fournit au fluide caloporteur et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la surface utile de ce capteur, ce rapport est nommé le rendement du capteur.

La puissance fournie correspond à la puissance transformée en chaleur dans le capteur, moins les pertes : rayonnement infrarouge renvoyé à l'extérieur, chaleur dissipée à l'extérieur.

Le meilleur rendement est obtenu quand les pertes sont nulles, c'est-à-dire quand la température du capteur est inférieure ou égale à la température ambiante, malgré l'éclairement. Ce cas est par exemple celui où la température d'utilisation est inférieure à la température ambiante extérieure, tel que le chauffage d'une piscine par temps chaud.

À l'extrême opposé, le rendement est nul quand le fluide caloporteur est arrêté, la température atteint alors la température de stagnation, où les pertes sont égales à la puissance transformée en chaleur. Cette température permet de juger de la qualité d'isolation du capteur, mais elle ne permet pas de juger des performances du système intégrant ce capteur [5].

### **II.2.4.Application :**

Les panneaux solaires thermiques sont employés sous toutes les latitudes pour plusieurs utilisations : chauffage des serres, des piscines, de l'eau sanitaire, des locaux, climatisation solaire

### **II.2.4.1. Chauffage et eau chaud combinés :**

Le taux de couverture des besoins cumulés (chauffage + eau chaude) peut aller au-delà de 50 %, sous réserve que les besoins en chauffage soient limités (isolation, minimisation des surfaces à chauffer...).

Le DT maximal pour ces applications, en France, doit être considéré de 50 °C :

Hiver :

Pour le chauffage : température du stock (eau) de 50 °C et température extérieure de 0 °C (stockage dans de l'eau). La température du stock est limitée par le puisage permanent en énergie que fait le système opérationnel de chauffage. Dans le cas d'un stockage dans la masse (planchers ou murs), la température du stock (alors considérée dans la structure) ne peut dépasser 30 °C dans un plancher ou 40 °C dans des murs mais un stock additionnel (eau) peut assurer la récupération de l'excédent [6].

Été :

Température du stock (eau) de 80 °C et température extérieure de 30 °C.

Trois conditions doivent être réunies à la construction pour obtenir la couverture solaire totale des besoins :

- Orientation des capteurs par rapport à l'ensoleillement dans l'hémisphère nord : orientation Sud +/- 25° et inclinaison de 35° à 70° ; l'écart de rendement dans ces conditions est faible et limité à 15 % soit pour un taux d'économie de 45 % une variation inférieure à 7 %.
- Un chauffage solaire peut s'installer sur des habitations récentes ou anciennes.
- Place suffisante faite à un ou deux ballons d'eau placés selon les cas soit dans une chaufferie, garage soit dans la zone chauffée.

Les retours d'expériences faites en France, Suisse et Allemagne sont bons avec un recul d'environ 30 ans [6].

Pour l'habitat neuf (très bien isolé), la consommation d'énergie pour chauffer l'eau chaude est du même ordre que celle du chauffage. Un chauffage solaire est alors très efficace car il peut couvrir une très grande partie des besoins d'eau chaude et une bonne partie des besoins de chauffage. Le taux d'économie d'énergie augmente et peut aller jusqu'à 70 %<sup>11</sup>. Des émetteurs basses températures sont à privilégier pour maximiser le rendement solaire : radiateurs basses températures ou mieux, plancher chauffant et mur chauffant à basses températures.

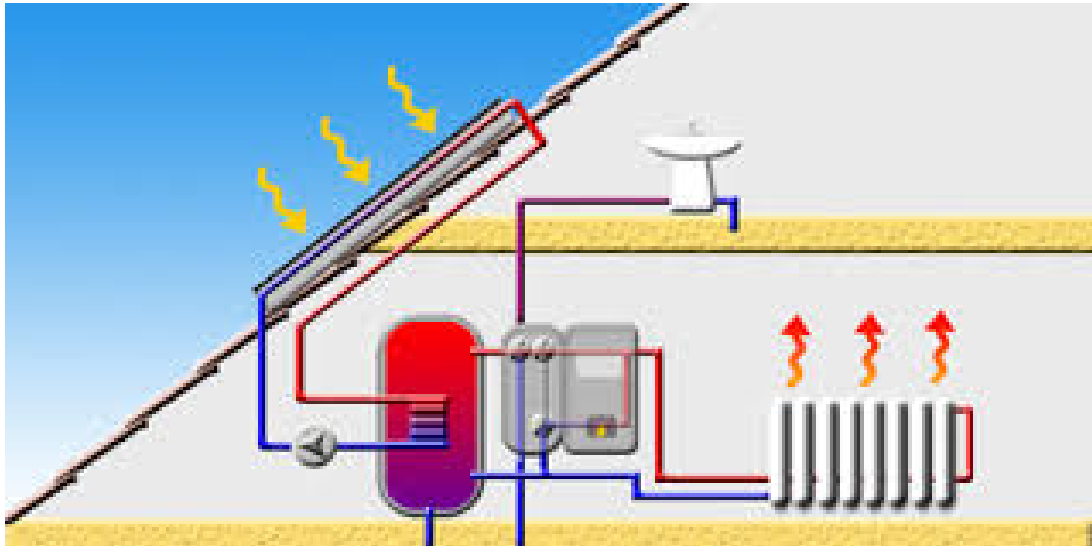


Fig. II-4- Chauffage et eau chaud combinés .

### **II.2.4.2.Eau chaud solaire :**

Le chauffe-eau solaire est la principale utilisation des panneaux solaires thermiques du fait de sa rentabilité et de la faible évolution saisonnière des besoins d'eau chaude, souvent aussi important en été qu'en hiver. Les économies procurées permettent d'amortir l'installation bien avant sa fin de vie.

L'énergie solaire captée dans la journée est stockée sous forme d'eau chaude dans un ballon de quelques centaines de litres (pour une maison). Sous la latitude de Paris, une autonomie de plusieurs jours, en été, est possible avec une surface de capteurs suffisante (1 à 2 m<sup>2</sup> par personne), et un volume du ballon de l'ordre de 50 à 75 litres par utilisateur. Afin de compenser les insuffisances d'ensoleillement, un appoint est nécessaire. On utilise dans la plupart des cas une résistance électrique raccordée au réseau, avec une régulation adaptée.

Dans les régions chaudes, les capteurs solaires utilisés sont souvent rudimentaires : un réservoir peint de couleur sombre, un long tuyau déroulé sur un toit...

En France, pour les installations thermiques solaires de plus de 50 m<sup>2</sup>, un télé-suivi des installations est imposé par l'ADEME en contrepartie des subventions versées. Ce suivi permet de garantir les résultats solaires (GRS) en impliquant dans le projet le constructeur des panneaux, le bureau d'étude ayant conçu l'installation, l'installateur et l'entreprise chargée de la maintenance. Ce suivi est impératif car le dysfonctionnement d'une installation solaire thermique est indolore puisqu'en cas d'arrêt, la production d'eau chaude est assurée par l'appoint [7].

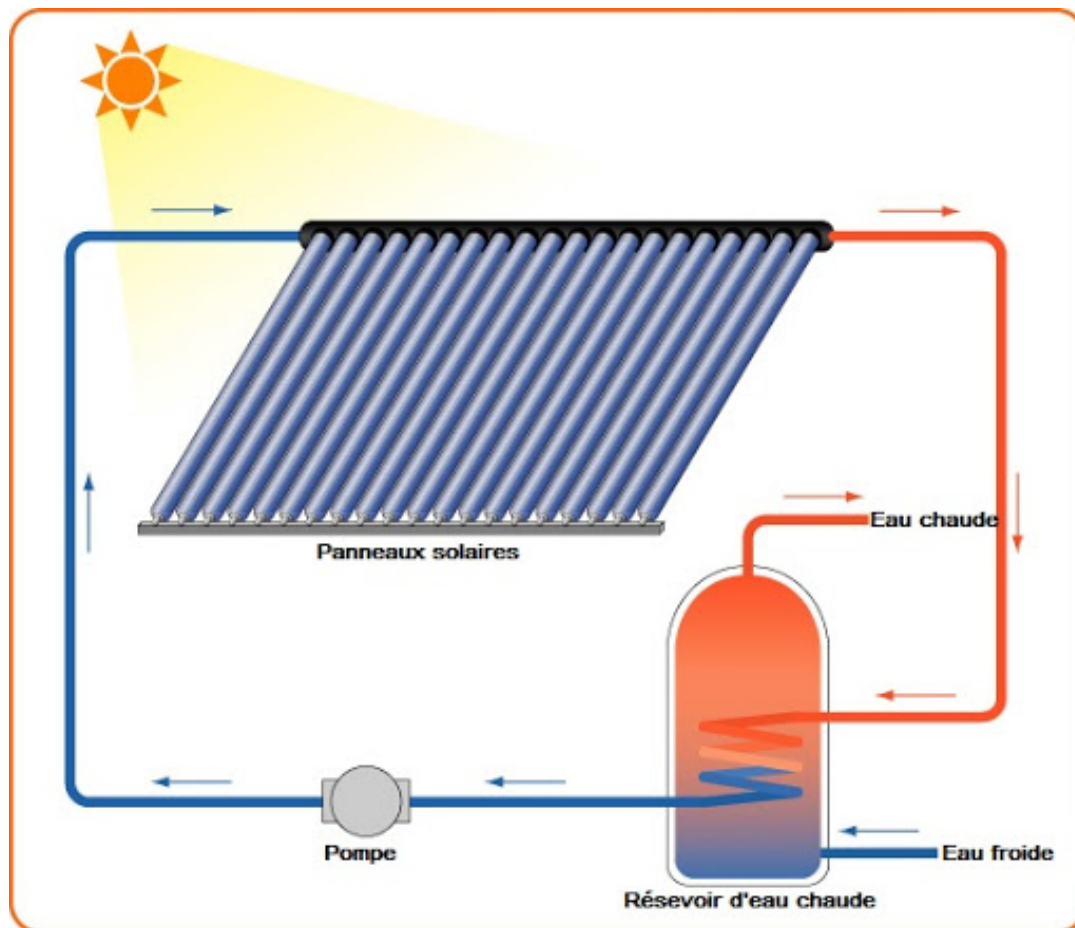


Fig. II-5- Eau chaud solaire .

### **II.2.4.3. Chauffage solaire :**

Pour des maisons bien isolées, l'énergie solaire peut couvrir près de 50 % des besoins de chauffage et 75 % des besoins thermiques d'eau chaude sanitaire, soit une économie globale allant jusqu'à 70 %. En rénovation, le chauffage solaire peut couvrir jusqu'à 50 % des besoins de chauffage et d'eau chaude. Le retour sur investissement est similaire en rénovation et dans le neuf car dans l'habitat neuf la surface des capteurs solaires est plus petite (7 % de la surface habitable contre 10 % en rénovation) ; la productivité des capteurs est alors similaire [8].

### **Chauffage solaire par air :**

Le choix d'un chauffage solaire par air nécessite une adaptation de l'architecture. Un système de chauffage solaire passif peut ne comporter qu'une grande verrière que l'on occulte par un rideau extérieur lorsque le besoin de chauffage ne se fait pas sentir ou en l'absence de rayonnement solaire pendant la période froide.

Le système de captage peut être une grande surface vitrée placée devant un mur sombre qui emmagasinera la chaleur ou encore un panneau dans lequel circule l'air qui traversera un réservoir rempli de galets [5][8].

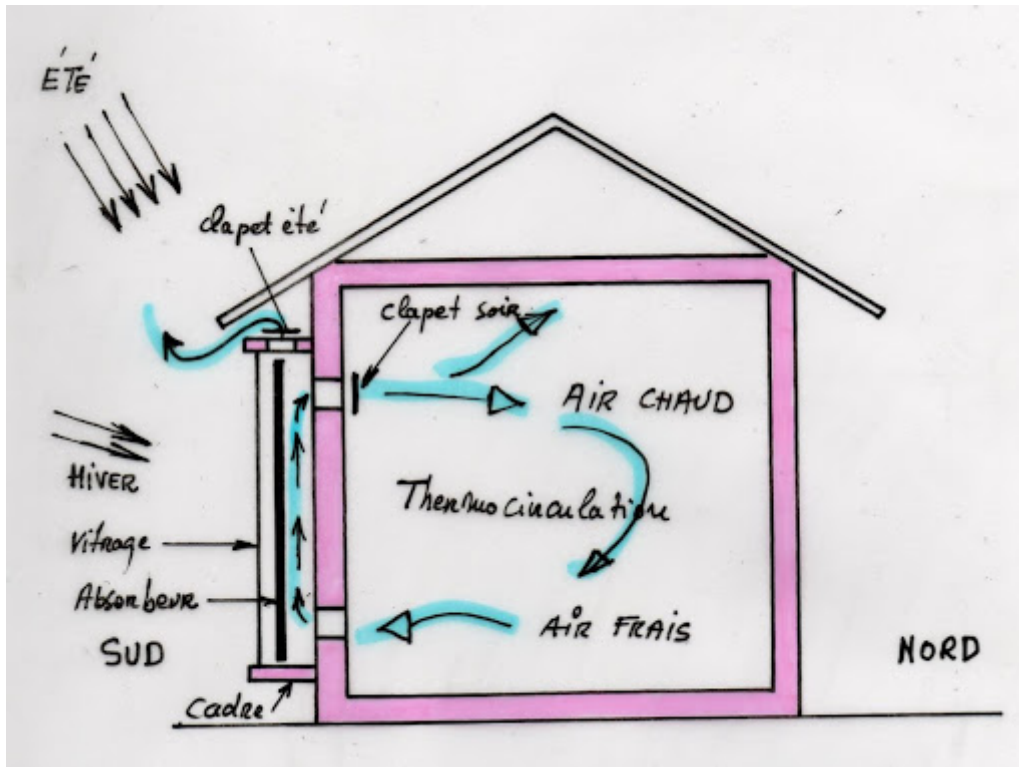


Fig. II-6- Chauffage solaire par air .

### Plancher solaire direct :

Un plancher solaire direct est constitué d'une dalle chauffée par un réseau de tuyaux noyés dans le sol. La forte épaisseur de cette dalle lui donne une grande inertie thermique permettant de stocker l'énergie captée par les panneaux solaires placés à l'extérieur du local et orientés plein sud, dans l'hémisphère nord. L'énergie solaire est transportée par un fluide caloporteur antigel qui circule dans les panneaux et dans le plancher.

Le plancher solaire direct est une solution dont la rentabilité est presque deux fois supérieure à celle d'un chauffe-eau solaire et qui permet de réaliser des économies de chauffage et d'eau chaude importantes. La productivité moyenne mesurée par l'Institut national de l'énergie solaire d'un chauffage solaire est de l'ordre de 445 kWh/m<sup>2</sup>/an au lieu de 270 kWh/m<sup>2</sup>/an pour un chauffe eau solaire individuel. De plus, le prix installé par m<sup>2</sup> de capteur d'un chauffage solaire est en moyenne 10 % moins cher qu'un chauffe-eau solaire.

Grâce à la grande quantité de béton (matériau le plus usité pour cette application), la crainte d'une montée en température du plancher n'est pas justifiée. En effet, l'autolimitation est assurée par la masse autant que par les pertes ou la surface des capteurs.

Depuis les années 1970, beaucoup d'applications individuelles ont été réalisées suivant ce principe,

Les applications collectives ou industrielles se développent depuis quelques années [9].



Fig. II-7- Plancher solaire direct .

### **Climatisation solaire :**

La chaleur captée par les panneaux solaires est dirigée vers une machine à absorption. Cette solution, promise depuis quelques années, reste difficile à mettre au point. Elle sera sans nul doute plus écologique qu'une climatisation classique (réduction des émissions de CO<sub>2</sub>). La technique, complexe à mettre au point, est actuellement installée en phase de prototype sur plusieurs dizaines de sites en Europe. Les caves viticoles de Banyuls-sur-Mer ainsi que les bureaux du CSTB à Sophia Antipolis, citées très souvent en exemple, ont été arrêtées depuis quelques années, la maintenabilité des équipements (principalement le champ solaire, composé de capteurs à tube sous vide) n'ayant pas résisté à de longues périodes de stagnation, principalement causées par des arrêts inopinés en période estivale [9].



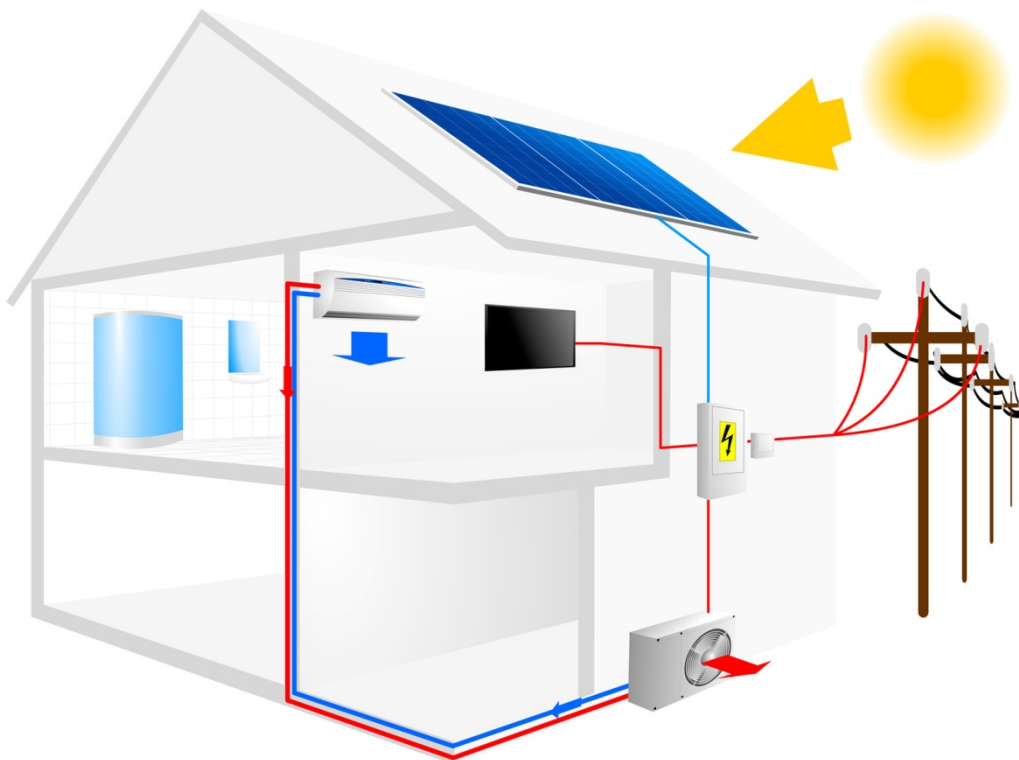


Fig. II-8- Climatisation solaire .

### **Electricité solaire thermique :**

Plusieurs systèmes permettent de produire de l'électricité à partir de capteurs thermique :

- Un couple parabole / moteur Stirling qui permet de produire un mouvement transformé en électricité par un générateur électrique.
- Des capteurs semi-parabolique ou dits « *de Fresnel* » chauffent un fluide à haute température ; il sert ensuite à produire de la vapeur qui actionne un turbo-alternateur.

Dans ces deux cas, on a plus affaire à des dispositifs de réflexion qu'à des capteurs d'énergie, qui peuvent concerner des centrales solaires thermodynamiques.

À une autre échelle, des capteurs thermiques associés à des thermocouples peuvent aussi produire de l'électricité (par Effet Seebeck) mais avec les technologies disponibles, le rendement serait très faible et dépendant d'une source froide. Des découvertes récentes concernant certains oxydes laissent cependant entrevoir des progrès futurs dans ce domaine [5].

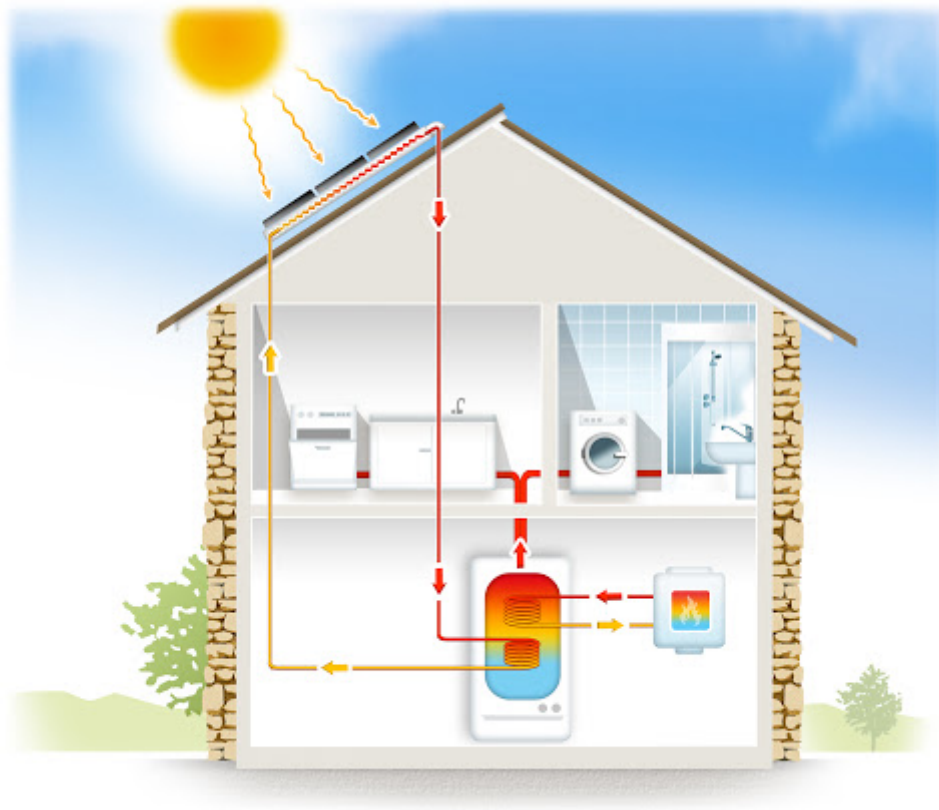


Fig. II-9- Electricité solaire thermique .

### **II.3.captteur photovoltaïque :**

Un capteur solaire photovoltaïque est un module photovoltaïque qui fonctionne comme un générateur électrique de courant continu en présence de rayonnement solaire. Constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, il sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques [1].

#### **II. 3.1. Caractéristique :**

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides et minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont la longueur et la largeur sont de l'ordre du mètre, pour une surface de l'ordre du mètre carré, et une masse de l'ordre de 20 kg. Divers éléments (branchements électriques, fixations, éventuel cadre pour assurer une étanchéité) sont inclus. Il existe également des modules sous forme de membranes souples et résistantes, ainsi que des modules à concentration, plus complexes mais exploitant mieux l'élément le plus cher du module, la cellule photovoltaïque [3].

Leur rendement est un peu plus faible que celui des cellules qui les constituent, du fait des pertes électriques internes et des surfaces non couvertes ; le rendement (par mètre carré) du module complet est plus faible d'environ 10 à 15 % que celui de chaque cellule

Outre sa puissance et sa surface, un module photovoltaïque a trois caractéristiques importantes :

- l'écart à la puissance nominale, de l'ordre de  $-0/+5$  %.
- la variation de puissance avec la température
- la stabilité dans le temps des performances (les fabricants garantissent généralement au moins 80 % de la puissance de départ pendant 20 à 25 ans) [8].

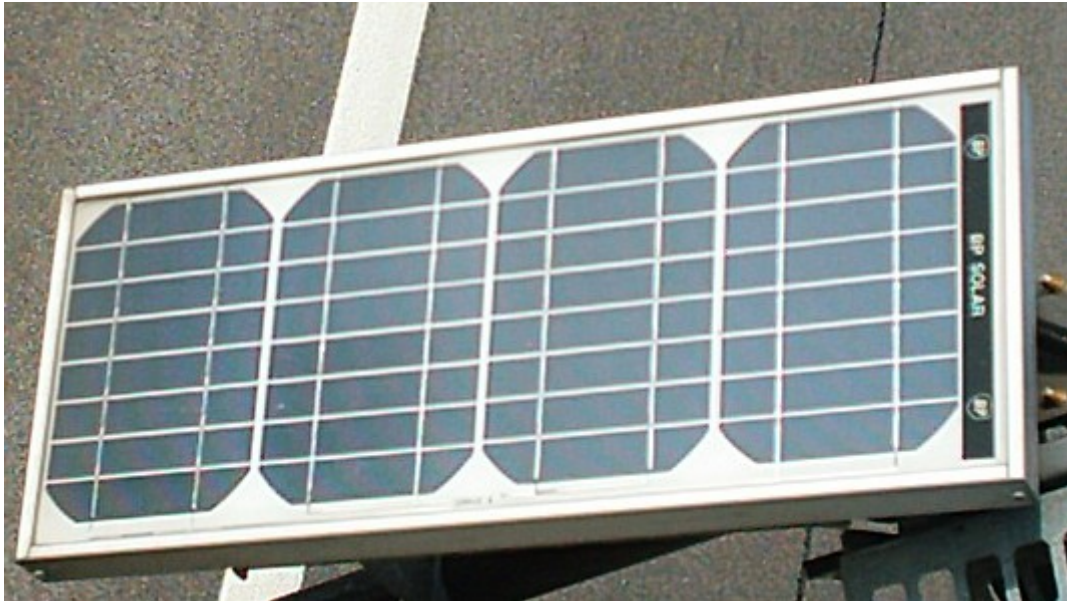


Fig. II-10- capteur photovoltaïque .

### II. 3.2. Application :

Les modules solaires photovoltaïques se sont d'abord développés dans des applications très variées, non connectées au réseau électrique, soit parce qu'il n'y a aucun réseau disponible (satellites, mer, montagne, désert, etc.), soit parce que le raccordement reviendrait trop cher par rapport à la puissance nécessaire (balises, horodateur, abris-bus, téléphone mobile, etc.) ; dans ce cas, on utilise des appareils électriques adaptés au courant continu livrés par les modules. De nombreux constructeurs ont également développé des lampadaires solaires fonctionnant à partir de modules photovoltaïques évitant d'avoir à les connecter au réseau électrique, si l'ensoleillement et la capacité des batteries sont adaptés [6].

Pour alimenter en électricité une habitation ou un réseau public de distribution, on intercale un onduleur qui transforme le courant continu en courant alternatif adapté aux appareils classiques. Plusieurs modules sont intégrés dans une installation solaire associée à une habitation ou dans

une centrale solaire photovoltaïque qui peuvent être soit des systèmes autonomes, soit des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique [2].

Ce type d'application n'est rendu rentable que par des subventions massives existant dans certains états, car l'énergie ainsi produite reste généralement beaucoup plus chère que l'électricité nucléaire ou celle produite à partir d'hydrocarbures fossiles : la source solaire est certes gratuite, mais l'investissement requis est très élevé [5].

### **II. 4. Capteur photovoltaïque et thermique :**

Les panneaux photovoltaïques hybrides qui combinent les deux technologies précédentes et produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur tout en améliorant le rendement des panneaux solaires photovoltaïques en évitant la surchauffe des modules. Cette combinaison peut être considérée comme de la cogénération [4].

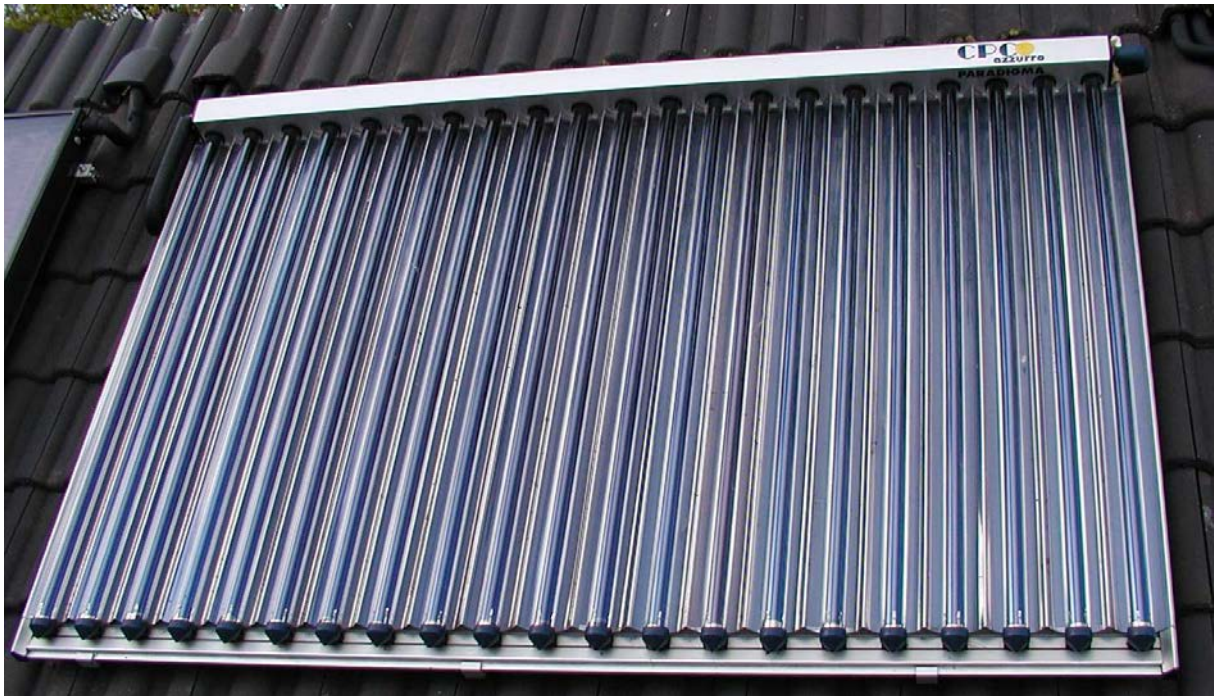


Fig. II-11- Capteur photovoltaïque et thermique .

#### **II.4.1.Fonctionnement :**

Les éléments photovoltaïques (cellules PV, typiquement au silicium dopé) transforment la lumière solaire (du domaine visible) en différence de potentiel et courant électrique, tandis que la partie capteur thermique (absorbeur ou "concentrateur"... ) récupère l'énergie calorifique envoyée par le soleil (notamment le rayonnement infrarouge habituellement perdu sous forme de chaleur dispersée

par le panneau) via un fluide caloporteur (air ou eau/glycol, injecté par une pompe dont le fonctionnement est alimenté par l'électricité) [8].

L'électricité produite peut être utilisée en local immédiatement ou après stockage (batterie), ou être injectée sur le réseau électrique (revente/rachat).

La chaleur produite peut être connectée à toute installation thermique classique, utilisée pour le chauffage ou préchauffage d'air ou d'eau domestique (eau chaude sanitaire, piscine, ...), une unité de séchage,... [8].

### **II.4.2. Avantage :**

Le rendement énergétique global est nettement augmenté par rapport à celui du panneau photovoltaïque (12-20 %), principalement en raison de la composante thermique (qui valorise également l'irradiation IR non exploitée en PV seul - 46 % du total) [9].

En outre, le captage thermique a deux effets favorables sur la production électrique :

1. Les cellules photovoltaïques fonctionnent mieux. En effet leur couleur foncée fait qu'elles s'échauffent au soleil, or leur rendement de production électrique diminue avec la chaleur, notamment au-dessus de 45 °C. Dans un panneau PV-T, le collecteur de chaleur capte les calories solaires, ce qui refroidit les cellules PV et augmente leur production notamment lors des pics d'insolation. La chaleur est injectée dans un accumulateur (circuit fermé eau/glycol en général) grâce au courant produit par les cellules photovoltaïques ; cela améliore significativement la production électrique (de 15 % environ en région parisienne selon les fabricants) [11].
2. Le refroidissement permanent des panneaux améliore leur durée de vie et leur efficacité (augmentation du COP des pompes à chaleur quand une pompe à chaleur est associée) [11].

Ces avantages se manifestent en particulier pour les panneaux en position centrale sur un toit.

Le coût égal d'installation d'un panneau hybride est réduit par rapport à celui d'un panneau solaire PV et d'un panneau solaire thermique.

Un panneau hybride PV-T peut fonctionner plus rapidement en cas de neige (ou de givre ou buée) l'occultant: celle-ci peut être éliminée en faisant circuler le fluide caloporteur en sens inverse. Le panneau PV-T participe en outre en période de canicule à diminuer la chaleur dans les combles de l'habitat, par refroidissement de la toiture.

### **II.4.3. Installation :**

L'installation des panneaux PV-T comporte :

- comme tout panneau solaire, la fixation des panneaux (usuellement, sur le toit)
- comme tout panneau PV, l'installation de câbles électriques et équipements en aval (onduleur,...),
- comme tout panneau thermique, un circuit de ventilation, si refroidissement par air, ou un circuit hydraulique avec accumulateur d'eau chaude (si le panneau PV-T est raccordé en direct à un système d'eau chaude disponible au robinet (et non pour le seul chauffage), il est obligatoire de raccorder, en sortie du stock, un mitigeur thermostatique de sécurité, afin que l'on ne puisse pas se brûler avec une eau trop chaude [10].

### **II.5. Conclusion:**

Certes l'énergie solaire est une énergie propre mais cela présente des limites.

Ainsi, les panneaux solaires sont une solution pour les endroits isolés, non raccordés au réseau électrique et pour rendre des installations autonomes. L'énergie solaire peut également s'avérer très avantageuse dans le cas d'installations chez des particuliers.

Cependant, les panneaux solaires ne sont actuellement pas rentables pour une production à grande échelle, à cause de nombreuses limites et des autres sources d'énergie plus avantageuses telles que le nucléaire.

Les panneaux solaires sont donc parfaits pour compléter les besoins énergétiques mais toute l'énergie ne peut être produite entièrement par leur utilisation.

L'idéal serait donc une mixité des énergies où le solaire serait utilisé au maximum de son potentiel ainsi que les autres énergies renouvelables.

L'énergie solaire est toutefois une solution d'avenir qui vaut le coup d'être plus exploitée, d'autant plus que de nombreuses améliorations sont encore possibles.

# CHAPITRE III

## *Modélisation des capteurs solaires*



## **Modélisation des capteurs solaires**

---

### **III.1. Introduction :**

La modélisation et la simulation numérique c'est un outil de conception important utilisé pour prévoir l'exécution expérimentale. Dans n'importe quelle application d'énergie solaire, il serait souhaitable d'analyser théoriquement de n'importe quel système donné aussi intensivement comme possible avant de passer à l'expérimental.

Les principaux avantages d'utiliser des capteurs à concentration pour le refroidissement, pour que les températures de fonctionnement plus élevés permettent l'utilisation de refroidisseurs à absorption double effet qui sont beaucoup plus éco énergétiques que les refroidisseurs à absorption simple effet [1].

### **III.2. Une synthèse sur les capteurs solaire a concentration :**

Pour des applications solaires, du traitement thermique industriel, le pompage des eaux souterraines, de la production de l'électricité, de la réfrigération, dessalement solaire... etc., les capteurs solaires a concentration sont probablement l'un qui suscite la plupart d'attention. Les avantages de tels collecteurs à hautes températures et hauts, moyenne concentration et de petit taux de déperdition d'énergie sont leur capacité d'armer le rayonnement diffus et direct.

Plusieurs configurations du système de concentration ont été traite tel que les réflecteurs paraboliques [3], cylindro-parabolique [3-4], parabolique compose (CPC) [5-8], réflecteur de Fresnel [9-11], les réflecteurs plans [11-12], le choix de ce type de capteur en fonction de leur utilisation [13-14].

Plusieurs travaux de recherche ont été fait sur les capteurs a concentration en peut classer selon trois types ; thermique, photovoltaïque ou hybride thermique photovoltaïque PVT. Pour un capteur solaire thermique, un réflecteur peut être une modification utile et peu couteux pour augmenter le rayonnement solaire incident sur le capteur, un réflecteur supérieur s'étend depuis le bord supérieur du collecteur solaire et est incline légèrement de la verticale, alors que le réflecteur inferieur s'étend a partir du bord inferieur du collecteur solaire et est incline par rapport a l'horizontale. Les effets du réflecteur supérieur [15-17], le réflecteur inferieur [18-21], et les deux hauts et en bas réflecteurs



ensembles [22-23], sur un capteur solaire thermique ont été étudiés expérimentalement et théoriquement.

Pour la distillation solaire des nombreuses tentatives ont également été faites pour augmenter la productivité distillat d'un distillateur solaire [23-24]. Parmi ces modifications, des réflecteurs peuvent être un moyen simple et peu coûteux d'augmenter le rayonnement solaire incident sur le distillateur solaire ainsi que la productivité distillat. Bien que de nombreux d'articles sur l'effet de réflecteurs (interne et externe) sur la productivité distillat ont été présentes [25-27].

### **III.3.Modélisation et simulation numérique :**

#### **III.3.1.Hypothèses simplificatrice :**

La modélisation d'un capteur solaire prend en considération le mode de circulation du fluide vis-à-vis de l'absorbeur, le nombre de vitrage, la présence ou l'absence de la plaque métallique (ou autre) adjointe à l'isolation, les matériaux utilisés pour l'isolation arrière et latérale.

Cette modélisation doit aboutir à la détermination des coefficients caractérisant le capteur étudié, la différente équation permettant d'évaluer l'énergie extraite, les températures des éléments et du fluide à l'entrée et à la sortie, ainsi que les rendements des capteurs. Nous allons développer cette procédure sur quelques modèles.

Avant d'entamer les calculs alphanumériques il est nécessaire de préciser certaines hypothèses de calcul :

- Le transfert de chaleur à une seule dimension à travers les couches du système
- Le débit massique uniforme dans les tubes de capteur.
- Le transfert de chaleur à partir des bords du capteur est négligeable
- La vitesse du vent sur la face du capteur est supposé constante
- Le flux chaleur reçu par le capteur est en fonction du temps
- Les propriétés physiques des matériaux ne sont pas en fonction de la température
- Les propriétés physiques du fluide sont en fonction de la température

### III.4. Analyse thermique de capteur solaire plan à air :

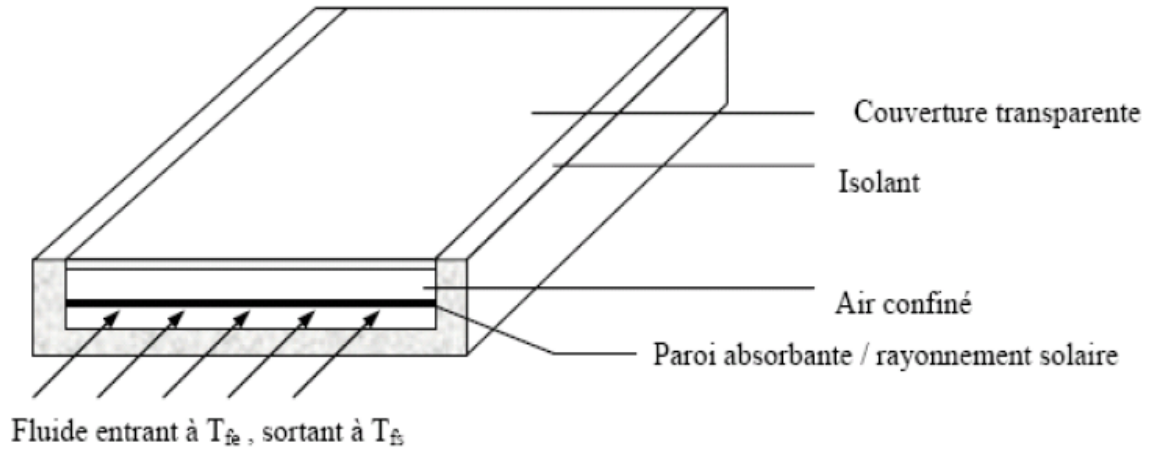


Fig. III.1. Schéma de principe d'un capteur solaire plan à air.

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,.....)

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température  $T_{fs} - T_{fe}$  à la traversée du capteur

Dans ce qui suit on regroupera les équations mathématiques gouvernant le fonctionnement du capteur à air après le bilan thermique de celle-ci.

#### III.4.1 Bilan thermique et calcul de rendement :

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$Q_{sa} = Q_u + Q_{st} \quad \text{III.1}$$

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable, ce qui conduit à :

$$Q_{sa} = Q_p + Q_u$$

### III.4.2 Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire :

Le principe de modélisation consiste à écrire les bilans énergétiques de chaque élément constituant le capteur ; absorbeur, vitre, isolant et fluide caloporteur. Avant d'aborder les calculs il est nécessaire de considérer certaines hypothèses :

- ✓ Les propriétés physiques et thermiques du fluide caloporteur (air) sont données en fonction de sa température moyenne.
- ✓ L'absorbeur étant en métal (acier, cuivre ou aluminium) de faible épaisseur avec une conductivité très élevée.
- ✓ Les deux faces de la vitre sont à la même température
- ✓ La température ambiante est la même autour du capteur.
- ✓ La température dans le fluide et dans l'absorbeur ne dépend que de la dimension longitudinale (sens de l'écoulement).

Plusieurs modèles sont rencontrés pour ce fait, deux méthodes de modélisation sont rencontrées également

- 1) Méthode par tranches
- 2) Méthode globale

#### III.4.2.1 Méthode par tranche :

Cette méthode est aussi dite, la méthode de modélisation " pas à pas " la méthode consiste à découper l'isolateur en tranches fictive de longueur  $\delta x$  dans le sens de l'écoulement du fluide Caloporteur et à écrire les bilans dans chaque tranche. Il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert d'électricité.

Les différents échanges thermiques qui ont lieux, sont schématisés par le circuit électrique équivalent figure (III.2)

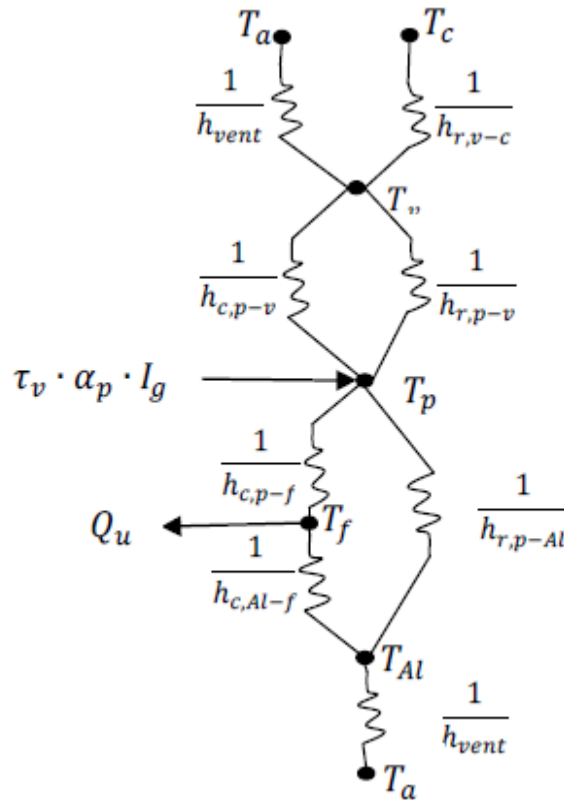


Fig. III.2. Schéma électrique relatif à une section du capteur.

Cette méthode est aussi dite, la méthode de modélisation «pas à pas» qui prend en compte l'évolution des températures de tous les éléments du capteur solaire dans le temps et dans l'espace. Elle consisté à découper le capteur solaire en tranches fictives de longueur  $\delta_x$  dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur, et à écrire le bilan des échanges dans chaque tranche. Il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et les circuits électriques analogiques équivalents.

Le réseau électrique Figure (III-2) correspond au capteur solaire tel que schématisé par Figure (III-1), par conséquent l'application de la loi d'Ohm conduit aux équations des bilans suivantes :

- **Dans la vitre :**

$$h_{r,p-v} \cdot (T_p - T_v) + \frac{h_{c,p-v}}{2} (T_p - T_v) = U_{av_1} \cdot (T_v - T_a) \quad \text{III.3}$$

• Dans l'absorbeur :

$$(\tau_v \alpha_p) I_g = h_{c,p-f} (T_p - T_f) + \frac{h_{c,p-v}}{2} (T_p - T_{Al}) + h_{r,p-v} (T_p - T_v) \quad \text{III.4}$$

$$I = I_{PH} - I_d - I_{sh} \quad \text{III.5}$$

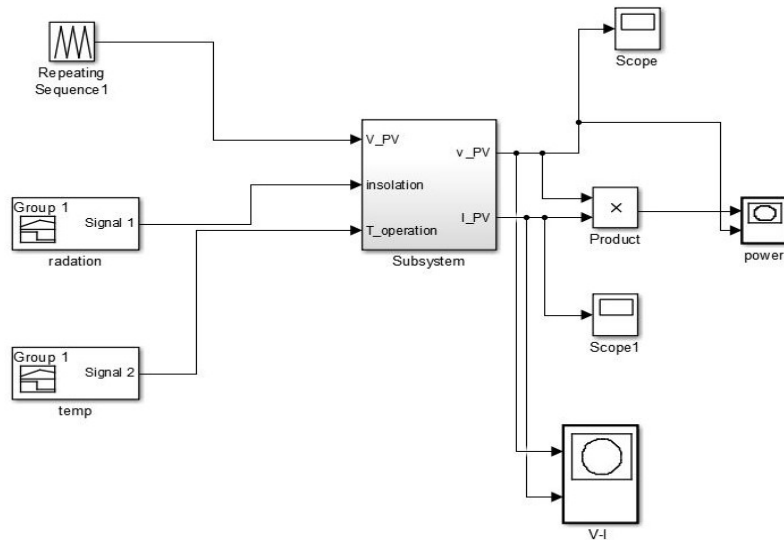


Fig.III.3.Schéma générale de la simulation photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \frac{q(v + R_s * I)}{\alpha T K N_s} - 1 \right) - \frac{V + r_s I}{r_{sh}} \quad \text{III.6}$$

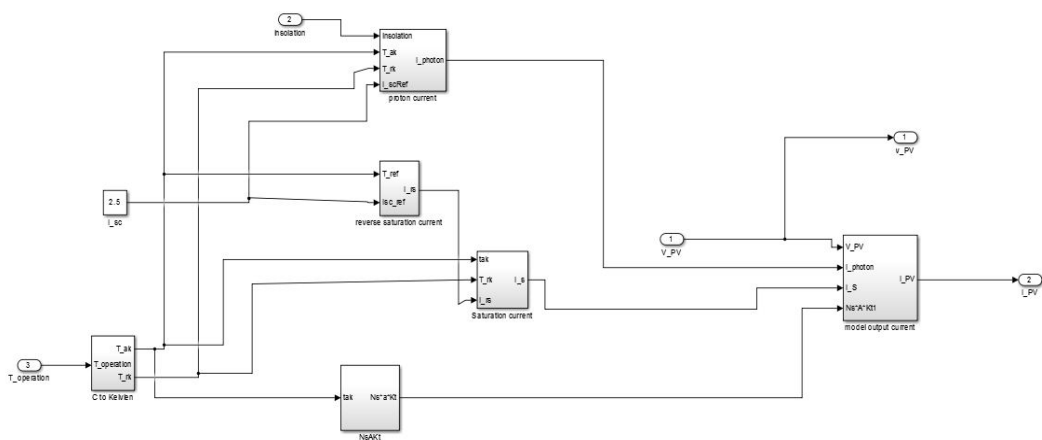


Fig.III.4.Schéma détaillé de la simulation photovoltaïque

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad \text{III.7}$$

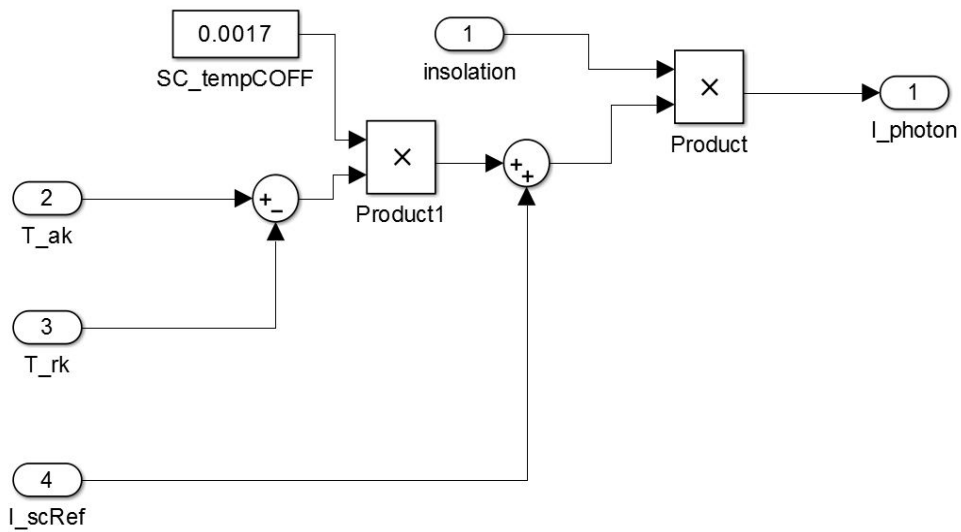


Fig.III.5.Schéma de photo current

$$I_0 = I_{rs} \cdot \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 \cdot \left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot (1/T_n - 1/T)}{n \cdot K}\right] \quad \text{III.8}$$

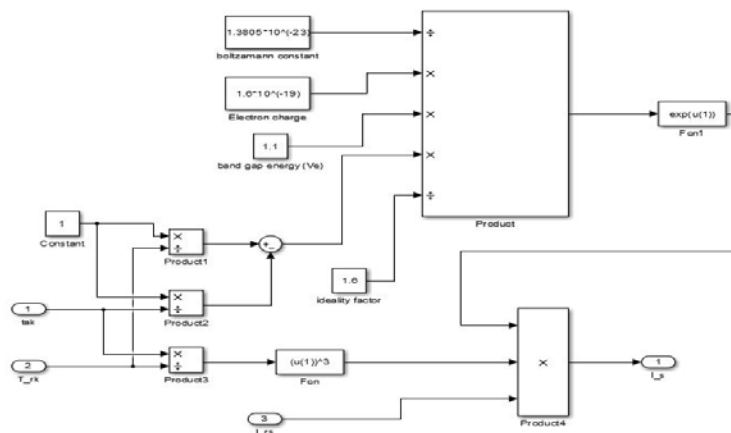


Fig.III.6.Schéma de saturation current

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}\right) - 1}} \quad \text{III.9}$$

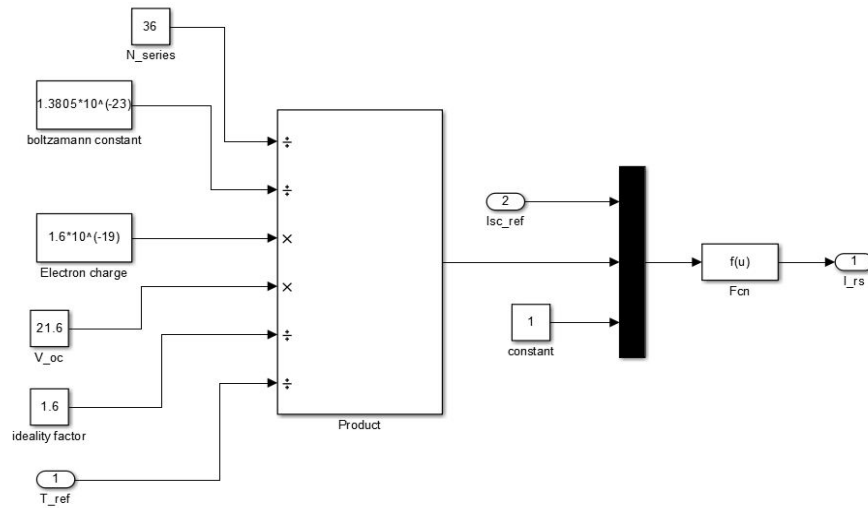


Fig.III.7.schéma de reverse current

$$I_{sh} = \frac{V+r_s I}{r_{sh}}$$

III.10

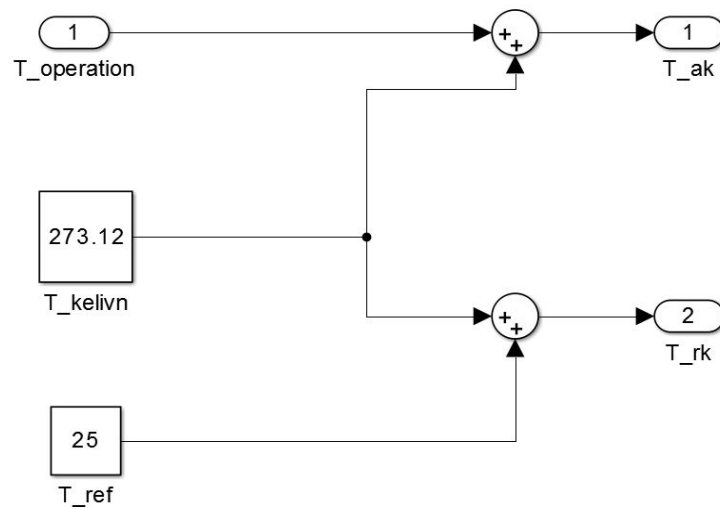


Fig.III.8.schéma de température (k)

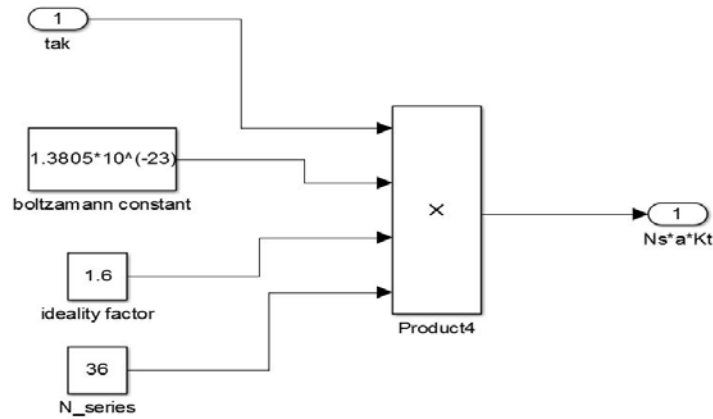


Fig.III.9. schéma détaillé de nombre module en série

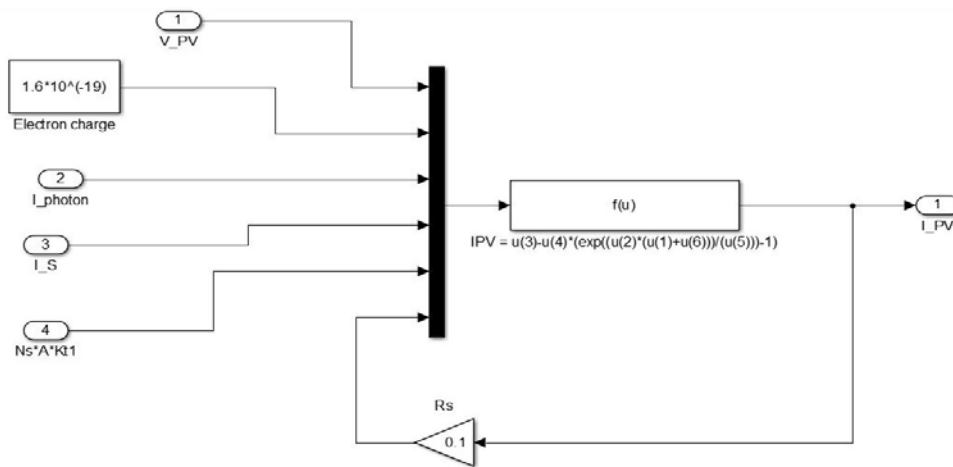


Fig.III.10. teste du courant

- Dans le fluide caloporteur :

$$h_{c,p-f} \cdot (T_p - T_f) = h_{c,f-Al} \cdot (T_f - T_{Al}) + Q_u \quad \text{III.11}$$

- Dans la plaque inférieure en Aluminium (de la côte de l'isolant) :

$$h_{c,Al-f} \cdot (T_p - T_{Al}) + h_{r,p-Al} \cdot (T_p - T_{Al}) = U_{ar} \cdot (T_{Al} - T_a) \quad \text{III.12}$$

Ce système d'équation peut être réécrit sous la forme d'une équation matricielle à quatre (04) dimensions de la forme :



$$\begin{cases} T_v a_{11} + T_p a_{12} + T_f a_{13} + T_{Al} a_{14} = b_1 \\ T_v a_{21} + T_p a_{22} + T_f a_{23} + T_{Al} a_{24} = b_2 \\ T_v a_{31} + T_p a_{32} + T_f a_{33} + T_{Al} a_{34} = b_3 \\ T_v a_{41} + T_p a_{42} + T_f a_{43} + T_{Al} a_{44} = b_4 \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} T_v \\ T_p \\ T_f \\ T_{Al} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}$$

Dont les températures sont déterminées par la matrice inverse :

$$[T] = [B][A]^{-1} \quad \text{III.13}$$

Le déroulement de ces calculs nécessite la connaissance des valeurs des coefficients d'échanges par convection, par rayonnement et par conduction, ainsi que les valeurs des coefficients des pertes globales par l'avant du capteur  $U_{av_1}$  et par l'arrière  $U_{ar}$  définis par les expressions :

$$U_{av_1} = h_{c,v-a} + h_{r,v-a} \quad \text{ET} \quad U_{ar} = \frac{1}{\left[ \sum \frac{e_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{c,v-a}} \right]} \quad \text{III.14}$$

### III.5. Les échanges dans un capteur solaire plan à air :

#### III.5.1 Les échanges radiatifs :

##### III.5.1.1. Echanges radiatifs entre les vitrages et la voûte céleste :

On emploie l'expression du Coefficient d'échange radiatif suivant [6] :

$$h_{r,v-c} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_v (1 + \cos \varphi) (T_v + T_c) (T_v^2 + T_c^2) \quad \text{III.15}$$

##### III.5.1.2. Echanges radiatifs entre la vitre et l'absorbeur :

Sont décrits par l'expression suivante :

$$H_{r,p-v} = \frac{\sigma(T_v + T_p)(T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{p-v}} - 1} \quad \text{III.16}$$

Les températures  $T_v$  et  $T_p$  sont respectivement la température des vitrages et de la plaque absorbante exprimées en Kelvin.

### **III.5.1.3. Echanges radiatifs entre l'absorbeur et la plaque d'aluminium sur l'isolant :**

Sont décrit par l'expression :

$$h_{r,p-v} = \frac{\sigma(T_p + T_{Al})(T_p^2 + T_{Al}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{p-Al}} + \frac{1}{\varepsilon_{Al-p}} - 1} \quad \text{III.17}$$

Où :

Les températures  $T_p$  et  $T_{Al}$  exprimées en Kelvin, sont la température de l'absorbeur et de la Plaque considérée en aluminium sur l'isolant.

### **III.5.2. Les échanges convectifs :**

#### **III.5.2.1. Echanges convectifs entre le capteur et le milieu environnant:**

Lorsque le vent souffle parallèlement aux parois externes du capteur, en emploi une corrélation empirique simple qui permet d'estimer le coefficient d'échange par convection forcée en fonction de la vitesse du vent [8,2] décrite par :

$$h_{c,v-a} = h_{vent} + 5.76 + 3.86 \cdot U_{vent} \quad \text{III.18}$$

#### **III.5.2.2. Echanges convectifs entre l'absorbeur et la vitre :**

Le transfert thermique dans l'espace compris entre la vitre et l'absorbeur, est à la fois caractérisé par des échanges de conduction et de convection naturelle, sont exprimés par un coefficient de conduction-convection tel que [7] :

$$h_{c,p-v} = \frac{N_u \cdot d}{\lambda_a} \quad \text{III.19}$$

Le nombre de *Nusselt*,  $Nu$  est exprimé en fonction du nombre de *Rayleigh* par la corrélation de *Hollands* [7] suivante :

$$N_u = 1 + 1.44 \left[ 1 - \frac{1708(\sin 1.8\varphi)^{1.6}}{R_a \cdot \cos \varphi} \right] \left[ 1 - \frac{1708}{R_a \cdot \cos \varphi} \right] + \left[ \left( \frac{R_a \cdot \cos \varphi}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad \text{III.20}$$

D'autres corrélations peuvent être également employées, on cite en particulier celles établies par *Jacques.B* [8].

$$\begin{aligned} N_u &= 1.013 && \text{pour } G_r < 1700 + 47.8\varphi \\ N_u &= 2.5 + 0.0133(90 - \varphi) && \text{pour } G_r > 80000 \\ N_u &= [0.06 + 3 \cdot 10^{-4}(90 - \varphi)] && \text{pour aoutrement} \end{aligned} \quad \text{III.21}$$

Avec,  $Gr$  étant le nombre de *Grashoff*, tel  $G_r = \frac{g\beta\Delta T e_v}{\nu^2}$  et  $\varphi$  en degré.

### III.5.2.3. Echanges convectifs dans la lame d'air mobile :

Les coefficients d'échange convectifs  $h_{c,Al-f}$  et  $h_{c,p-f}$  respectivement entre le fluide et les parois solides, l'absorbeur et la plaque d'aluminium sur l'isolant, sont estimés par la relation :

$$h_{c,Al-f} = h_{c,p-f} = \frac{N_u \lambda_a}{D_h} \quad \text{III.22}$$

Le nombre de Nusselt est généralement en fonction du régime d'écoulement, tel que :

- En régime laminaire ( $Re < 2300$ ), le nombre de *Nusselt* est décrit par les corrélations suivantes :
- Corrélation proposé par *Mercer* [2] :

$$N_u = 4.9 + \frac{0.0606 \left( \frac{Re Pr Dh}{L_c} \right)^{1.2}}{1 + 0.0909 \left( \frac{Re Pr Dh}{L_c} \right)^{0.7} Pr^{0.17}} \quad \text{III.23}$$

Où,

- Corrélation de Malik et Charters [2] :

$$N_u = \frac{0.0192 R_e^{0.75} P_r}{1 + 1.22 R_e^{\frac{1}{8}} (P_r - 2)} \quad \text{III.24}$$

➤ *En régime turbulent* ( $Re > 2300$ ), Nusselt est estimé par les corrélations suivantes :

- Corrélation de Kays [6]

$$N_u = 0.0158 R_e^{0.75} \quad \text{Pour } \frac{L_c}{D_h} > 10$$

Où,  $R_e$  étant le nombre de Reynolds donné par :

$$R_e = \frac{U_f D_h}{\nu}$$

### III.6. Rendement thermique du capteur solaire plan $\eta$ :

Le rendement thermique d'un capteur solaire plan représente le rapport de la puissance utile à la Puissance incidente, peut être exprimée par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g}$$

Il peut être aussi donné en fonction du rapport de la différence de température  $(T_{fe} - T_a)$  au

flux global incident  $I_g$  :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g} = F_R \left( \tau_v \alpha_p - U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{I_g} \right) \quad \text{III.25}$$

### III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait une model par tranche du dispositif capteur solaire plane.

Dans le quatrième chapitre on va étudier les effets des paramètres internes sur le rendement du capteur solaire et la théorie de la commande MPPT.

# CHAPITRE IV

*Simulation des Résultats et Discussion*

# IV

## Simulation des Résultats et Discussion

---

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons en première partie la simulation de capteur solaire hybride photovoltaïque /thermique a l'aide de l'approche par tranche et la résolution de système par la méthode gausse Sadiele nous avons étudié l'influence de l'irradiation sur la température de chaque couche ainsi le rendement de capteur thermique et électrique en fonction de l'irradiation en seconde partie on va entamer Le contrôle de la puissance de système photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation », effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink.

### IV.2. Les températures des différents composants du capteur :

L'analyse de la figure (IV.1) permet de remarquer que la température de l'absorbeur est la plus élevée, ce qui s'explique par son facteur d'absorption solaire élevé. Puis, dans un ordre décroissant nous avons la température de l'isolant qui se trouve directement sous l'absorbeur dont la conductivité thermique est élevée puis la température du fluide caloporteur résultant du coefficient de convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

Le module photovoltaïque est choisi pour la modélisation puis la simulation basé sur les cellules solaire à base silicium et fournit une puissance maximum nominale de 6.5 mW.

Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont illustrées dans les tableaux suivant :

L'équation du courant photo-généré établit sous les conditions de référence ( $G=1000 \text{ w/m}^2$ ,  $T=25\text{C}$ )

La figure représente le modèle mathématique courant-tension du panneau photovoltaïque sous matlab/Simulink

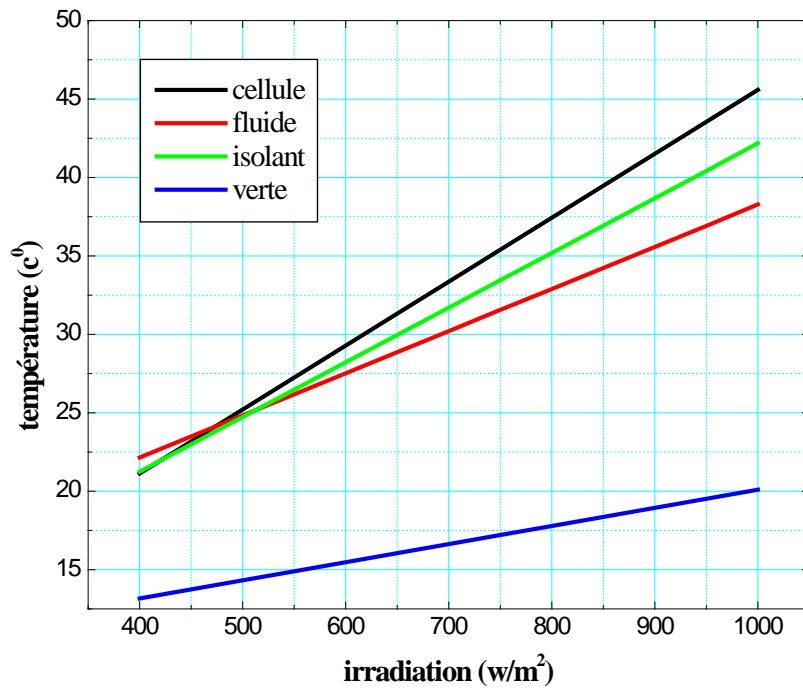
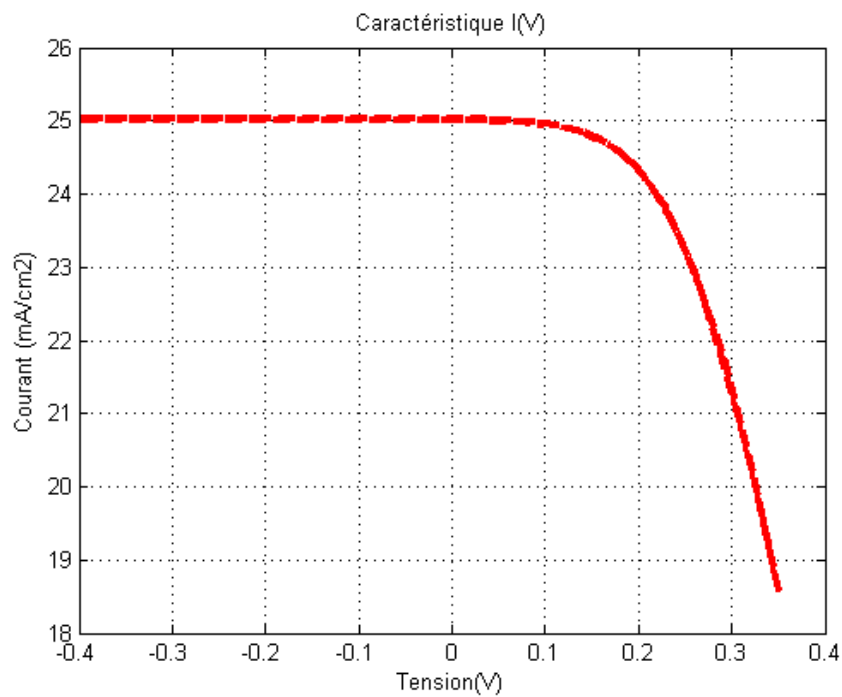


Fig. IV.1. Variation des températures des composants du capteur en fonction du rayonnement global.



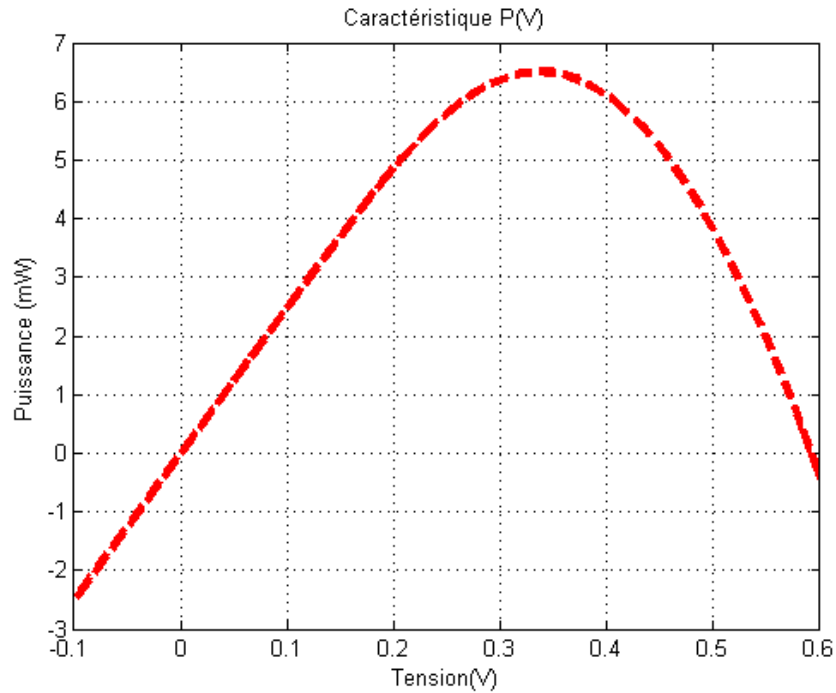


Fig. IV.2.les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire

### IV.3.L'influence de l'éclairement sur le rendement thermique de capture et électrique de la cellule solaire :

La figure (IV.3.) montre que le rendement instantané du capteur est une fonction croissante du rayonnement solaire global, ceci s'explique par la relation qui existe entre l'énergie utile récupérée par le fluide de travail et le rayonnement solaire global.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g} = F_R \left( \tau_v \alpha_p - U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{I_g} \right)$$

Le rendement électrique est la grandeur la plus importante dans l'étude d'une cellule solaire. Il donne le rapport entre la puissance électrique optimale délivrée et la puissance solaire reçue par la cellule à une température donnée. Il est définie par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{I_m V_m}{P_{inc} A} = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{P_{inc}} 100\%$$



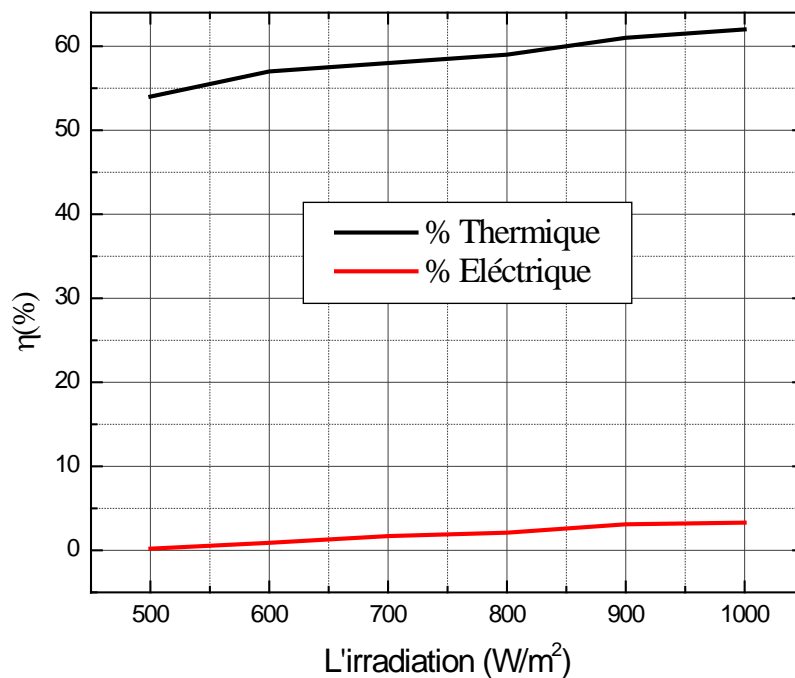


Fig. IV.3.le rendement thermique et électrique

#### **IV.4.Simulation du générateur PV :**

##### **IV.4.1.L'outil Matlab/Simulink :**

MATLAB fait également d'un assemblage d'outils intégrés pour traitement du Signal. Introduit au noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble.

En utilisant l'utilité fournie par **MATLAB**, nous avons pu extraire les paramètres du module présentés sur le tableau IV.1.

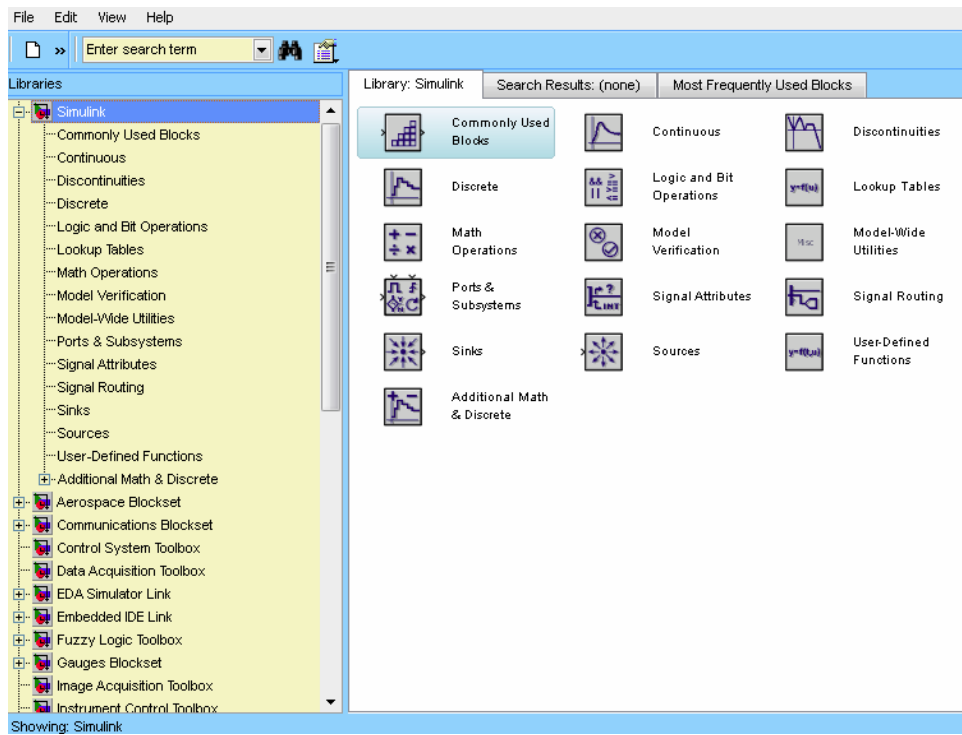


Fig. IV.4. Accueil Matlab

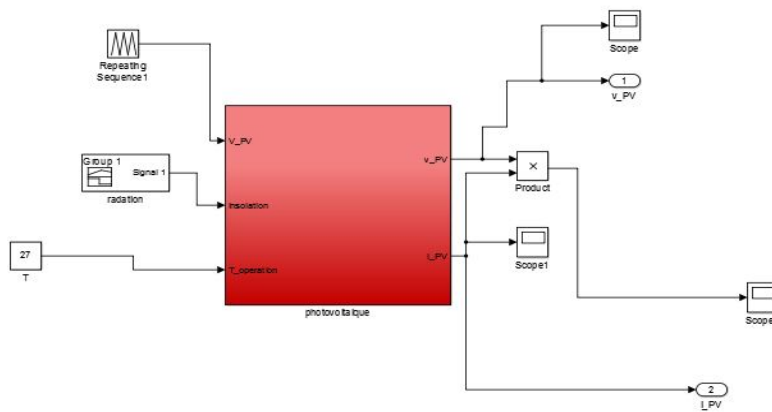


Fig. IV.5. Schéma du module photovoltaïque sous matlab/Simulink.

#### **IV .5.L'influence des paramètres extaire et interne sur Les caractéristiques (I<sub>pv</sub>,V<sub>pv</sub>) (P<sub>pv</sub>,V<sub>pv</sub>) :**

Afin de montrer L'influence des condition externe de l'éclairément et la température sur la caractéristiques Les caractéristiques (I<sub>pv</sub>,V<sub>pv</sub>) , nous avons suivre la procédure suivante :

On fixe la température et on fait varier de l'éclairément pour visualiser l'effet de l'éclairément puis On fixe l'éclairément pour visualiser l'effet de température. Puis on fait varier le nombre des cellules pour visualiser

On peut remarquer que la forte diminution du courant de court-circuit aussi l'éclairément influence proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque. L'augmentation de la température et le nombre des cellules en séries fait diminuer la tension du circuit ouvert et courant de court-circuit reste constant.

Tableau. IV.1.Spécifications du module PV

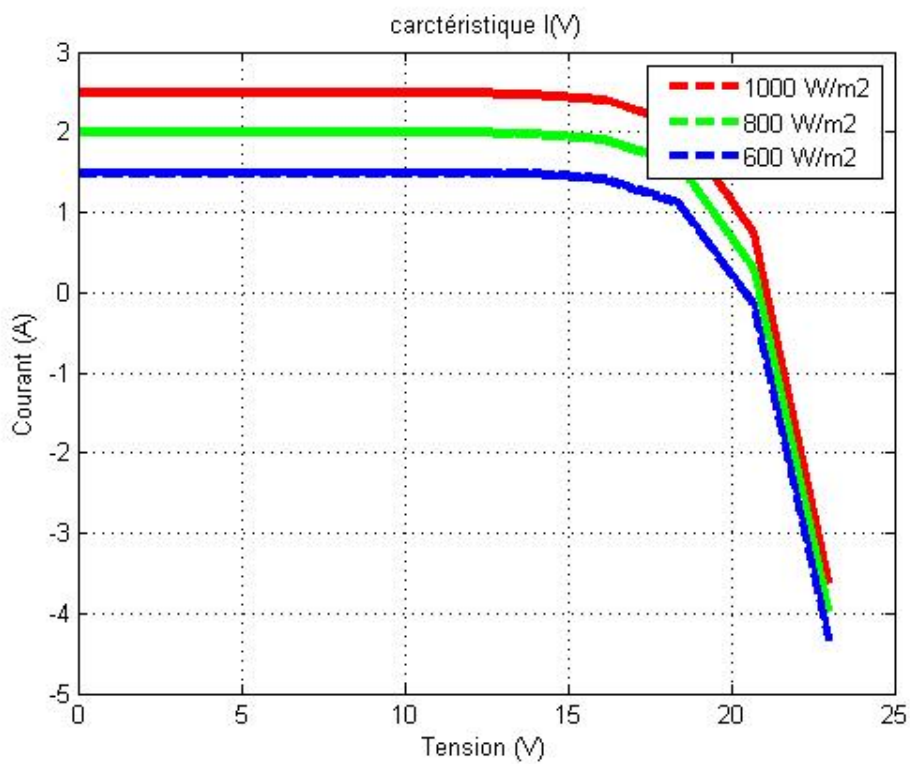
|  |                  |
|--|------------------|
| <b>Puissance maximale, P (max)</b>       | <b>37.08 (w)</b> |
| <b>Tension de P (max), V (MP)</b>        | <b>16.56 (v)</b> |
| <b>Courant de P (max), I (MP)</b>        | <b>2.25(A)</b>   |
| <b>Courant de court-circuit, I(SC)</b>   | <b>2.55 (A)</b>  |
| <b>Tension de circuit-ouvert, V(Co)</b>  | <b>21.24 (v)</b> |
| <b>Nombre de cellules en séries (Ns)</b> | <b>36</b>        |

Tableau. IV.2.Paramètres extraits du module

|                                      |                 |
|--------------------------------------|-----------------|
| <b>éclairage standard, G</b>         | <b>1000W/m2</b> |
| <b>Température standard, T</b>       | <b>25°C</b>     |
| <b>Energie de la bande interdite</b> | <b>1.12ev</b>   |
|                                      |                 |

## Simulation des Résultats et Discussion

|   |                  |
|---|------------------|
| Coefficient de température de ICC       | 65 mA/ °         |
| Coefficient de température de VCC       | -80mV/ °C        |
| Coefficient de température de puissance | (0.5±0.005)% /°C |
| Resistance série                        | 0.1Ω             |
| Resistance shunt                        | 210Ω             |



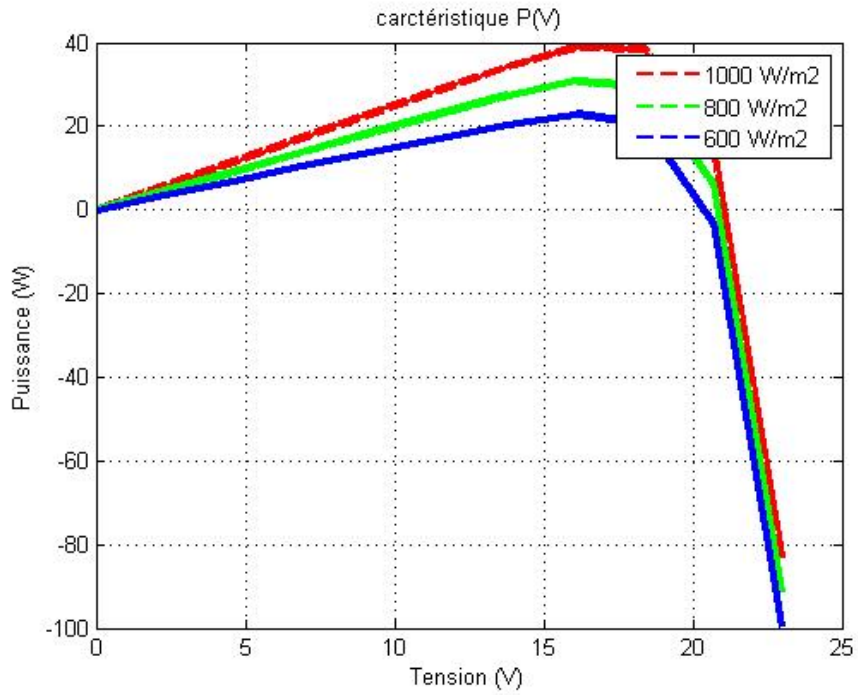
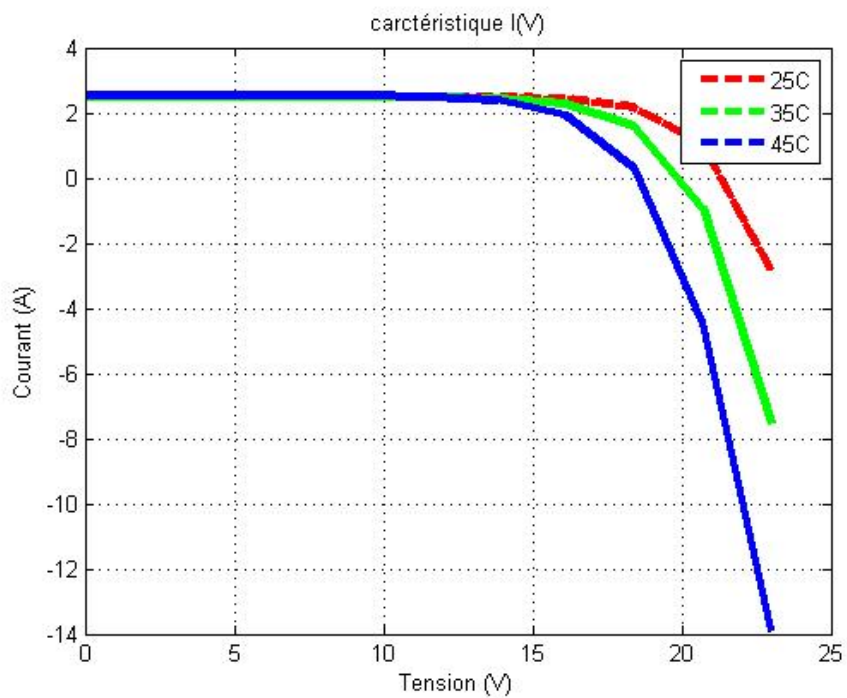


Fig. IV.6. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire



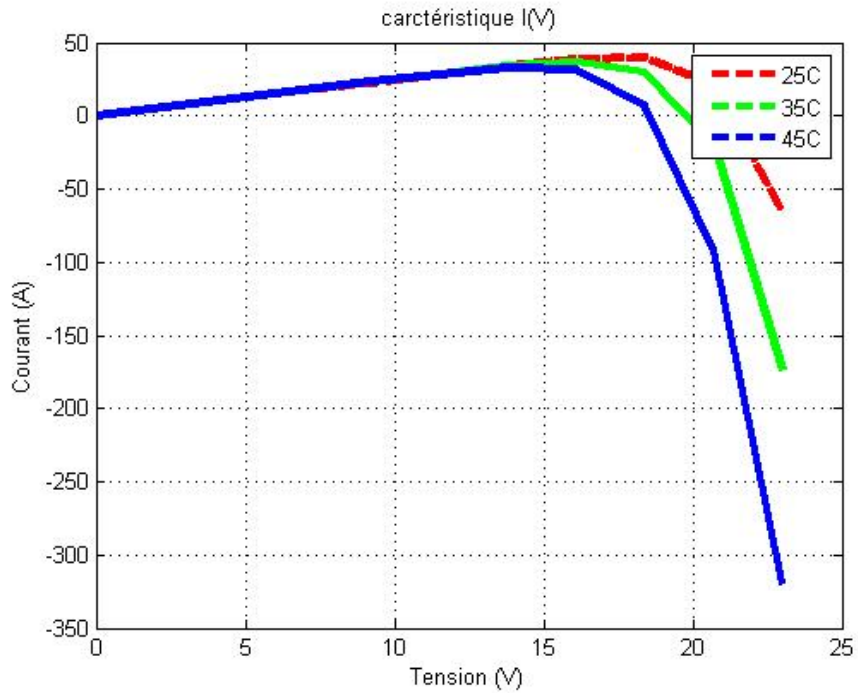
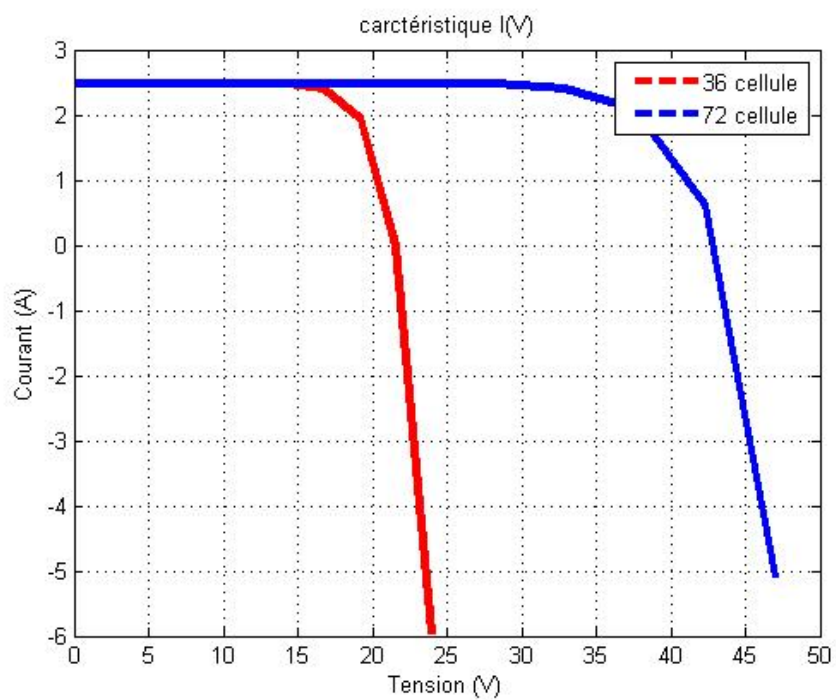


Fig. IV.7. Influence de température sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire



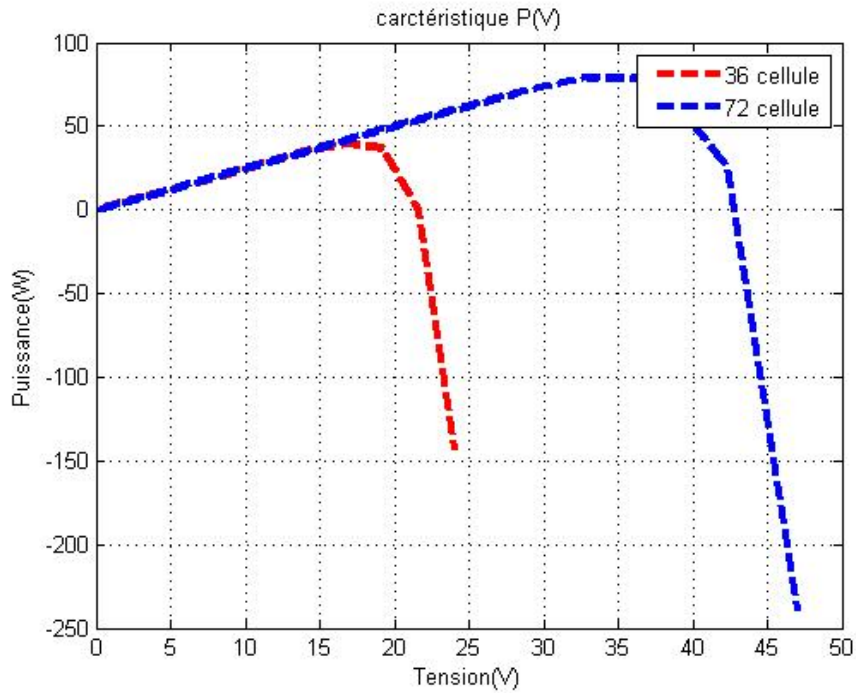


Fig. IV.8. Influence de nombre de cellule sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'un module solaire

#### **IV.6. Commande MPPT par La méthode de perturbation et observation (P&O) :**

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est assez difficile. En effet, coté source pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie en fonction de l'éclairement et avec la température. Pour cette problématique on doit chercher un procédure telle que le générateur fonctionne dans un état stable dans son régime optimal, la solution doit adopter d'introduire un convertisseur statique figure qui peut jouer le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions données, c'est-à-dire au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension représentée à la Figure IV.9.

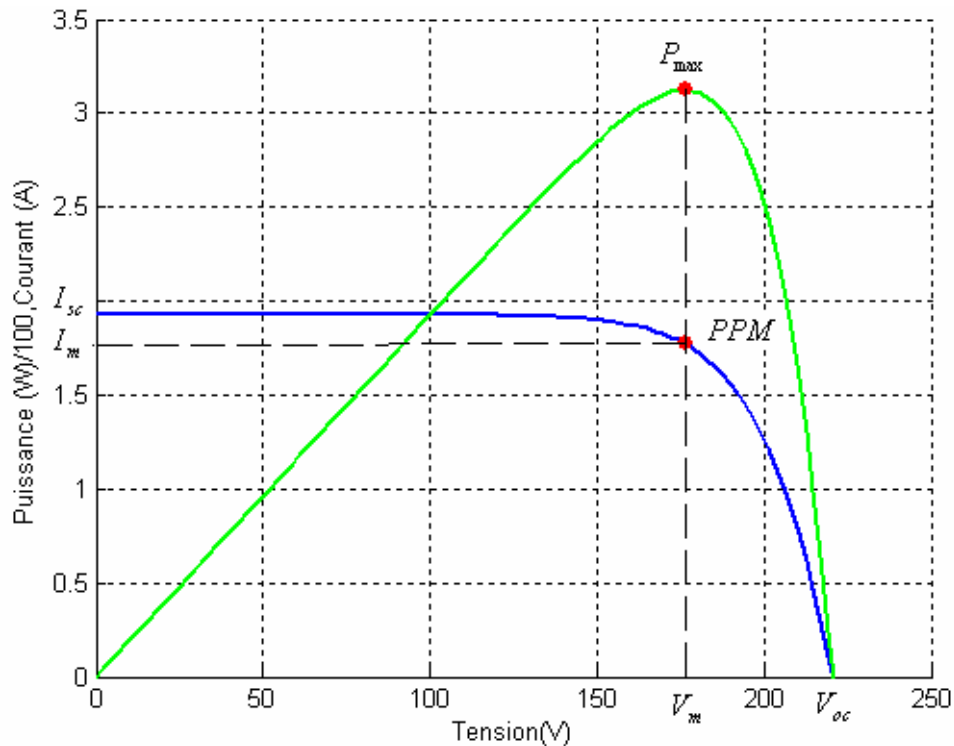


Fig. IV.9. Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur PV à son point de puissance maximale, plusieurs procesusces ont été utilisée pour contrôler les MPPT à savoir :

- ❖ Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage).
- ❖ Algorithme du Courant constant (Constant Curent).
- ❖ Perturbation et Observation (P&O, Perturbation and Observe).
- ❖ Perturbation et Observation extrémale.
- ❖ Conductance Incrémentale.

La puissance de fonctionnement du générateur PV est facilement calculée à partir du produit tension-courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des conditions climatiques (éclairage, température). Cette référence, étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser.

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche applicable dans le cadre du MPPT car elle est simple et basé sur des mesures de tension et du courant du champ photovoltaïque V et I respectivement.



Cette méthode fonctionne en perturbant périodiquement la tension du champ PV, et en comparant la puissance précédemment fournie avec la nouvelle après perturbation, puis on peut trouver le point maximum de puissance même avec les variations de l'éclairement et de la température. La Figure 10 représente l'algorithme de la méthode P&O.

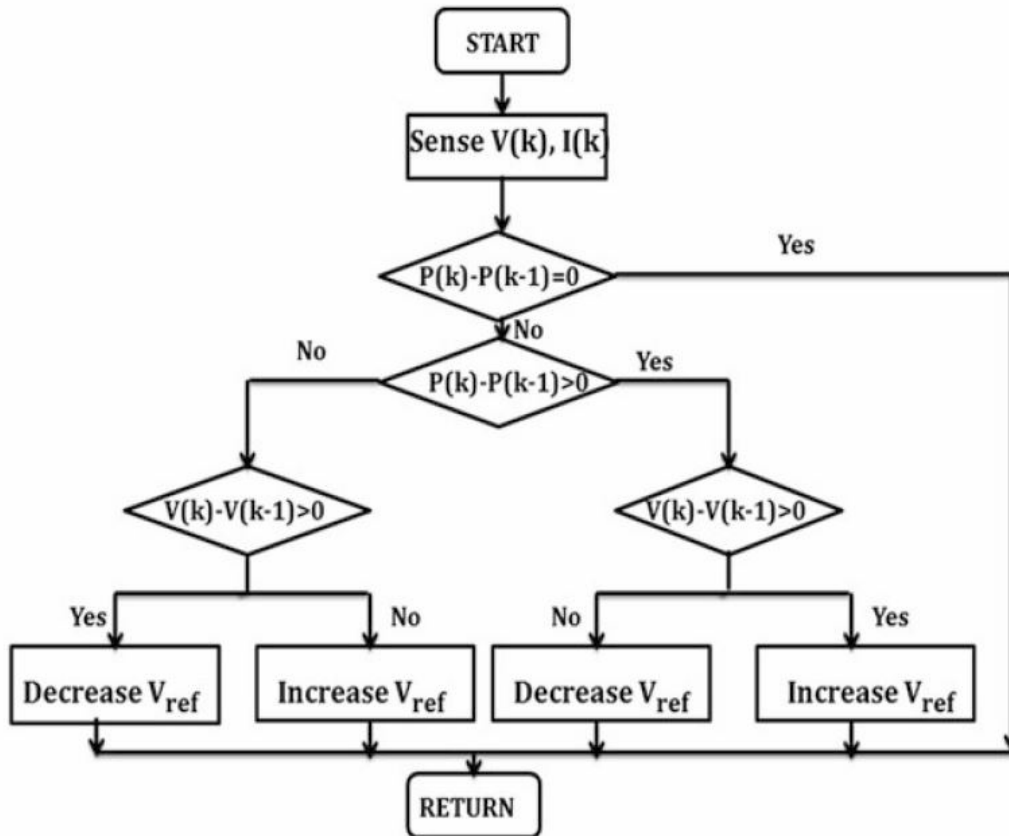


Fig. IV.10. Organigramme de la méthode P&O

Le Système photovoltaïque proposée est représenté dans la figure constitué d'un générateur PV alimente une charge résistive ( $R_s$ ), peut délivrer dans les conditions standards une puissance de 40 W et un courant de 2.5A sous une tension optimale de 21.8V. Aussi un convertisseur survolteur(Boost) pour évaluer les tensions supérieures, finalement La commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend avec les conditions météorologiques Régie selon le principe de régulation de la variation automatique du rapport cyclique  $\alpha$  à la valeur adéquate pour maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.

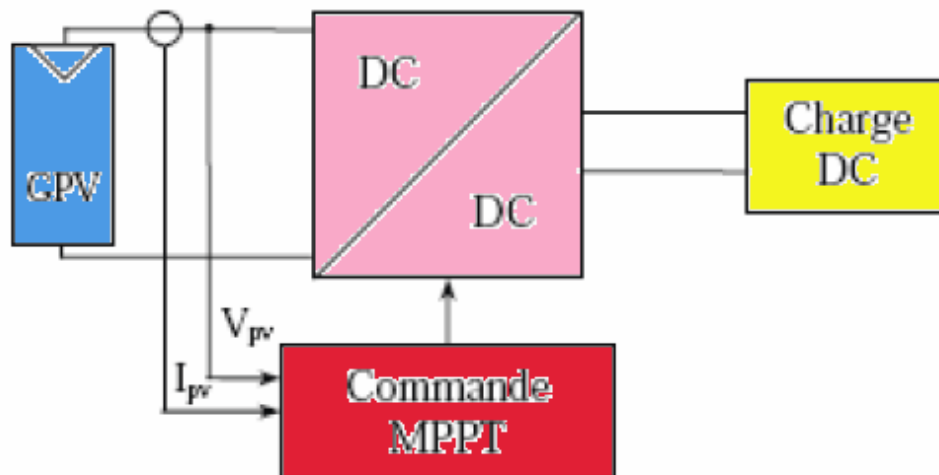


Fig. IV.11. Système photovoltaïque( système + convertisseur +MPPT+charge DC)

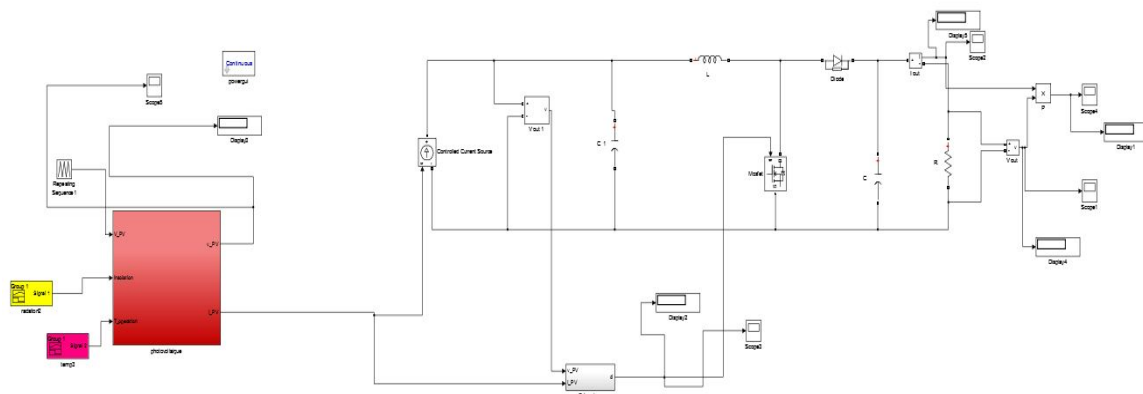


Fig. IV.12.schéma détaillé Système photovoltaïque

Les figures montre la courbe de la tension et la puissance en fonction de temps avec MPPT technique à la température de 25 C avec les variations des irradiation de 1000 W / m<sup>2</sup> 800 W 600 W et. On peut constater que la Puissance de sortie obtenue sans technique MPPT eu des perturbations avant d'obtenir la sortie requise et la tension de sortie n'était pas de la valeur souhaitée. Si La méthode P&O a été appliquée le résultat a été observé et on peut déduit que la Puissance maximale de la technique de perturbation et d'observation est atteinte.

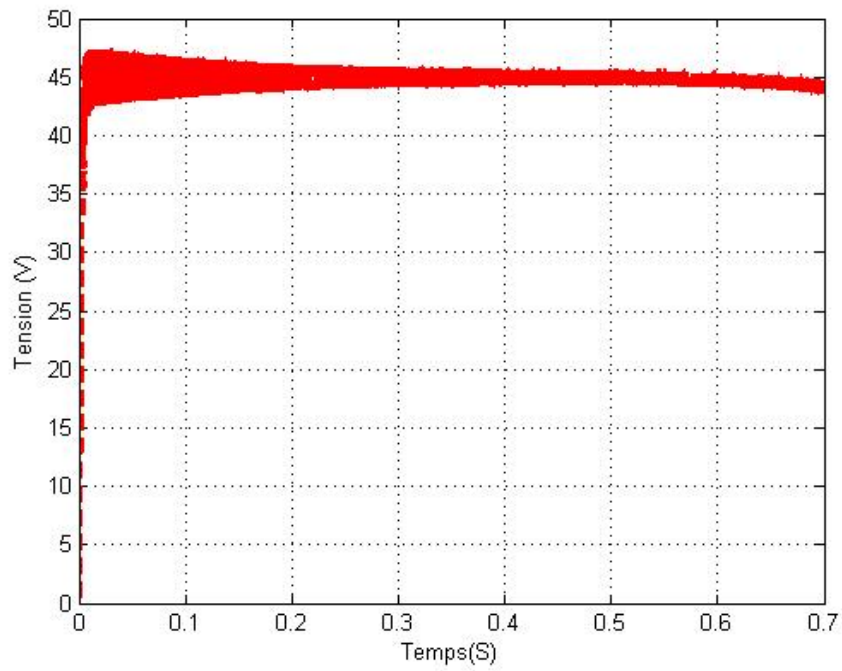


Fig. IV.13.la courbe de tension en fonction de temps avec MPPT

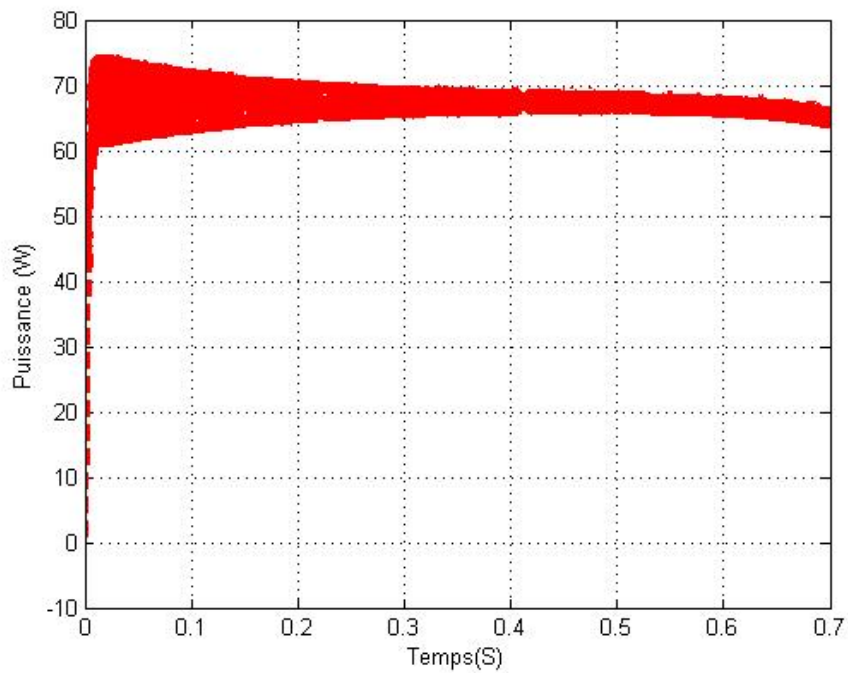


Fig. IV.14.la courbe de puissance en fonction de temps avec MPPT

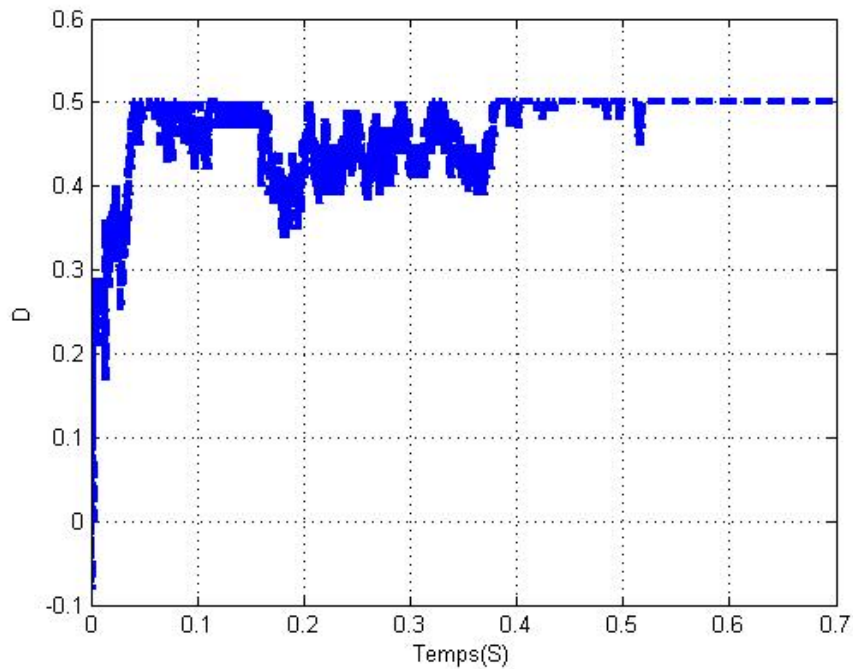


Fig. IV.15.rapport cyclique en fonction de temps

#### **IV.7.Conclusion:**

Dans ce chapitre, les résultats de simulations représentés en premier lieu de captures solaire hybride PV/T et en deuxième partie l'ensemble de composé de : générateur photovoltaïque, hacheur (boost) et la commande MPPT « perturbation et observation » est présentée. D'après les résultats obtenus de la simulation, on peut remarquer :

- ❖ Le rôle d'un capteur solaire hybride PV/T est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie électrique par le générateur PH(la cellule) et en énergie calorifique utilisable par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur
- ❖ Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairage et le nombre des cellules. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards
- ❖ Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT peut effectuer leurs principes. Le convertisseur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

## *CONCLUSION GENERAL*

---

### **CONCLUSION GENERAL :**

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique et thermique des capteurs solaires (Hybride PV/T ,photovoltaïque (PV)).

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi les différentes générations de cellules.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types des capteurs solaires utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le capteur solaire thermique et le capteur solaire photovoltaïque. Ainsi, on a fait une explication leur avantages et leur inconvénient

Finalement, on a étudié la modélisation des capteurs solaires. Pour ce la, on a étudié d'abord la modélisation des capteurs solaires par la résolution de l'équation caractéristique non linéaire d'un capteur solaires. Puis on a représenté la structure de la commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Cette commande MPPT numérique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale. Puis, on a étudié l'adaptation par le convertisseur DC-DC survolteur et on trouve les relations relient les grandeurs du convertisseur et le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur

D'après les résultats de la simulation obtenus, on peut dire que :

Les performances du générateur se dégradent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'intensité de l'éclairement. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) :

Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge et augmenter la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.