

-PET- Vol. 60

ISSN : 1737-9934

Etudes et Applications sur les Energies Renouvelables

**Proceedings of Engineering & Technology
-PET-**

Editeur :

Dr. Ahmed Rhif (Tunisie)

**International Centre for Innovation & Development
-ICID-**

ICID

ISSN: 1737-9334

-PET- Vol. 60

International Centre for Innovation & Development

Proceedings of Engineering & Technology -PET-

Etudes et Applications sur
les Energies Renouvelables

Editeur:

Dr. Ahmed Rhif (Tunisie)

International Centre for Innovation & Development

-ICID-

Editeur en chef:

Dr. Ahmed Rhif (**Tunisia**)

Ahmed.rhif@gmail.com

Dean of International Centre for
Innovation & Development (**ICID**)

Comité de redaction:

Prof. Georges Descombes, **France**

Dr. Mohamed Becherif, **France**

Prof. Mohammed El Hadi Zaim, **France**

Prof. El Mati Khoumri, **Maroc**

Dr. Sophie Simonet, **France**

Prof. Abdelmounaïm Tounzi, **France**

Prof. Djeghlal Mohammed Elamine, **Algérie**

Prof. Hassane Mahmoudi, **Maroc**

Dr. Nachida Kasbadji Merzouk, **Algérie**

Prof. Nektarios Benekos, **Grèce**

Dr. Saoussen Hammami, **Tunisie**

Prof. Abdellah El Fadar, **Maroc**

Prof. Djamila Rekioua, **Algérie**

Dr. Haitham Saad Mohamed Ramadan, **France**

Prof. Kamal Reklaoui, **Maroc**

Dr. Sara Zatir, **Algérie**

Prof. Abdellah Mechaqrane, **Maroc**

Prof. Abdelkader Aissat, **Algérie**

Prof. Adnan Yassine, **France**

Prof. Abdelfettah Barhdadi, **Maroc**

Prof. Ali Haddi, **Maroc**

Dr. Berbaoui brahim, **Algérie**

Dr. Hatem Trabelsi, **Tunisie**

Dr. Khouloud Bedoud, **Algérie**

Prof. Khenfer Nabil, **Algérie**

Dr. Mustapha Hatti, **Algérie**

Dr. Mohamed Gherbi, **Algérie**

Dr. Mimi Belatel, **Algérie**

Dr. Rafika Boudries, **Algérie**

Prof. Salma El Aimani, **Maroc**

Prof. Sellam Mebrouk, **Algérie**

Prof. Souad Tayane, **Maroc**

Prof. Tahar Bahi, **Algérie**

Dr. Toufik Madani Layadi, **Algérie**

Prof. Touria Barradi, **Maroc**

Dr. Youcef Soufi, **Algérie**

Prof. Youssef Errami, **Maroc**

Prof. Zohra Ameer, **Algérie**

Sommaire

- Etude et Simulation d'un Contrôleur MPPT à Stratégie de Commande à Conductance Incrémentale. **Page 1**
M. MGHEZZI LARAFI, B. BOUZIDI, D. GHRIBI ep DIAF, M. FATHI.
- Synthèse d'un nouveau colorant à base de tétrazine pour les cellules photovoltaïques à colorant à base de ZnO. **Page 8**
Adala Amina, Bencharif Leila, Guergouri Mounia.
- Etude, simulation d'un suiveur de soleil avec convertisseur intégré optimise. **Page 14**
HOUHOU Aimad abdel illah, Abid Hamza, Benabadji Noureddine, Bensaad Zouaoui.
- Diagnostic d'un Convertisseur AC/DC dans un Système Hybride PV_ Eolienne. **Page 19**
K. Ifrah, O. Bendjeghaba, S. Ben Achour, f. Bourourou.
- FILTRAGE DYNAMIQUE DES HARMINIQUES BASE SUR MSRB Contrôlée Par Régulateur PI. **Page 24**
F. BOUROUROU, S.A. TADJER, I. HABI, S. Ben Achour.
- Impact de l'intégration de l'énergie photovoltaïque au réseau (Aspect Qualité de l'énergie électrique). **Page 29**
Asma REBAI, Saliha BOULAHCHICHE, Salim HADDAD.
- Choix du Système d'Entraînement Electrique dans une Station de Pompage d'Eau. **Page 36**
Djamila Talah, Rachid Chaibi.
- Amélioration de la performance énergétique des Bâtiments résidentiels en Tunisie entre le choix. et l'exigence. **Page 40**
Naima Guedich, Rahma Ben Amor.
- Le Dispositif de la Façade Ventilée, une Réponse de l'Architecture Climatique Pour Un Rafraichissement Passif, Le cas de la ville Alger. **Page 47**
D. Baziz, A. Boussoualim.
- Vers un Seuil limite de Référence des Consommations Energétiques dans le Bâtiment Résidentiel Existant en Algérie en vue d'une Réhabilitation Thermique ; Etat des Lieux, Démarches et Perspectives. **Page 51**
Nouara Issaadi, Aicha Boussoualim.
- Production Décentralisée de l'Energie Electrique à Partir d'un Système Hybride (PV/PAC). **Page 60**
Mimi Belatel.

Etude et Simulation d'un Contrôleur MPPT à Stratégie de Commande à Conductance Incrémentale

M. MGHEZZI LARAFI⁽¹⁾, B. BOUZIDI⁽¹⁾, D. GHRIBI ep DIAF⁽¹⁾, M. FATHI⁽¹⁾

⁽¹⁾Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES) / Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER)
 Bou Ismail, 42415, W. Tipaza, Algérie.
 E-mail : lm.mghezzi@yahoo.fr.

Résumé— Ce travail est consacré à l'étude et la simulation d'un contrôleur MPPT boost destiné à l'alimentation d'un onduleur de pompage solaire. Nous avons opté pour la méthode de la conductance incrémentale en vue d'effectuer la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque. Nous présenterons tout d'abord le principe du tracking adopté du point de puissance maximale MPP, ainsi que l'étude des différents facteurs influant sur le bon fonctionnement du convertisseur DC/DC étudié. Nous présenterons enfin les différents résultats de simulation en mettant en évidence les divers phénomènes mis en jeu.

Mots clés— *Contrôleur MPPT boost, Conductance incrémentale, Modèle d'état, Rapport cyclique, Filtre.*

I. INTRODUCTION

Les sources d'énergies renouvelables constituent une alternative aux énergies fossiles qui sont en voie d'épuisement, ce sont des énergies dites propres vu qu'elles participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, elles rentrent d'une manière générale dans le cadre de développement durable. L'énergie solaire est à l'origine presque de toutes les différentes formes d'énergies renouvelables, qui peut être exploitée sous deux aspects, photovoltaïque ou thermique. Le champ d'application de l'énergie photovoltaïque est devenu très large et varié avec l'évolution technologique, cependant les convertisseurs DC/DC photovoltaïques [1] au sens large du terme constituent un système de conditionnement de puissance très essentiel dans diverses installations photovoltaïques, ils permettent de placer le système dans la zone de fonctionnent optimale, afin d'extraire le maximum de puissance à partir d'un générateur photovoltaïque. Pour toutes ces raisons, nous nous proposons d'effectuer l'analyse des divers phénomènes intervenant dans le tracking du MPP, en effectuant une simulation sous l'environnement Matlab.

II. Modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Nous avons opté pour le modèle à deux diodes pour modéliser le générateur photovoltaïque [2] (Fig. 1).

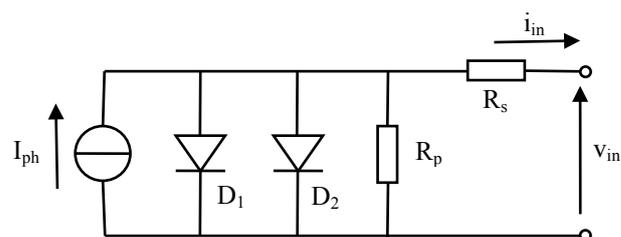


Fig. 1 Schéma équivalent du modèle à deux diodes du générateur photovoltaïque

La caractéristique courant-tension du champ photovoltaïque est décrit par l'équation suivante :

$$I_{in} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{in} + R_s I_{in}}{V_T n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{in} + R_s I_{in}}{V_T n_2} \right) - 1 \right) - \frac{V_{in} + R_s I_{in}}{R_p} \quad (1)$$

Avec :

- I_{ph} : photocourant du générateur PV.
- I_{s1} et I_{s2} : courants de saturations des diodes D_1 et D_2 .
- n_1 et n_2 : facteurs d'idéalités des diodes D_1 et D_2 .
- R_s : résistance série du générateur PV.
- R_p : résistance parallèle du générateur PV.

La tension thermodynamique d'un module PV est définie par :

$$V_{T, \text{mod}} = \frac{K_B T_j}{q_e} \quad \text{Où : } K_B : \text{constante de Boltzman.} \\ T_j : \text{température de jonction en } ^\circ\text{K.} \\ q_e : \text{charge d'un électron.}$$

La tension thermodynamique V_T du générateur PV est définie aux équations 2.

Nous avons utilisé l'algorithme de Newton pour résoudre l'équation algébrique non linéaire de forme implicite (1), elle de la forme :

$$i_{in}(k+1) = f(i_{in}(k), v_{in}(k)) \quad (2)$$

Le générateur PV préalablement dimensionné est constitué d'une association série-parallèle de module PV. Soient N_s et N_p respectivement le nombre de modules PV associés en série et en parallèle du champ PV, et soient I_{sc} et V_{oc} respectivement le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert du générateur PV. Les paramètres d'un générateur PV sont liés à ceux homologues d'un module PV par les équations (3).

L'acronyme mod figure aux indices des paramètres d'un panneau PV.

$$\begin{aligned}
 I_{ph} &= N_p I_{ph,mod} & R_p &= \frac{N_s}{N_p} R_{p,mod} \\
 I_{s1} &= N_p I_{s1,mod} & V_T &= N_s V_{T,mod} \\
 I_{s2} &= N_p I_{s2,mod} & I_{sc} &= N_p I_{sc,mod} \\
 R_s &= \frac{N_s}{N_p} R_{s,mod} & V_{oc} &= N_s V_{oc,mod}
 \end{aligned} \quad (3)$$

La figure 2 met en évidence le circuit de puissance d'un contrôleur boost, dédié à l'alimentation d'un onduleur de pompe photovoltaïque.

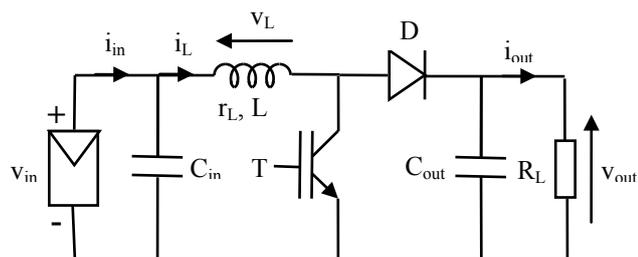


Fig. 2 Schéma de principe d'un hacheur boost

Où :

V_{in} et i_{in} désignent la tension et le courant d'entrées du hacheur. V_{out} et i_{out} représentent la tension et le courant de sortie.

Le convertisseur DC/DC est constitué essentiellement d'un interrupteur électronique de puissance commandable comme un transistor IGBT et d'une diode à commutation rapide. L'interrupteur est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage fixe et de rapport cyclique variable, qui permet d'effectuer une adaptation d'impédance en vue de placer le point de fonctionnement du l'installation photovoltaïque autonome au point de puissance maximale. La conduction des deux interrupteurs est complémentaire. On suppose que le système opère en mode de conduction continu, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'extinction du courant dans l'inductance. On distingue deux modes de fonctionnement du hacheur survolteur selon l'état fermé ou ouvert de son interrupteur. Dans le cas où le convertisseur opère en haute fréquence, on pourra lui associer un modèle d'état approximé unique au sens des valeurs moyennes des grandeurs, valable pour les deux modes de fonctionnement du hacheur, sous l'hypothèse d'évolution temporelle linéaire des variables d'état du système. L'onduleur de pompe est vu comme une résistance apparente par le hacheur, il joue le rôle d'une charge électrique. Le modèle d'état continu régissant le comportement dynamique du système est donné par :

$$\dot{X} = A X + B U \quad (4)$$

Avec :

$$X = \begin{bmatrix} v_{in} \\ v_{out} \\ i_L \end{bmatrix} \quad U = [i_{in}]$$

Les paramètres matriciels du système étant :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{C_{in}} \\ 0 & \frac{-1}{R_L C_{out}} & \frac{(1-D)}{C_{out}} \\ \frac{1}{L} & \frac{-(1-D)}{L} & \frac{-r_L}{L} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{in}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Vu que le rapport cyclique est variable au cours du temps lors de la recherche du MPP, la représentation d'état du système est non linéaire. Nous avons opté pour l'algorithme de Runge Kutta à pas constant d'ordre 4 comme solveur du système d'équations différentielles du premier ordre considéré. Le modèle d'état échantillonné du système est la forme de la forme générale :

$$X(k+1) = g(X(k), U(k), D(k)) \quad (5)$$

La figure 3 visualise l'installation PV autonome étudiée, elle est constituée principalement d'un générateur PV, d'un contrôleur MPPT et d'une charge électrique qui comporte un onduleur de pompe PV de pilotage d'un système motopompe.

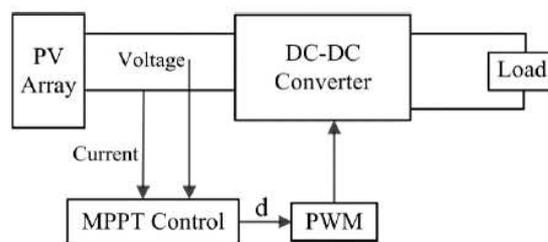


Fig. 3 Schéma block du système PV autonome

III. Principe de la stratégie de commande MPPT à conductance incrémentale

L'algorithme de la conductance incrémentale s'adapte bien aux variations rapides des conditions météorologiques du site, il est relativement plus stable que la méthode P&O, cependant son implémentation pratique est plus difficile. L'organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale est visualisé à la Fig. 4. La méthode de la conductance incrémentale est basée sur l'évaluation instantanée de la pente de la caractéristique puissance-tension, afin de détecter la position du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque par rapport au MPP, selon laquelle le rapport cyclique du hacheur est ajusté, de telle manière à annuler la pente de la courbe de puissance. Cela est numériquement impossible, pour cette raison le point de fonctionnement oscille en permanence autour du MPP. Pour pallier à cet inconvénient, la version améliorée de cette technique introduit une nouvelle condition dans les critères de test d'égalité à zéro de l'algorithme [3]. On définira une erreur marginale ϵ et on prendra la valeur absolue des critères de nullité qui doivent être inférieure au sens large à ϵ , les conditions pour que la puissance maximale soit atteinte sont donc :

$$|\Delta i_{in}| \leq \epsilon, \quad |\Delta v_{in}| \leq \epsilon, \quad \left| \frac{i_{in}}{v_{in}} + \frac{\Delta i_{in}}{\Delta v_{in}} \right| \leq \epsilon \quad (6)$$

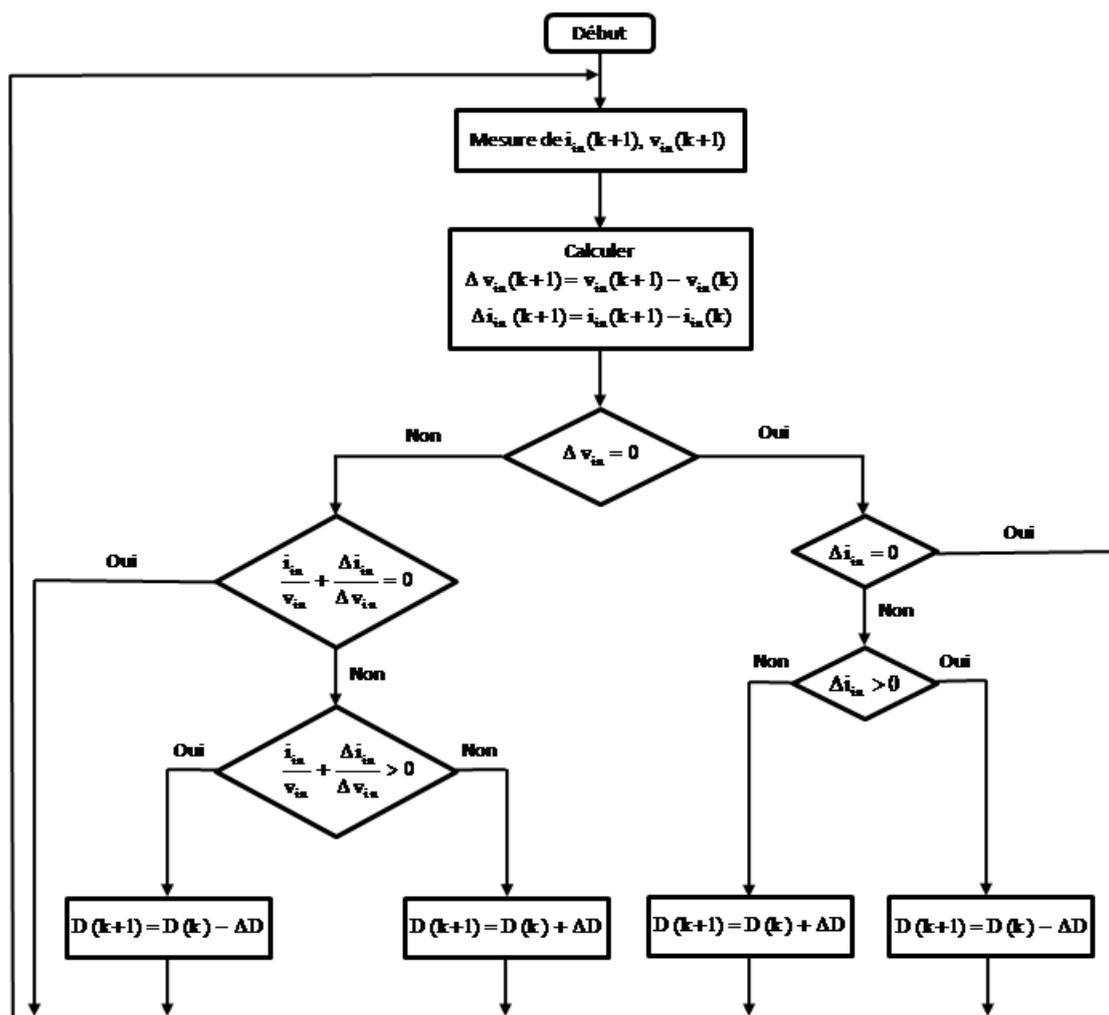


Fig. 4 Organigramme de la méthode de la conductance incrémentale

IV. RESULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSIONS

V.1 Données de simulation du système

Les principales grandeurs caractéristiques des modules PV poly-cristallin utilisés dans les conditions météorologiques de référence (25 °C, 1000 W/m²) sont consignées au tableau I:

TABLE I. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DU MODULE PV

Grandeur	Valeur
Puissance crete P _{max, mod}	120 W
Tension nominale V _{ns, mod}	24 V
Tension au MPP V _{mp, mod}	32.52 V
Courant au MPP I _{mp, mod}	3.71 A
Tension de circuit ouvert V _{oc, mod}	40.15
Courant de court-circuit I _{sc, mod}	3.99 A
Facteur de forme	75.15 %
NOCT	45 °C

Dans les conditions standards, les paramètres de simulation du module PV utilisé sont donnés au tableau II :

TABLE II. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU MODULE PV

Paramètre	Valeur
Photocourant I _{ph, mod}	4 A
Courant de saturation de la diode D ₁ : I _{s1, mod}	1.2*10 ⁻⁹ A
Courant de saturation de la diode D ₂ : I _{s2, mod}	1.5 *10 ⁻⁵ A
Résistance série R _{s, mod}	0.5760 Ω
Résistance parallèle R _{p, mod}	12.24 k Ω
Facteur d'idéalité de la diode D ₁ : n ₁	0.9
Facteur d'idéalité de la diode D ₂ : n ₂	1.9

Le convertisseur DC/DC alimente un onduleur de pompage PV triphasé, ce dernier est raccordé à un moteur asynchrone triphasé d'une puissance de 4 kW et d'une tension entre phases de 380 V, il entraîne à son tour une pompe centrifuge qui

assure une alimentation en eau d'habitats en site isolé du réseau conventionnel. Un dimensionnement préalable permet de calculer la taille du générateur PV dans les conditions standard, soient :

Nombre de modules PV montés en série par branche : $N_s = 17$.
 Nombre de branches du générateur PV : $N_p = 2$.

Les paramètres électriques du hacheur survolteur sont mis en évidence dans le tableau III.

TABLE III. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DU CONTROLEUR MPPT

Paramètre	Valeur
Capacité d'entrée du hacheur : C_{in}	5 μ F
Capacité de sortie du hacheur : C_{out}	30 μ F
Inductance du convertisseur DC/DC : L	20 mH
Résistance interne de l'enroulement : r_L	0.1 Ω
Résistance apparente vue par le hacheur : R_L	90 Ω

Les données de simulation du circuit de commande du convertisseur DC/DC sont comme suit :

Rapport cyclique initial : $D_0 = 0.0$
 Fréquence de porteuse : $f_{sw} = 10$ kHz
 Pas du rapport cyclique : $\Delta D = 0.001$
 Erreur marginale : $\epsilon = 0.001$

V.2 Simulation du comportement du contrôleur MPPT

Le point de fonctionnement du système à un instant k donnée est obtenu par la détermination du point d'intersection entre la caractéristique courant-tension du générateur PV décrit par l'équation (2) et celle de la droite des charges définie à l'instant k de la manière suivante :

$$i_{in}(k) = \frac{1}{R_D(k)} v_{in}(k) \quad (7)$$

Avec :

$$R_D(k) = r_L + (1 - D(k))^2 R_L \quad (8)$$

$R_D(k)$: représente la résistance apparente vue par le générateur PV, qui dépend du rapport cyclique à l'instant k.

Cependant, le choix du rapport cyclique initial dépend de la résistance de charge R_L , qui détermine la position du point de fonctionnement initial par rapport au MPP. A titre d'exemple, dans le cas où le point de fonctionnement initial est situé à gauche du MPP et si l'on initialise le rapport cyclique par zéro ($D(0) = 0$), l'algorithme de recherche du MPP doit faire augmenter la tension v_{in} du générateur PV pour qu'il puisse atteindre le MPP et vu que le rapport cyclique $D(k)$ et la tension $v_{in}(k)$ ont des sens de variation opposés, le rapport cyclique doit décroître, ce qui est impossible que $D(k)$ devienne négatif, dans ces conditions l'algorithme se bloque et reste figé au point de fonctionnement initial et le MPP n'est jamais atteint. Cela montre que le choix du point de fonctionnement initial est déterminant pour que l'algorithme puisse atteindre le MPP. Par ailleurs, il faudra limiter la valeur maximale prise par

le rapport cyclique en vue d'éviter une baisse considérable du rendement du convertisseur. La simulation du convertisseur DC/DC considéré s'effectue en boucle fermée entre le modèle d'état du système et le modèle du générateur PV.

Nous avons effectué la simulation numérique de l'algorithme de recherche du MPP à l'aide de la méthode de la conductance incrémentale sous l'environnement MATLAB (langage de programmation). Les représentations graphiques simulées de la caractéristique courant-tension du générateur PV, ainsi que les diverses grandeurs décrivant le comportement du système, telles que les évolutions temporelles du rapport cyclique, de la puissance et du courant de sortie du convertisseur, ainsi que les tensions d'entrée et de sortie du contrôleur MPPT, sont montrées respectivement aux figures 5 et 6. On observe des oscillations des réponses temporelles du système à cause des erreurs numériques de l'algorithme de la conductance incrémentale simple. Par contre les fluctuations du système sont éliminées grâce à la méthode de la conductance incrémentale améliorée, cela est montré clairement aux figures 7 et 8. On constate que la réponse du système est rapide, de l'ordre de 10 ms, on pourra considérer que l'éclairement est constant pendant ce lap de temps très réduit. Par ailleurs, on constate que les réponses temporelles du convertisseur sont amorties, la convergence est pratiquement directe.

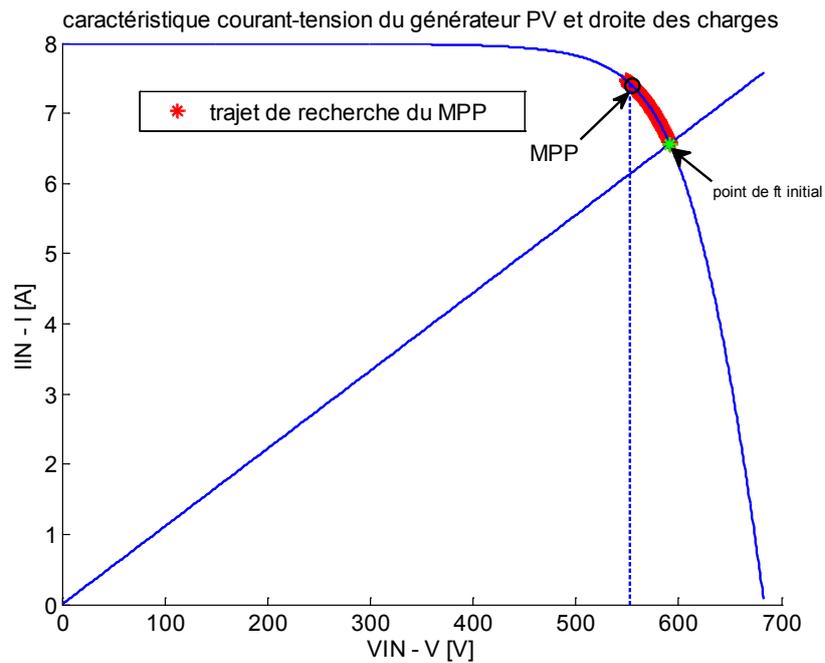


Fig. 5 Trajet du point de fonctionnement décrit dans la caractéristique courant-tension du générateur PV en utilisant la méthode de la conductance incrémentale simple.

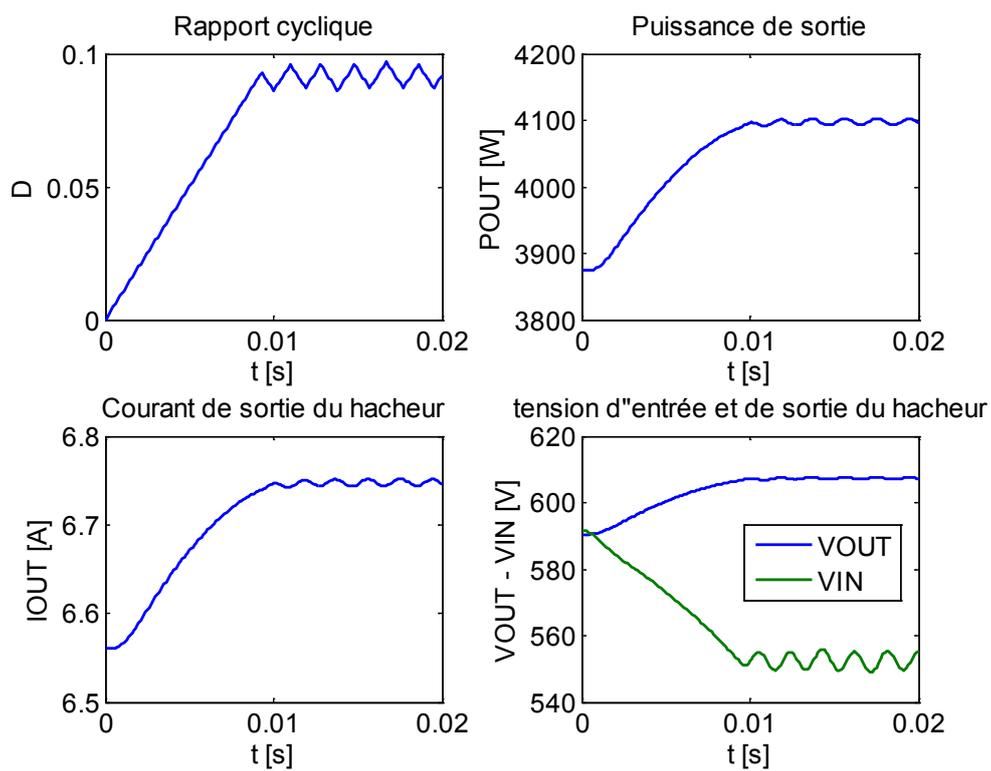


Fig. 6 Résultats de simulation obtenus en utilisant la méthode de la conductance incrémentale simple.

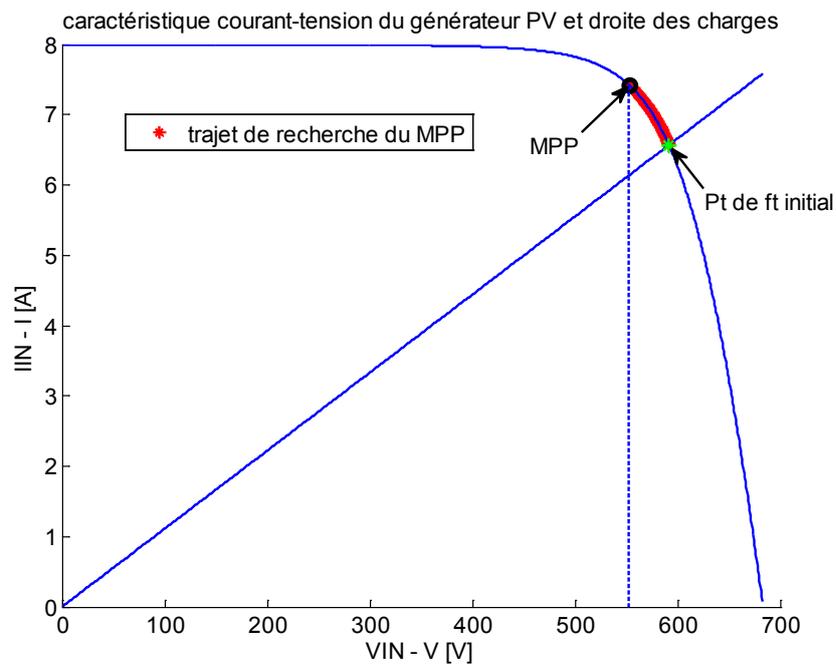


Fig. 7 Trajet du point de fonctionnement décrit dans la caractéristique courant-tension du générateur PV en utilisant la méthode de la conductance incrémentale améliorée.

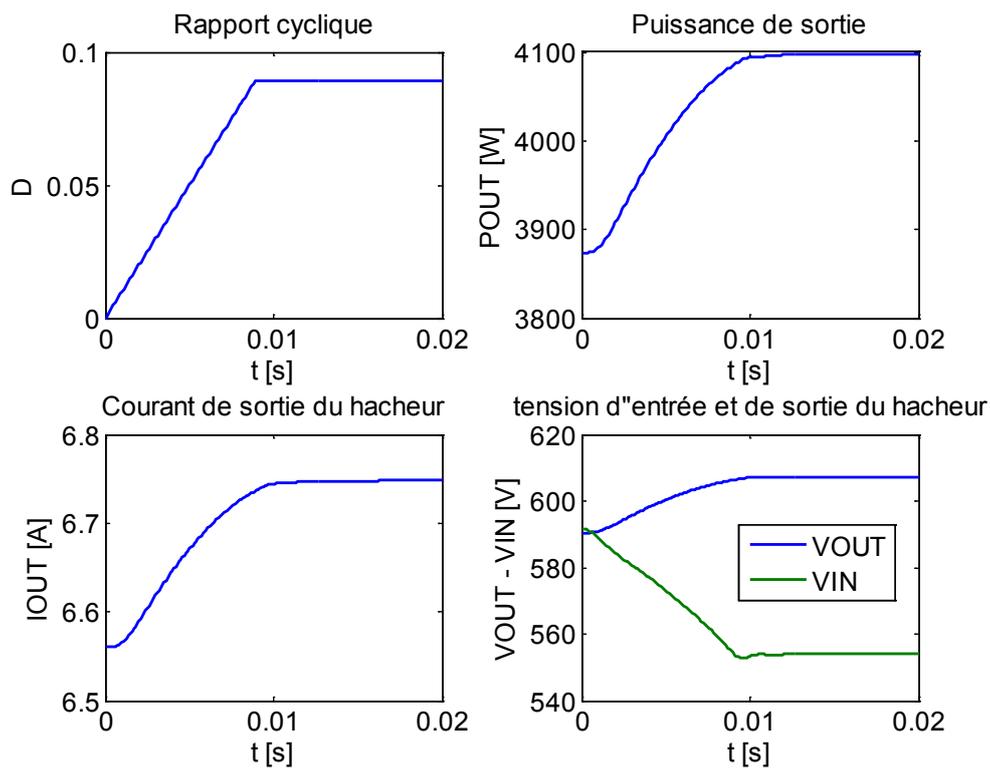


Fig. 8 Résultats de simulation obtenus en utilisant la méthode de la conductance incrémentale améliorée.

CONCLUSION

La méthode de la conductance incrémentale simple qui traite la dérivée de la puissance donne des résultats satisfaisants, elle est caractérisée par sa rapidité vis-à-vis aux variations brusques des conditions météorologiques. Cependant elle présente un taux d'ondulation important de la puissance qui engendre des pertes considérables. Pour remédier à ce problème, on recourt à la version améliorée de cette méthode qui permet de supprimer totalement ces bruits d'ondulations.

Un compromis s'impose dans le dimensionnement de l'inductance du convertisseur DC/DC, afin d'assurer d'une part une bonne caractéristique d'amortissement et d'autre part un temps de réponse rapide du contrôleur MPPT.

En perspective, nous pourrions rapporter des améliorations des algorithmes MPPT basés sur la méthode de la conductance incrémentale en introduisant les techniques de recherche du MPP à pas variable [3], les concepts de l'intelligence artificielle [4], ainsi que les algorithmes de filtrage des signaux entrées-sorties du système de la discipline du traitement du signal, qui peuvent être combinés en vue de réaliser des méthodes de poursuite du MPP de hautes performances dynamiques.

REFERENCES

- [1] Guy. Séguier, "Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance, Commande et Comportement Dynamique", vol. 5. Technique & Documentation, 1998.
- [2] L. Sandrolini, M. Artioli, U. Reggiani, "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis", *Applied Energy* 87 (2010) 442-451, Elsevier.
- [3] Khaled SOBAlHI, "Etude et réalisation d'un hacheur MPPT à contre réaction de tension", Mémoire de Magister, 2003.
- [4] Emad M. Ahmed, Masahito Shoyama, "Stability Study of Variable Step Size Incremental Conductance/Impedance MPPT for PV systems", 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia May 30-June 3, 2011, The Shilla Jeju, Korea.
- [5] L. R. Muniz ; M. M. Severo ; G. T. Braga ; F. G. Guimarães, "Neuro-fuzzy structure applied in maximum power point tracking in photovoltaic panels", *Power Electronics Conference, COBEP, Brazilian, IEEE, 2015.*

Synthèse d'un nouveau colorant à base de tétrazine pour les cellules photovoltaïques à colorant à base de ZnO

Adala Amina^{#1}, Bencharif Leila^{*2}, Guergouri Mounia^{*3}

[#] *Laboratoire des sciences et technologies de l'environnement, Université des Frères Mentouri Constantine I
Constantine 25000, Algérie*

¹adala.amina@umc.edu.dz

³guergouri.mounia@umc.edu.dz

^{*} *Laboratoire de Chimie des Matériaux, Université des Frères Mentouri Constantine I
Constantine 25000, Algérie*

²leilabencharif@yahoo.com

Résumé — IL existe un besoin croissant de développer des nouveaux matériaux pour des applications dans l'optique, l'électronique et le photovoltaïque. Les molécules organiques jouent un rôle essentiel dans ces avancées, par leurs variétés structurales et fonctionnelles.

Ce travail porte sur l'étude des propriétés spectroscopiques et électrochimiques d'un colorant à base de tétrazine, le N-(4-(6-(4-aminophenyl)-1,2,4,5-tétrazin-3-yl)phenyl)-N-phenylbenzenamine (TTA), présentant un système Donneur-Accepteur, conçu pour les cellules solaires à colorant (Dye-sensitized solar Cells DSCs).

Le groupement s-tétrazine a été choisie comme groupement accepteur pour sa forte affinité électronique, tandis que la triphénylamine, comme groupement donneur pour son faible potentiel d'ionisation. Ce colorant a été électro-greffé sur la surface semi-conductrice d'ITO, en présence et en l'absence de ZnO. Les mesures électrochimiques et optiques nous ont permis de calculer les gaps de ce colorant. Des simulations ont été réalisées pour estimer les valeurs théoriques de la HOMO et de LUMO de notre produit. L'optimisation de la géométrie est réalisée par la méthode DFT en utilisant le programme Gaussian 09, avec la fonctionnel B3LYP.

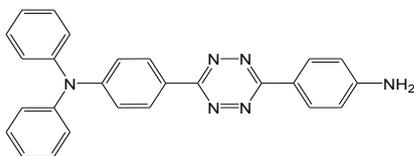


Fig 1 N-(4-(6-(4-aminophenyl)-1,2,4,5-tétrazin-3-yl)phenyl)-N-phenylbenzenamine.

Mots clés — Les cellules photovoltaïques, semi conducteur, tétrazines, électro-greffage

I. INTRODUCTION

Alors que les besoins énergétiques ne cessent d'augmenter, les énergies nucléaires et fossiles, non-renouvelables, sont de plus en plus critiquées (pollutions, catastrophes). Une solution alternative consiste à exploiter des ressources renouvelables, parmi lesquelles l'énergie lumineuse provenant du soleil. En effet, chaque année, la terre reçoit $1,6 \times 10^{18}$ kWh en énergie solaire, soit plus de dix mille fois la consommation mondiale d'électricité. [1]

Les cellules photovoltaïques organiques à colorant présentent de nombreux avantages par rapport aux cellules photovoltaïques inorganiques : elles peuvent être déposées sur de grandes surfaces, à grande vitesse, par des techniques classiques d'impression, sur des supports souples et légers, à moindre coût. [2] L'importance et la performance de ces cellules ont toutes deux largement augmenté ces vingt-cinq dernières années. [3] Toutefois, pour l'instant, elles possèdent une durée de vie et un rendement de conversion plus faibles que les cellules photovoltaïques inorganiques. Dans ce contexte, il est intéressant de développer de nouvelles molécules plus efficaces.

L'utilisation des molécules de colorants organiques dans le domaine du photovoltaïque fut découverte en 1991 par Mickael Graetzel. [4]. Les colorants sont greffés à la surface d'un solide transparent et poreux, comme l'oxyde du Titane TiO_2 , et forme une monocouche. Sous l'effet de la lumière, les électrons excités passe au niveau LUMO dans l'électrode transparente de TiO_2 . Les trous restent au niveau HOMO sont ensuite transférés à l'électrode de TiO_2 via un électrolyte contenant des ions iodures qui servent de matériaux redox. Bien que les cellules photovoltaïques organiques à colorant ne soient pas les cellules photovoltaïques organiques les plus performantes, nous avons choisi de tester des composés comme donneur dans ce type de cellule qui fournit des résultats reproductibles. L'idée est de relier la structure et les

propriétés d'une molécule à son efficacité comme donneur dans une cellule photovoltaïque.

Afin de répondre au mieux à l'ensemble des critères de performance de ces cellules, nous avons pensé à un colorant de type donneur-accepteur. La présence conjointe d'un donneur et d'un accepteur devrait faciliter la génération des excitons et la séparation de charge. De plus, une bande à transfert de charge dans le visible est susceptible d'augmenter l'absorption de la lumière solaire.

La triphénylamine a été choisie comme donneur. En effet, elle devrait s'ajuster à une énergie de la HOMO de -5,0 eV. De plus, les dérivés de triphénylamine sont des transporteurs de trous efficaces qui peuvent absorber dans toute la gamme du visible, selon leur substitution. Ils sont d'ailleurs très utilisés dans les cellules photovoltaïques organiques. [5,6,7,8]. L'introduction d'un accepteur comme la tétrazine devrait abaisser la LUMO à environ -3,6 eV. Par ailleurs, la tétrazine devrait structurer la couche par strates grâce aux interactions de type π -stacking [9]. Ainsi la morphologie par couches successives du colorant devrait favoriser la diffusion des excitons, le transport des trous et améliorer le facteur de forme [10].

En conclusion, nous avons souhaité concevoir des colorants à base de tétrazine et de triphénylamine à utiliser comme donneurs dans une cellule photovoltaïque organique à colorant DSSCs.

L'efficacité des cellules conçues sera testée au centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) situé à Alger.

II. PARTIE EXPÉRIMENTALE

A. Produits chimiques

Le colorant : N-(4-(6-(4-aminophenyl)-1,2,4,5-tétrazine-3-yl)phenyl)-N-phenylbenzenamine a été synthétisé au niveau du laboratoire.

Les solvants : le solvant utilisé pour préparer la solution électrolytique est l'acétonitrile CH_3CN de pureté 99,99% (Aldrich).

L'électrolyte -support : les électrolytes supports utilisés dans ce travail sont le tetrabutylammonium tetrafluoroborate (Bu_4NBF_4) et le perchlorate de lithium LiClO_4 .

B. Dispositif électrochimiques

Montage électronique: permettant de tracer les courbes de voltammétrie cyclique comprend un potentiostat / galvanostat VoltaLab PGZ301 assisté par un ordinateur et une cellule de mesure. Les cellules électrochimiques : les cellules utilisées pour voltammétrie cyclique dite à « trois doigts » avec une capacité de 10 ml environ, comprend l'électrode de travail de carbone vitreux de 3 mm de diamètre.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. Etude théorique du colorant synthétisé

L'optimisation de la géométrie a été réalisée par la méthode DFT en utilisant le programme Gaussian 09. La fonctionnel que nous avons utilisée est la B3LYP.

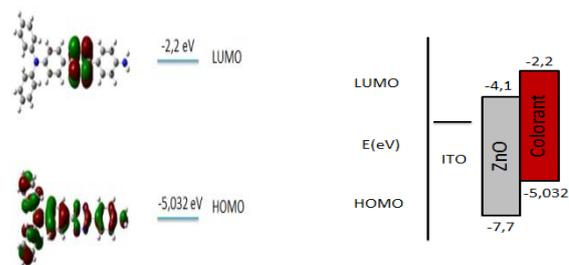


Fig. 2 : étude théorique du colorant synthétisé (TTA) par la méthode DFT en utilisant le programme Gaussian 09. La fonctionnel que nous avons utilisée est la B3LYP.

Les valeurs d'énergie de la HOMO (-5.032 eV) et de la LUMO (-2.2 eV), nous ont permis de savoir si cette molécule est adéquate pour être utilisée dans les DSSCs ou non. Le constat préliminaire montre que les orbitales frontières de cette molécule, permettent un transfert d'électrons de cette dernière vers la photo-électrode.

Donc cette molécule peut être utilisée comme colorant sur une photo-électrode de ZnO.

B. Synthèse du colorant (TTA)

La synthèse de cette tétrazine passe par la synthèse de plusieurs composés tels que la triphénylamine, la 4-(diphénylamino)- benzonitrile et dihydrotétrazine. Selon le schéma suivant :

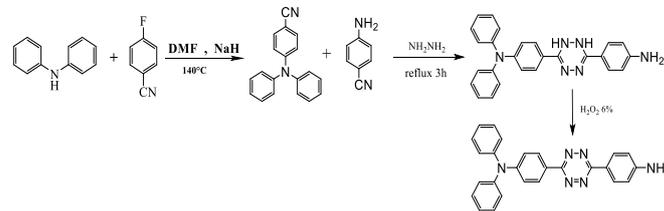


Fig 3 Différentes étapes de synthèse du colorant TTA

• Synthèse de la triphénylamine [11, 12,13] :

La triphénylamine a été synthétisée avec un rendement de 78 % par un couplage Hartwig-Buchwald entre la diphénylamine et le 4-fluorobenzonitrile (Figure 3). Le produit brut a été purifié par Chromatographie sur colonne de gel de silice en utilisant de l'acétate d'éthyle et de l'hexane comme solvant; (60%). $^1\text{H NMR}$: δ 7.08 (2H, tt, $J = 7.7, 1.2$

Hz), 7.18 (4H, dddd, $J = 8.2, 1.2, 1.2, 0.5$ Hz), 7.36 (2H, ddd, $J = 8.5, 1.5, 0.4$ Hz), 7.58 (4H, dddd, $J = 8.2, 7.7, 1.8, 0.5$ Hz), 7.95 (2H, ddd, $J = 8.5, 1.7, 0.4$ Hz).

^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ (ppm): 118.57, 146.13, 132.96667, 132.97, 129.25, 129.27, 129.26, 129.26, 124.74, 124.73, 124.45, 124.44, 124.42, 124.44, 106.35, 147.72, 147.71, 113.83, 113.84.

Pour la tétrazine :

Ces synthèses ont suivi une préparation directe de dihydrotétrazine par action d'un mélange d'hydrate d'hydrazine et de soufre [14,15].

- *Préparation de 3,6-bis (phényl) -1,2-dihydro-1,2,4,5-tétrazine :*

traitement d'une solution de benzonitrile (0,01 mol) dans de l'éthanol (3 ml) avec de l'hydrazine hydratée (2 ml) et une fleur de soufre (200 mg). Le chauffage du mélange au reflux pendant 1-3 heures a donné la 3,6-bis (phényl) -1,2-dihydro-1,2,4,5-tétrazine; aiguilles jaunes.

La 3,6-bis (aryl) -1,2-dihydro-1, 2, 4,5-tétrazine a été oxydée en tétrazine correspondante par traitement au peroxyde d'hydrogène (6%) selon un procédé décrit dans la littérature [16,17].

- *Préparation de 3,6-bis (phényl) -1, 2, 4,5-tétrazine :*

une solution de 3,6,6-bis (phényl) -1,2-dihydro-1,2,4,5-tétrazine (0,5 g, 1,8 mmol) et du peroxyde d'hydrogène aqueux (6%, 50 ml) a été chauffé à 60 ° C pendant 2 heures pour donner un solide rouge. Qui a été recueilli par filtration et séché à l'air. Le produit brut a été purifié par Chromatographie sur colonne de gel de silice en utilisant de l'acétate d'éthyle et de l'hexane comme solvant; (60%). 1HRMN (CDCl_3 ; 250 MHz, 2/3 ppm) 7,7 (10H, m). ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ (ppm): δ 6.89 (2H, ddd, $J = 8.2, 1.5, 0.5$ Hz), 7.22-7.36 (6H, 7.25 (dtd, $J = 8.3, 1.2, 0.5$ Hz), 7.31 (tt, $J = 7.3, 1.2$ Hz)), 7.60 (4H, dddd, $J = 8.3, 7.3, 1.7, 0.5$ Hz), 7.85 (2H, ddd, $J = 8.3, 1.8, 0.4$ Hz), 7.91-7.98 (4H, 7.94 (ddd, $J = 8.3, 1.6, 0.5$ Hz), 7.95 (ddd, $J = 8.2, 1.6, 0.5$ Hz)).

^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ (ppm): 124.73, 124.72, 164.63, 146.13, 127.82, 127.81, 129.22, 129.23, 114.12, 114.11, 127.82, 127.83, 113.83, 113.84, 147.72, 148.72, 149.06, 125.45, 125.44, 124.62, 124.44, 164.63, 129.25, 130.22, 130.42, 130.55.

C. Etude électrochimique du colorant synthétisé (TTA)

L'étude électrochimique du TTA a été réalisée en milieu acétonitrile MeCN désaéré contenant le tétrabutylammonium tétrafluoroborate Bu_4NBF_4 à 0.1M comme électrolyte support, sur une électrode de platine d'une surface égale à 0.02 cm^2 comme électrode de travail. L'électrode Ag/AgCl (0.29V vs. ENH) préparée par

polarisation d'un fil d'argent dans une solution d'acide chlorhydrique 0.1 M et placée dans un pont rempli de solution électrolytique, joue le rôle d'électrode de référence. Une grille en inox est utilisée comme électrode auxiliaire.

1) Comportement électrochimique du TTA :

La figure 4 correspond au cyclovoltamogramme enregistré avec une solution de 10^{-4} M du colorant entre -1.4 et 1.4 V par rapport à l'électrode de référence Ag/AgCl .

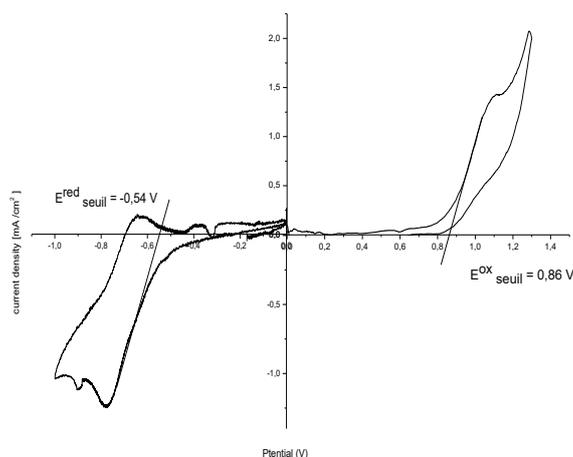


Fig. 4 Cyclovoltamogramme d'une solution à 10^{-4} M du TTA sur disque de Pt (0.02 cm^2) dans MeCN contenant 0.1M de Bu_4NBF_4 , $v = 50$ mV/s.

Deux paires de pics peuvent être identifiées comme étant l'oxydation à 1.10 V localisée sur l'entité triphénylamine est quasi-réversible et la réduction à (-0.68v) localisée sur la tétrazine est parfaitement réversible. La tétrazine est une molécule acceptrice pouvant être facilement réduite pour former un radical anion stable et tandis qu'elle directement liée à la triphénylamine, rendant difficile la formation de ce radical. Son potentiel de réduction particulièrement haut, est en effet corrélé à une orbitale π^* se référant au caractère donneur d'électrons de ses substituants. [18, 19].

En conclusion, ces composés présentent les caractéristiques électrochimiques propres à la triphénylamine et à la tétrazine. Ce sont des composés qui sont à la fois donneurs et accepteurs.

- *calcul du gap électrochimique:*

Les énergies des orbitales HOMO et LUMO pour ce colorant ont été calculés à partir du cyclovoltamogramme selon les formules :

$$E_{\text{gap}} = E_{\text{LUMO}} - E_{\text{HOMO}} \dots \dots \dots (1)$$

Avec:

$$E_{\text{HOMO}} = - [E_{\text{ox}} (\text{VECS}) + 4.4] \dots \dots \dots (2)$$

Et:
 $ELUMO = - [E_{red}(VECS) + 4.4] \dots\dots (3)$

$E_{ox}(VECS) = 0.86 + 0.27 = 1.13 \text{ eV}$

Alors:
 $EHOMO = - [1.13 + 4.4] = - 5.53 \text{ eV}$

$E_{red}(VECS) = - 0.54 + 0.27 = -0.27 \text{ eV}$

Alors:
 $ELUMO = -[-0.27 + 4.4] = - 4.1 \text{ eV}$
 $E_{gap}(TTA) = - 4.13 - (-5.53) = 1.4 \text{ eV}$

D'après ces résultats on trouve que les valeurs d' HOMO et LUMO sont proches de celle des valeurs idéales.

D. Analyse du TTA par UV-visible

Le spectres d'UV-visible a été enregistré à partir d'une solution de concentration $5 \times 10^{-4} \text{ M}$ dans le DMSO.

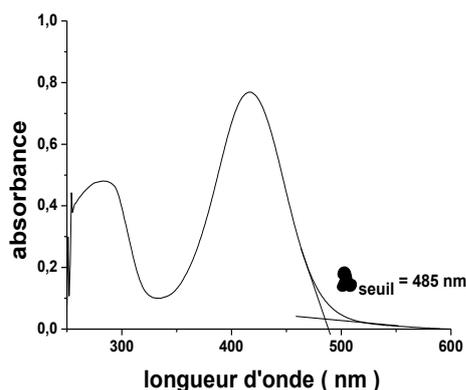


Fig. 5 Spectre UV-Vis du colorant TTA ($5 \cdot 10^{-4} \text{ M}$) dans DMSO.

Le spectre UV- Vis du colorant présente une bande dont le maximum est situé à 417 nm avec une absorbance de 0.769. Cette bande d'absorption centrée à environ 417 nm est due à une transition de type $\pi-\pi^*$ localisée sur le coeur tétrazine. Située dans l'ultra-violet ou le visible de haute énergie, sa position dépend des substituants et de leur électronégativité. Ce résultat répond au critère pour un composé être utilisé comme donneur des électrons dans les cellules photovoltaïques organiques, il doit absorber efficacement la lumière entre le 400-1000 nm [20].

• *Calcul du gap optique :*

Le calcul du gap optique se base sur la valeur de la longueur d'onde du seuil de la bande d'absorption du colorant selon la formule suivante:

$E_{gap} = hc / \lambda_{seuil} \dots\dots\dots (4)$

En remplaçons h et c par leur valeurs on trouve :

$E_{gap} = 1240 / \lambda_{seuil} \dots\dots\dots (5)$

$E_{gap}(TTA) = 1240 / 485 = 2.55 \text{ eV}$

	Eop.(eV)	Eélec.(eV)	Eth.(eV)
TTA	2.55	1.4	2.83

Finalement, les caractérisations structurales, spectroscopiques et électrochimiques effectuées nous ont menés à constater que ce colorant absorbe dans le spectre solaire, a des niveaux énergétiques en accord avec une cellule photovoltaïque efficace et sont susceptibles de transporter correctement les excitons et les trous. Il est donc été sélectionné pour être testés comme donneurs dans une cellule photovoltaïque.

E. Electro greffage du colorant sur une photo electrode de ZnO:

Pour fixer le colorant synthétisé (TTA) sur la surface semi-conductrice (ITO/ZnO) la méthode suivie a été l'électrogreffage cathodique, qui consiste sur le greffage de films fins du colorant à partir du groupement électroactif (aniline) dans une solution électrolytique contenant 0.5 M du HCl et NaNO_2 (4éq) [21] selon la figure 6.

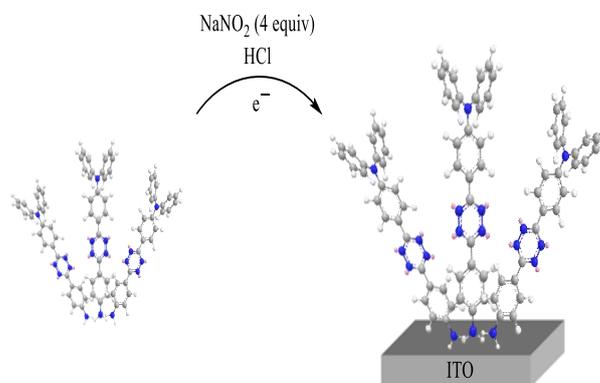


Fig 6 Représentation de la méthode de l'électrogreffage du colorant (TTA) sur une surface semi-conductrice.

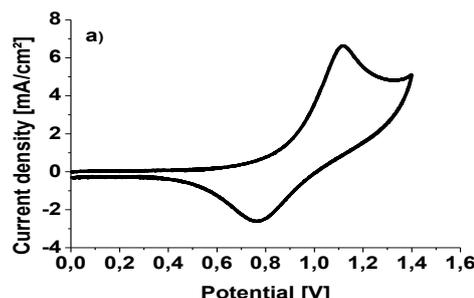


Fig.7a Cylovoltamogramme du colorant TTA sur la plaque ITO dans une solution aqueuse HCl 0.5M dans la présence du NaNO_2 (4 éq)

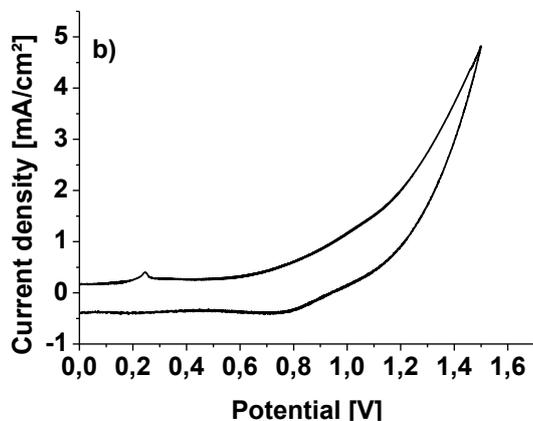


Fig 7b Cyclovoltammogramme du colorant TTA électrogréffé sur une photo électrode de ZnO dans une solution aqueuse HCl 0.5M dans la présence du NaNO₂ (4 éq)

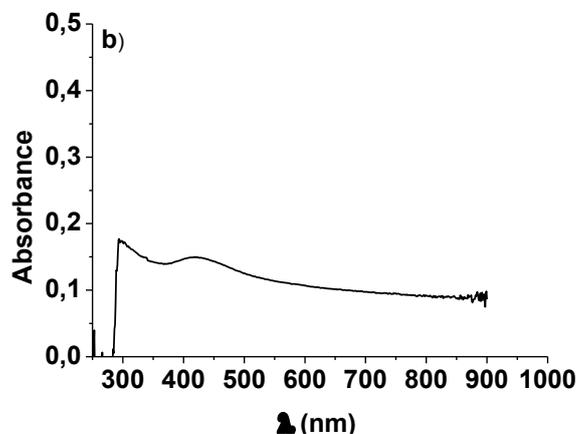


Fig 8b Spectre UV-Vis du colorant TTA électrogréffé sur la photo électrode de ZnO dans 0.5M d'une solution aqueuse HCl dans la présence du 4 éq. NaNO₂

L'enregistrement de l'électrogréffage du colorant (TTA) sur l'électrode ITO figure 7(a) montre que le film n'a pas réduit, ceci peut s'expliquer par l'augmentation de la conjugaison entre le donneur et l'accepteur de la molécule rend les films impossibles à réduire directement après le processus de l'électrogréffage en raison des protons générés, qui restent dans la structure du film et peuvent interagir avec l'anneau s-tétrazine.

Cependant, dans le cas de la présence de l'oxyde de zinc figure 7(b) le film se réduit directement après l'électrogréffage car les protons générés sont transférés vers le semi-conducteur. Ce qui indique un transfert de charge du colorant à base de tétrazine et la photo-électrode de ZnO.

Pour confirmer les résultats électrochimiques, une analyse spectroscopique a été réalisée pour les deux électrodes précédentes (figure 8a et b).

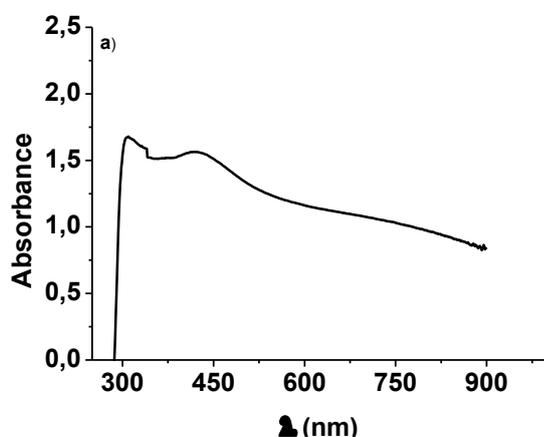


Fig 8a Spectre UV-Vis du colorant électrogréffé sur la plaque ITO dans 0.5M d'une solution aqueuse HCl dans la présence du 4 éq. NaNO₂

L'évolution des spectres UV-Vis des électrodes (ITO/TTA) et (ITO/ZnO/TTA) ont montré une diminution de l'absorbance dans la photoélectrode de ZnO ce qui montre la réduction directe du film déposé sur cet électrode.

D'après ces résultats on a constaté que l'électrogréffage de notre colorant (TTA) nécessite un transfert de charge de l'anion formé de la réduction cathodique de ce colorant vers le semi-conducteur ZnO.

IV. CONCLUSIONS

Le travail présenté dans cet article concerne l'étude spectroscopique et électrochimique d'un nouveau colorant organique synthétisé à base de tétrazine pour les cellules solaires à colorant à base de ZnO.

L'étude électrochimique et spectroscopique a confirmé que la tétrazine est un système aromatique pauvre en électrons qui peut être facilement réduit pour donner un radical anion stable. De plus, des interactions $\pi-\pi^*$ favorisent la formation d'architectures compactes et ordonnées qui sont susceptibles d'induire un transport efficace des charges.

D'ailleurs, une petite molécule à base de tétrazine a pu être déposée par électrogréffage pour former un conducteur qui présente une mobilité d'électrons et, une faible tension de seuil et qui est particulièrement stable lors du fonctionnement et vis-à-vis de l'atmosphère ambiante.

Les résultats obtenus nous ont encouragés pour passer à l'étape de construction de la cellule photovoltaïque et tester son efficacité au centre de Recherche en Technologie des semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) situé à Alger.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu financièrement par le ministère algérien des hautes écoles education et recherche scientifique et le laboratoire "LCMC" Chimie Macromoléculaire de Constantine. Les auteurs souhaitent également remercier les suggestions utiles et les éditeurs et les critiques.

REFERENCES

- [1] L. Bailly Thèse de doctorat, Université Bordeaux I **2010**.
- [2] A. Moliton *Electronique et optoélectronique organiques* **2011**.
- [3] S. Lizin, J. Leroy, C. Delvenne, M. Dijk, E. De Schepper, S. Van Passel *Renewable Energy* **2013**, 57, 5
- [4] B.O'regan, & M. Grätzel, A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films. *Nature*, (1991),353(6346), 737.
- [5] A. R. Murphy, J. M. J. Fréchet, *Chem. Rev.*, **2007**, 107, 1066-1096.
- [6] (a) Y. Shirota, T. Kobata, N. Noma, *Chem. Lett.*, **1989**, 1145 ; (b) A. Higuchi, H. Inada, T. Kobata, Y. Shirota, *Adv. Mater.*, **1991**, 3, 11, 549-550 ; (c) M. Thelakkat, H.-W. Schmidt, *Adv. Mater.*, **1998**, 10, 3, 219-223 ; (d) T. Noda, H. Ogawa, N. Noma, Y. Shirota, *Adv. Mater.*, **1997**, 9, 9, 720-722 ; (e) Y. Shirota, Y. Kuwabara, H. Inada, T. Wakimoto, H. Nakada, Y. Yonemoto, S. Kawami, K. Imai, *Appl. Phys. Lett.*, **1994**, 65, 7, 807-809.
- [7] a) Y. Shirota, *J. Mater. Chem.*, **2000**, 10, 1-25 ; (b) Y. Shirota, *J. Mater. Chem.*, **2005**, 15, 75-93 ; (c) Y. Shirota, H. Kageyama, *Chem. Rev.*, **2007**, 107, 953-1010.
- [8] J. Roncali, *Acc. Chem. Res.*, **2009**, 42, 11, 1719-1730.
- [9] N. S. Oxtoby, A. J. Blake, N. R. Champness, C. Wilson *CrystEngComm* **2003**, 5, 82.
- [10] Y. H. Gong, F. Miomandre, R. Méallet-Renault, S. Badré, L. Galmiche, J. Tang, P. Audebert, G. Clavier *Eur. J. Org. Chem.* **2009**, 6121.
- [11] S. Mathew, A. Yella, P. Gao, R. Humphry-Baker, BFE Curchod, N. Ashari-Astani, I. Tavernelli, U. Rothlisberger, Md. K. Nazeeruddin, M. Grätzel *Nature Chemistry* (2014). 6, 242-247
- [12] J. H. Wu, & G. S. Liou High-Performance Electrofluorochromic Devices Based on Electrochromism and Photoluminescence-Active Novel Poly (4-Cyanotriphenylamine). *Advanced Functional Materials* (2014). 24(41), 6422-6429.
- [13] Z. Limin et C. Xiaoyu. p-Dopable poly (4-cyano) triphenylamine: A high voltage organic cathode for lithium ion batteries. *Materials Letters*, 2015, vol. 150, p. 16-19.
- [14] W. Xu , B. Peng, J. Chen, M. Liang, & F. Cai. New triphenylamine-based dyes for dye-sensitized solar cells. *The Journal of Physical Chemistry C*(2008). 112(3), 874-880.
- [15] K. S. Sipahioglu, A. M . Yasin, D. Gozde, *et al.* Direct synthesis of tetrazine functionalities on polymer backbones. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2019, vol. 57, no 6, p. 673-680.
- [16] Y. H. Gong , F. Miomandre , R. Méallet-Renault , S. Badré , L. Galmiche , J. Tang,... & G. Clavier . Synthesis and Physical Chemistry of s-Tetrazines: Which Ones are Fluorescent and Why?. *European Journal of Organic Chemistry* (2009). 2009(35), 6121-6128.
- [17] N. S. Oxtoby, A. J. Blake, N. R. Champness , & C. Wilson The role of 1, 2, 4, 5-tetrazine rings in π - π stacking interactions. *CrystEngComm*(2003).5(17), 82-86.
- [18] D. K. Hwang, R. R. Dasari, M. Fenoll , V. Alain-Rizzo, A. Dindar, J. W. Shim,... & P. Audebert Stable Solution-Processed Molecular n-Channel Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials*(2012). 24(32), 4445-4450.
- [19] K. A. Caroline, H. S. Franz, H. Manuel, *et al.* Synthesis of a tetrazine–quaterthiophene copolymer and its optical, structural and photovoltaic properties. *Journal of materials science*, 2019, vol. 54, no 13, p. 10065-10076.
- [20] S. Pluczyk, P. Zassowski, C. Quinton, P. Audebert, V. Alain-Rizzo, & M. Lapkowski. The influence of the linker on electrochemical and spectroelectrochemical properties of donor-acceptor-donor triphenylamine-s-tetrazine derivatives. *Electrochimica Acta* (2016). 216, 160-170.
- [21] A. Mattiuzzi, I. Jabin, C. Mangeney, C. Roux, O. Renaud, , L. Santos & C. Lagrost. Electrografting of calix [4] arenediazonium salts to form versatile robust platforms for spatially controlled surface functionalization. *Nature communications* (2012). 3, 1130.

Etude, simulation d'un suiveur de soleil avec convertisseur intégré optimisé

HOUHOU Aimad abdel illah^{#1}, Abid Hamza^{*2}, Benabadji Noureddine^{#3}, Bensaad Zouaoui^{*4}

^{#1}Département électronique, Université Djilali Liabès Sidi-Bel-Abbès, ^{#2}Département électronique, Université Djilali Liabès Sidi-Bel-Abbès, ^{#3}Département physique Université de la science et de la technologie d'Oran -USTO-, ^{#4}Département électronique, Université Djilali Liabès Sidi-Bel-Abbès
Rue des Figuiers, BP 89, 22000 Sidi-Bel-Abbès, Algérie

1h_1mad2002@yahoo.fr

2abid_hamza@yahoo.fr

3benanour2000@yahoo.com

4z_bensaad@yahoo.fr

Résumé — Le mot clé pour le processus d'étude et simulation des systèmes de suiveurs photovoltaïques est l'efficacité énergétique en utilisant le système de poursuite solaire, le panneau photovoltaïque suit le soleil et augmente l'énergie rassemblée, mais les moteurs et les relais d'entraînement consomment une partie de cette énergie. En ces termes, l'optimisation du système de traqueur est devenue une nécessité importante dans la recherche et la technologie modernes.

En ce travail, nous évaluons une stratégie pour l'optimisation dynamique des systèmes de suiveur photovoltaïques. La tâche principale dans l'optimisation est de maximiser le gain énergétique en augmentant le rayonnement solaire incident et en réduisant au minimum la consommation d'énergie pour l'orientation. Cette stratégie est possible en développant un prototype du système de suiveur, qui est une boucle de contrôle composé par le modèle mécanique lie au modèle électrique.

Mots-clés — Energie solaire, générateur photovoltaïque, suiveur solaire, microcontrôleur 18F458, optimisation de l'énergie photovoltaïque.

I. INTRODUCTION

La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire. Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Dans ce dernier cas, l'étude, l'optimisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de 50 % de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur PV de l'ordre de 50 % ; en plus le

générateur PV ne fonctionne plus dans les conditions optimums.

II. MODELISATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE[1]

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{SAT} \left[\frac{\exp\left(\frac{V_{CELL} + I_{CELL}R_S}{nV_T}\right) - 1}{R_p} \right] - \frac{V_{CELL} + I_{CELL}R_S}{R_p}$$

Avec : $V_T = KT/e$

Ou I_{SAT} est le courant de saturation, V_T , le potentiel thermodynamique, K , la constante de Boltzmann, T , la température effective de la cellule en Kelvin, e , la charge de l'électron, n , le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL} est le courant fourni par la cellule, V_{CELL} la tension a ses bornes, I_{CC} le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et la température, R_p , la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction et R_s la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

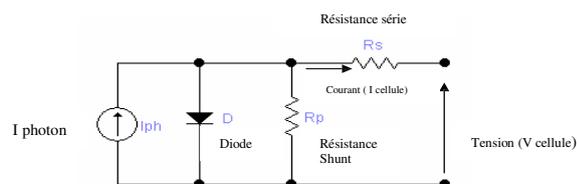


Fig. 1 Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.

III. LE GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ET SES PERFORMANCES

Un Générateur Photovoltaïque Ou Module Est Constitué D'un Ensemble Des Cellules Photovoltaïques Élémentaires Montés En Série Et/Ou Parallèle Afin D'obtenir Des Caractéristiques Electriques Désirés Tels Que La puissance, le courant de court-circuit (I_{CC}) ou la tension en circuit ouvert (V_0).

A. CARACTERISTIQUES COURANT TENSION

La Figure ci-dessous montre la caractéristique courant tension $I=f(V)$ d'un panneau photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et température.

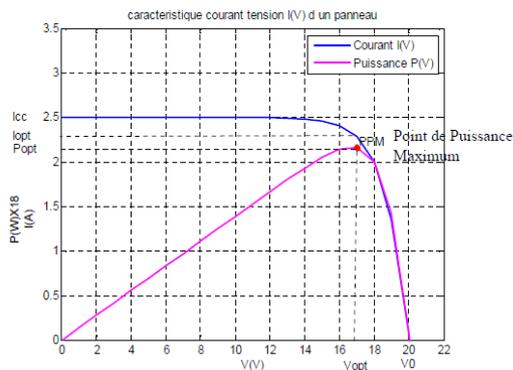


Fig. 2 Courbe $I = f(V)$ d'un panneau photovoltaïque

B. L'INFLUENCE DE L'ÉCLAIREMENT

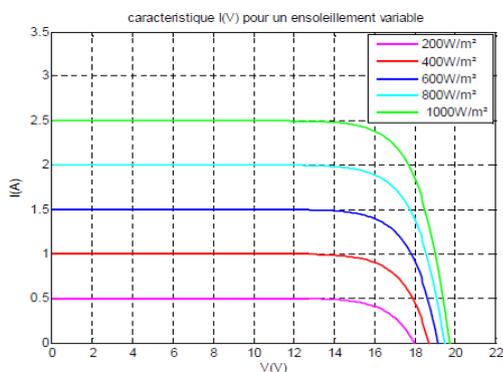


Fig. 3 Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairagements

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement [2]. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairage.

L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000W/m^2 et une température de 25°C .

C. L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

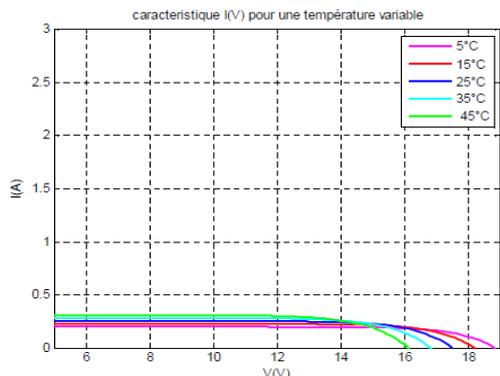


Fig. 4 L'influence de la température sur la caractéristique électrique

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit par contre la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par

conséquent la puissance extractible diminue [2]. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de température du site sera impérativement à prendre en compte.

Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0.5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25°C .

IV. FONCTIONNEMENT D'UN GENERATEUR PV A SA PUISSANCE MAXIMALE

A. PRINCIPE

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile.

En effet coté source, pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairage, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Chaque charge, que ce soit en continue (DC) (batteries, certain appareil électroménagers destinés à des réseaux continus isolés) a son comportement propre.

Ainsi, pour qu'une connexion source charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister.

Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge. Nous regardons l'influence de la nature de la charge qu'elle soit une charge résistive R ou bien même une batterie, comme illustré dans la fig.4 ou les points PPM1 et PPM2 correspondent au fonctionnement optimal du générateur PV.

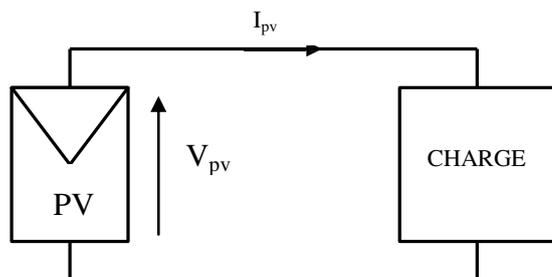


Fig.4 connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge.

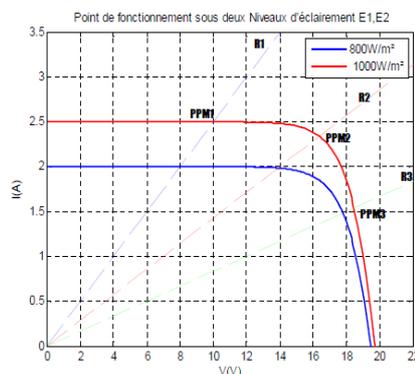


Fig. 5 Point de fonctionnement résultant de l'association du générateur PV sous deux Niveaux d'éclairage (E1, E2)

Comme nous pouvons le constater sur la fig.5 le fonctionnement du générateur PV dépend fortement de la charge qu'elle est associée.

En effet, pour la charge résistive de différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé point de puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe I(V) donnée. Pour la charge de type batterie, le point de connexion source-charge n'est pas optimal. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe source charge, le rendement de l'ensemble est alors rarement optimal.

V. TRAJECTOIRES DU SOLEIL

Sur la fig.6, les trajectoires et en même temps les hauteurs du Soleil sont tracées pour tous les pays qui sont à la même latitude.

Plus on monte vers le Nord, plus le Soleil à son lever, s'écarte de l'Est à l'époque des solstices. L'angle que fait un point de l'horizon avec la direction du Sud, s'appelle l'azimut. L'équateur céleste est pratiquement la ligne que trace pour nous le Soleil dans le ciel, aux premiers jours du printemps et de l'automne (appelés jours d'équinoxes). L'observateur est ici face au Soleil couchant. Le parcours du Soleil est le plus long au solstice d'été. Au solstice d'hiver, en revanche, le parcours du Soleil est le plus court [3].

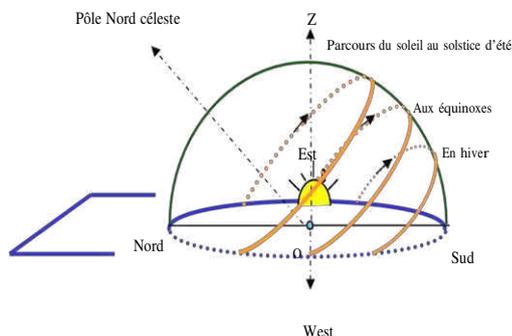


Fig.6 Trajectoire du soleil

A Midi l'heure où le Soleil culmine (Zénith) ; il a atteint le point le plus haut de sa course quotidienne ; on dit qu'il est " midi au Soleil". A Oran et là où la latitude est de 35.69° , la hauteur de l'équateur céleste au-dessus de l'horizon est de 54.31° . Nous voyons que c'est la hauteur du Soleil à midi aux premiers jours du printemps et de l'automne, et que cette hauteur atteint 77.76° ($54.31+23.45$) au premier jour de l'été, tandis qu'elle descend à 30.86° ($54.31-23.45$) au premier jour de l'hiver.

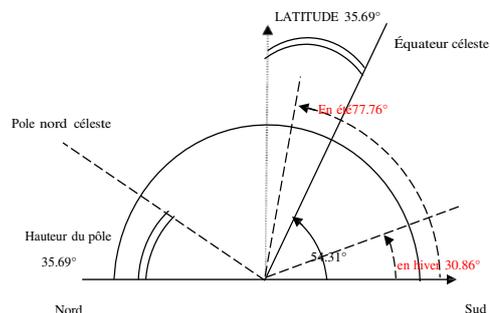


Fig.6.1 Hauteur du soleil à Oran

On dit que la déclinaison du Soleil est égale à zéro lorsque la trajectoire du Soleil suit l'équateur céleste. Cette déclinaison atteint $+23.45^\circ$ au début de l'été, et -23.45° au début de l'hiver. C'est l'écart que fait le Soleil avec l'équateur céleste à l'époque des solstices.

VI VARIATIONS DE LA HAUTEUR MAXIMUM DU SOLEIL SUIVANT LES SAISONS

Il est utile d'étudier les variations de la hauteur maximum du soleil sur un graphique. Cette hauteur varie en fonction de notre position sur la terre. Les variations de hauteur du Soleil à midi sont lentes ou rapides suivant les saisons.

Aux premiers jours de l'été comme aux premiers jours de l'hiver, la hauteur du Soleil reste à peu près la même pendant 3 semaines ; l'angle ne varie guère que de 1° (c'est bien là le sens de solstice). Dans les premiers jours du printemps ou de l'automne, la hauteur du Soleil varie très vite au contraire, d'un jour à l'autre (de plus de 1° en 3 jours) [3].

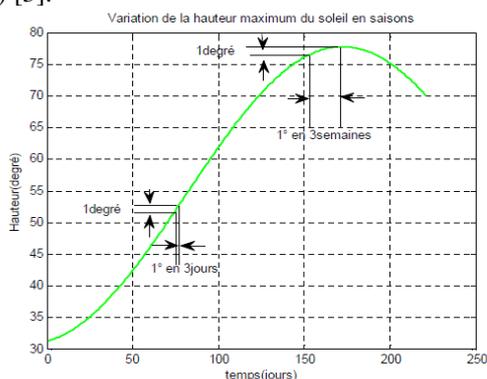


Fig. 7 Courbe de variations de la hauteur maximum du Soleil

VII MONTAGE ELECTRONIQUE

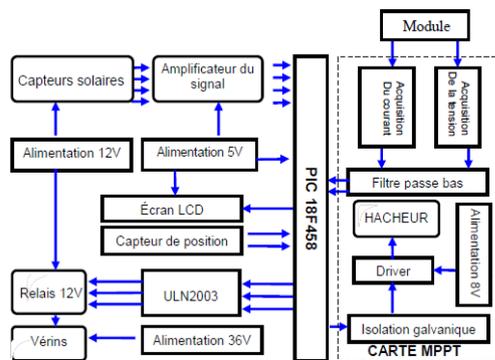


Fig.8 Schéma synoptique de la carte de commande

Il se fait autour d'un microcontrôleur 16F458, nous avons opté ce type de PIC vu ces propriétés diverses ceci reçoit des données de détecteurs photodiodes via un amplificateur du signal et selon un programme approprié peut actionner les deux moteurs par intermédiaire d'un étage de puissance, donc le principe consiste à comparer deux signal reçus sur les photodétecteurs.

Nous avons optimisé notre système par l'introduction d'une carte MPPT afin de maximiser plus en plus l'énergie fournie par le générateur GPV et d'ajuster le point de fonctionnement à sa valeur optimale.

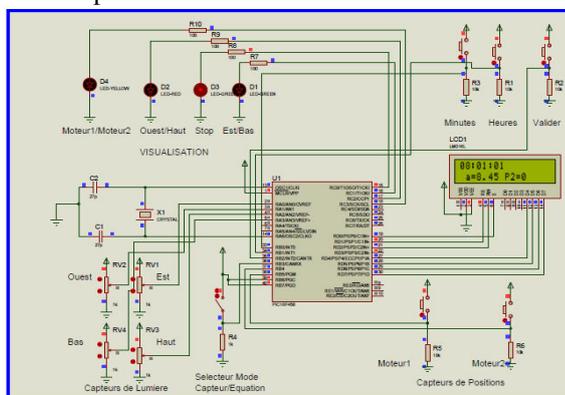


Fig. 9 Simulation sous PROTEUS

L'élément de base du montage est le microcontrôleur 18F458 de la famille des PICs Mid- Range et architecture RISC (35 instructions de durée 1ou 2 cycles) avec une consommation moins de 2mA sous 5V et 4MHZ. Celui-ci reçoit des signales à comparer via le circuit LM324 qui comporte quatre amplificateurs opérationnels

Totalement indépendantes.

VIII OPTIMISATION DU SYSTEME AVEC UNE COMMANDE MPPT

A. Description de la carte MPPT

Avant que le PIC se mette à convertir la tension, elle passe d'abord par le circuit de prélèvement et puis le circuit de la protection. Après la conversion le PIC traite ces données et les transforme en signale Modulation par largeur d'impulsion qui commande le hacheur dévolteur.

B. Prélèvement de la tension

Le prélèvement de la tension se fait à l'aide d'un montage composé de deux étages : Diviseur de tension et un filtre passe bas, le diviseur de tension se constitué de deux Résistances. Son rôle est d'atténuer la tension de $V_{oc} = 21V$ à une tension de 5V, c'est la tension d'entrée maximale que le pic supporte.

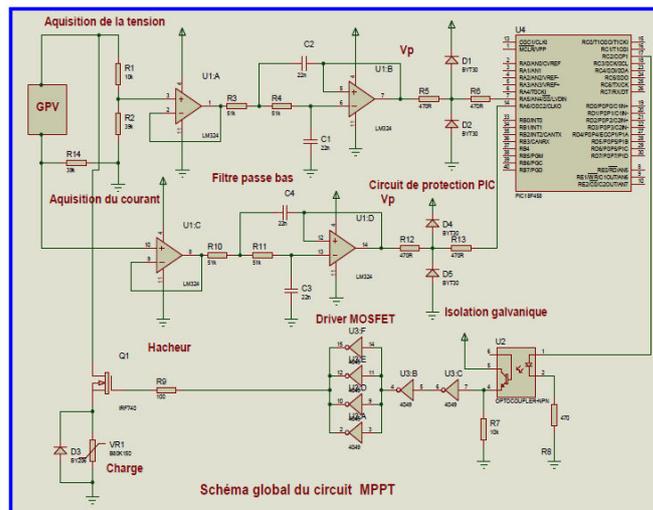


Fig. 10 Schémas global du circuit MPPT

Le filtre utilise est un filtre passe bas de deuxième ordre qui sert à empêcher la fréquence inférieure a 142Hz a introduire dans le PIC.

VIII CONCLUSION

le traqueur doit avoir des caractéristiques principales pour que le rendement de la production soit élevé, cependant des valeurs peut être ajoutés et optimisent le système, plusieurs critères peuvent surgir et affectent la qualité et le rendement du système dans leurs structures mécaniques, électrique et le programme de la commande. la stratégie adoptée pour suivre le soleil ; le nombre de panneaux pourrait apporter ; optimisation par un l'algorithme de recherche du point de fonctionnement optimal MPPT ou non; Le but primordial de ce projet est la mise en œuvre d'une solution technique qui permettra de motoriser un panneau solaire photovoltaïque afin de capter le maximum de lumière et d'améliorer son rendement. Ce projet répond à nos attentes en l'offrent l'opportunité d'appliquer les acquis théoriques et pratiques concrets soulevés par le marché de travail. Nous avons l'occasion de comprendre le principe de fonctionnement du PIC 16F84A, le principe de fonctionnement de la carte de commande.

REFERENCES

- [1] M. Angel Cid Pastor 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques', septembre 2007
- [2] Aain Bilbao Learreta 'Réalisation de commandes MPPT Numériques'. Septembre 2006.
- [3] Arnaud Fiocret 'Le tourneseul'. 2003

Diagnostic d'un Convertisseur AC/DC dans un Système Hybride PV_ Eolienne

K. Ifrah^{#1}, O. Bendjeghaba ^{#2}, S. Ben Achour ^{#3}, f. Bourourou

[#] Département d'Automatisation des Procédés et Electrification, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, LREEI
 55 avenue de l'indépendance, 35000, Boumerdes, Algérie

¹k.ifrah@univ-boumerdes.dz

² bendjeghaba@univ-boumerdes.dz

³ so.benachour@univ-boumerdes.dz

Résumé — Le présent travail est consacré au diagnostic d'un convertisseur AC/DC dans un système hybride photovoltaïque_ éolienne. La description détaillée du système proposé, la modélisation mathématique détaillée ainsi que les techniques de détection et de localisation des défauts (par la valeur moyenne des courants) y sont présentées. Une simulation sous Matlab/Simulink est effectuée afin d'analyser le comportement du convertisseur dans un système éolienne. Les résultats sont présentés, analysés puis discutés.

Mots clés— Hybride, Eolienne, PV, Diagnostic, Redresseur AC/DC.

I. INTRODUCTION

La plupart des régions dans les pays émergents sont éloignées et isolées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Sachant que l'extension de ces réseaux vers ces régions coûtent des sommes faramineuses, l'utilisation d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables (Fig.1), s'avère une solution idoine à ce problème, basé sur les convertisseurs AC/DC ou DC/AC afin d'assurer un couplage robuste entre ces sources.

Le comportement du convertisseur dans un système éolienne ou hybride nécessite la connaissance globale des informations nécessaires pour le diagnostic (mesures, historique sur l'état précédent de fonctionnement du système...). Cette méthode est simple et efficace pour le diagnostic des défauts dans les systèmes de production hybride (éolienne_ solaire) [5].

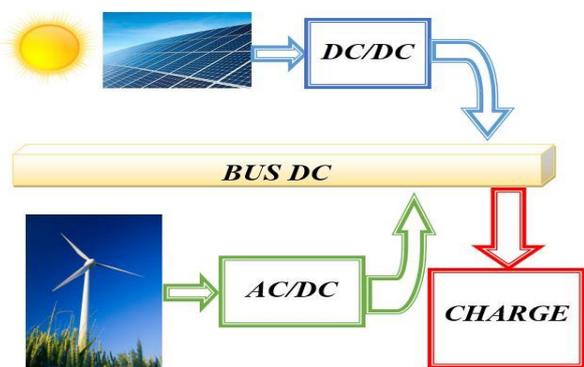


Fig. 1 Structure générale du système hybride proposé.

Parmi les nombreuses structures hybrides PV-Eolienne qui existent, notre structure est basée sur le raccordement entre les deux sources d'énergies PV et Eolienne via un jeu de barres continues DC Bus (Fig.1).

II. DESCRIPTION DE LA METHODE PROPOSEE

Pour développer cette méthode de détection et de localisation des deux types de défauts (court-circuit & circuit-ouvert) [5] dans les redresseurs on se basera sur : la mesure des courants des trois phases dans la partie puissance, le calcul de la valeur moyenne des trois courants, le calcul de la valeur moyenne absolue des trois courants, la détermination des indicateurs de défauts, la détermination du type de défaut, la localisation du défaut, la signalisation et enfin la décision (Fig.2).

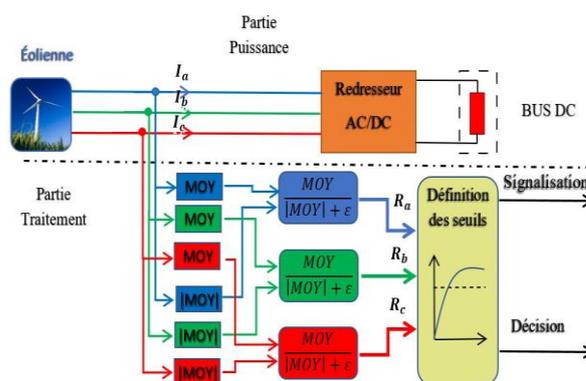


Fig. 2 Schéma bloc de la méthode proposée (partie éolienne).

La structure du convertisseur AC/DC utilisé est un convertisseur commandé PD3 à thyristors représenté par la Fig.3.

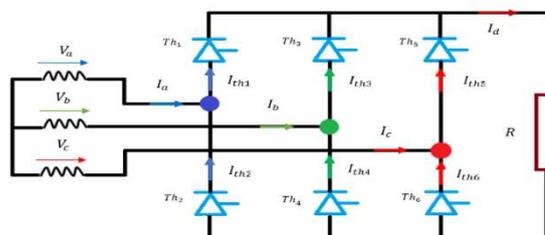


Fig. 3 Redresseur commandé PD3 à Thyristors.

Le redresseur convertit les tensions d'entrées du convertisseur qui sont délivrées par la machine du système éolienne (Eq. 1) :

$$\begin{cases} v_a = u_{dM} \sin(\omega t) \\ v_b = u_{dM} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_c = u_{dM} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

L'intensité instantanée des courants dans les fils (a, b et c) est la différence de l'intensité du haut et du bas d'un pont redresseur (Fig. 3). En appliquant la loi des nœuds, on obtient (Eq. 2) :

$$\begin{cases} I_a(t) = I_{th1}(t) - I_{th2}(t) \\ I_b(t) = I_{th3}(t) - I_{th4}(t) \\ I_c(t) = I_{th5}(t) - I_{th6}(t) \end{cases} \quad (2)$$

Les courants d'entrée I_{abc} du convertisseur sont donnés par (Eq. 3) :

$$\begin{cases} I_a(\theta) = ((i_{ab}(\theta)|_{\frac{\pi}{2}+\alpha} + (-i_{ca}(\theta)|_{\frac{5\pi}{2}+\alpha})) \\ \quad - (i_{ab}(\theta)|_{\frac{3\pi}{2}+\alpha} + (-i_{ca}(\theta)|_{\frac{11\pi}{2}+\alpha})) \\ I_b(\theta) = ((i_{bc}(\theta)|_{\frac{\pi}{6}+\alpha} + (-i_{ab}(\theta)|_{\frac{7\pi}{6}+\alpha})) \\ \quad - (i_{bc}(\theta)|_{\frac{13\pi}{6}+\alpha} + (-i_{ab}(\theta)|_{\frac{5\pi}{6}+\alpha})) \\ I_c(\theta) = ((i_{ca}(\theta)|_{\frac{11\pi}{2}+\alpha} + (-i_{bc}(\theta)|_{\frac{\pi}{2}+\alpha})) \\ \quad - (i_{ca}(\theta)|_{\frac{5\pi}{2}+\alpha} + (-i_{bc}(\theta)|_{\frac{7\pi}{2}+\alpha})) \end{cases} \quad (3)$$

Les valeurs moyennes des courants I_{abc0} sont données par (Eq. 4) :

$$\begin{cases} I_{a0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_a(\theta) . d\theta \\ I_{b0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_b(\theta) . d\theta \\ I_{c0} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_c(\theta) . d\theta \end{cases} \quad (4)$$

La sortie du convertisseur AC/DC est raccordé au jeu de barres DC qui assure l'hybridation avec un système solaire.

III. MODELISATION ET ANALYSE

La modélisation de chaque partie de notre système est effectuée sur la base d'hypothèses simplificatrices selon les données disponibles.

A. Modélisation de PV

La modélisation des cellules solaires est indispensable pour l'étude du générateur photovoltaïque [1]. La puissance délivrée par le système PV est représentée par (Eq. 5) :

$$P_{PV} = I_{PV} . V_{PV} \\ = \left(I_{sct} - N_p I_{0s} \left(e^{\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{N_s V_T} - 1} \right) - \frac{V_{PV}}{R_p} - \frac{R_s I_{PV}}{R_p} \right) . V_{PV} \quad (5)$$

Qui décrit le comportement énergétique de la partie PV du système hybride étudié.

Afin d'assurer le couplage du système hybride, plusieurs techniques de commande ont été utilisées pour assurer la continuité et la qualité d'énergie produite par la partie PV.

B. Modélisation de l'Eolienne

Le système éolienne proposé est basé sur une machine synchrone à aimant permanent (MSAP) entraînée par une turbine soumise à l'énergie du vent [4],[8]. Cette énergie est modélisée par (Eq. 6) :

$$v_v = 9 + 0.2 \sin(0.10477t) + 2 \sin(0.2665t) \\ + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (6)$$

Où Eq. 7 et Eq. 8 décrivent les caractéristiques de la turbine.

$$C_p = C_c . \lambda \quad (7)$$

$$C_c = a_0 + a_1 \lambda + a_2 \lambda^2 + a_3 \lambda^3 + a_4 \lambda^4 + a_5 \lambda^5 + a_6 \lambda^6 \quad (8)$$

Les tensions extraites délivrées par la machine du modèle de la MSAP dans les référentiels dq [3] sont données par (Eq. 9) et (Eq. 10) :

$$v_d = R_s i_d + L \frac{d}{dt} i_d + w_r L_q i_q \quad (9)$$

$$v_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + w_r (L_d i_d + \Phi_f) \quad (10)$$

Ces modèles nous permettront d'analyser les différents paramètres et les grandeurs électriques et mécaniques du système hybride par l'un des logiciels de simulation.

C. Détermination des indicateurs de défauts

Pour détecter et localiser les types des défauts dans notre système [6],[7] nous avons développé des indicateurs significatifs (Eq. 11) :

$$\begin{cases} R_a = \frac{\langle I_a \rangle}{\langle |I_a| \rangle + \varepsilon} \\ R_b = \frac{\langle I_b \rangle}{\langle |I_b| \rangle + \varepsilon} \\ R_c = \frac{\langle I_c \rangle}{\langle |I_c| \rangle + \varepsilon} \end{cases} \quad (11)$$

Où :

- $\langle I_{abc} \rangle$: Valeurs moyennes des courants.
- $\langle |I_{abc}| \rangle$: Valeurs moyennes absolues des courants.
- ε : Coefficient de très petite valeur utile pour éviter la division par zéro.

IV. SIMULATION ET RESULTATS

A l'aide du logiciel Matlab nous avons effectué des simulations en nous basant sur les modèles prédéfinis (Fig. 4).

Notre analyse est orientée vers le convertisseur AC/DC et le comportement des courants moyens suite à des défauts de court-circuit et de circuit ouvert, pour chaque bras du convertisseur.

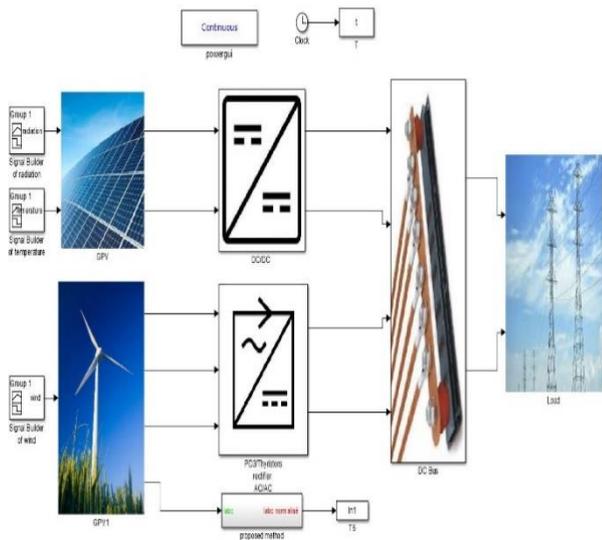


Fig. 4 Schéma bloc du système proposé sous Matlab/Simulink.

La Fig. 5 décrit la méthode proposée pour le traitement des courants d'entrée sous Matlab/Simulink.

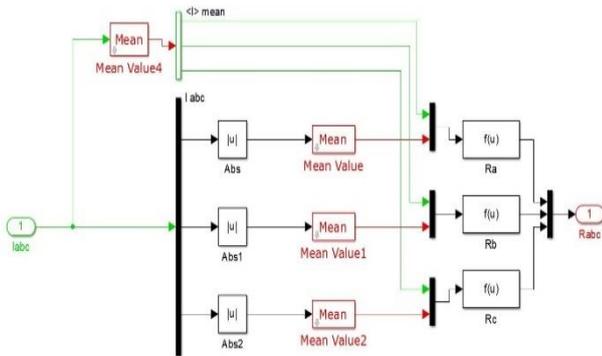


Fig. 5 Schéma bloc de la méthode proposée sous Matlab/Simulink.

A. Allures des courants moyens suite aux défauts (CC/CO)

Le défaut a été provoqué à $t = 0.1$ seconde, ce dernier nous permet de voir les allures des courants moyens I_{abc} et I_{abc0} qui sont représentées dans le cas :

- Défauts circuit ouvert (CO). Fig. 7
- Défauts court-circuit (CC). Fig. 8

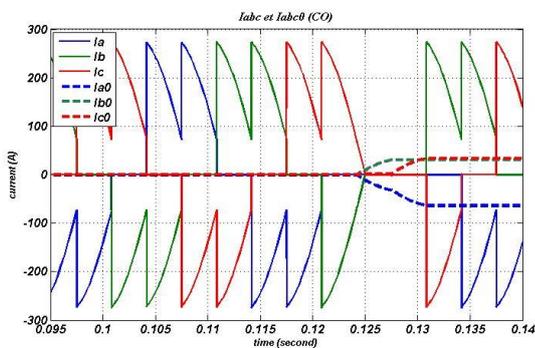


Fig. 7 Allures des courants I_{abc} et I_{abc0} défaut (CO).

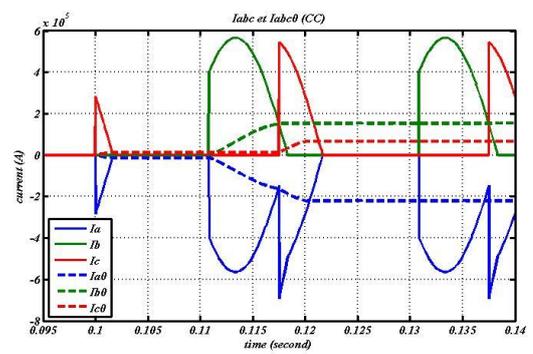


Fig. 8 Allures des courants I_{abc} et I_{abc0} défaut (CC).

On remarque très bien que la valeur I_{abc0} moyenne des courants est nulle avant la provocation du défaut est qu'elle varie après.

B. Allures des indicateurs suite aux défauts (CC/CO)

Les figures suivantes Fig. (9-12) représentent les formes des indicateurs pour des défauts (CC/CO) dans le Bras A, parties (haute et basse) de notre convertisseur.

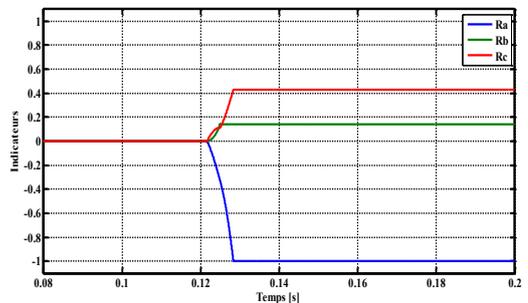


Fig. 9 Allures des indicateurs défaut (CO) bras A \haut.

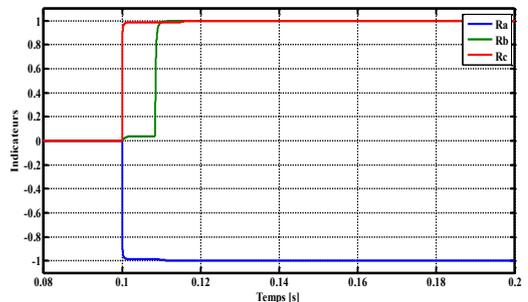


Fig. 10 Allure des indicateurs défaut (CC) bras A \haut.

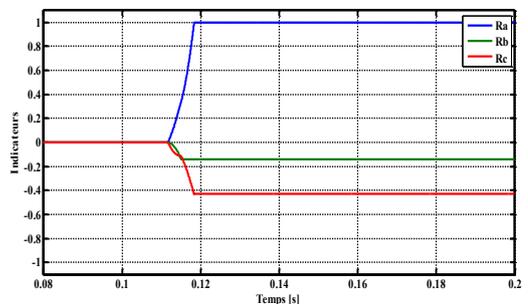


Fig. 11 Allures des indicateurs défaut (CO) bras A \bas

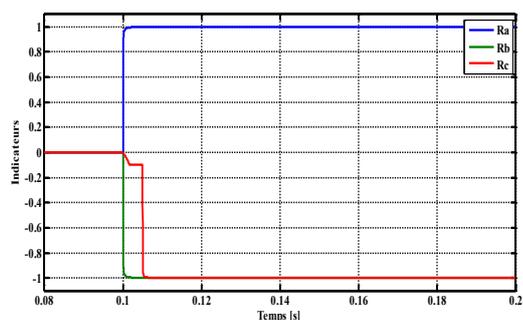


Fig. 12 Allures des indicateurs défaut (CC) bras A \bas.

C. Interprétation de l'évolutions des indicateurs

Selon les résultats obtenus par simulation numérique, nous relevons les points suivants :

- Les trois indicateurs R_a , R_b et R_c varient dans un intervalle de valeurs $[-1, +1]$.
- Chaque indicateur reflète l'image d'un bras du redresseur : R_a : bras A, R_b : bras B et R_c : bras C.
- Les valeurs des indicateurs R_a , R_b et R_c sont nulles quand il n'y a pas de défaut ($R_a = R_b = R_c = 0$) et sont différentes de zéro quand il y'a un défaut.
- Si : $|R_a| = |R_b| = |R_c| = 1$, il y'a un défaut de court-circuit, sinon le défaut est de circuit ouvert.
- La localisation du défaut est basée sur le sens des valeurs des indicateurs (positive ou négative).
- Pour localiser le bras en défaut il suffit de connaître la valeur de l'indicateur qui est de sens contraire que celles des deux autres.
- Pour connaître la position haute ou basse du composant en défaut, il suffit de connaître le sens de l'indicateur en question.

D. Résultats

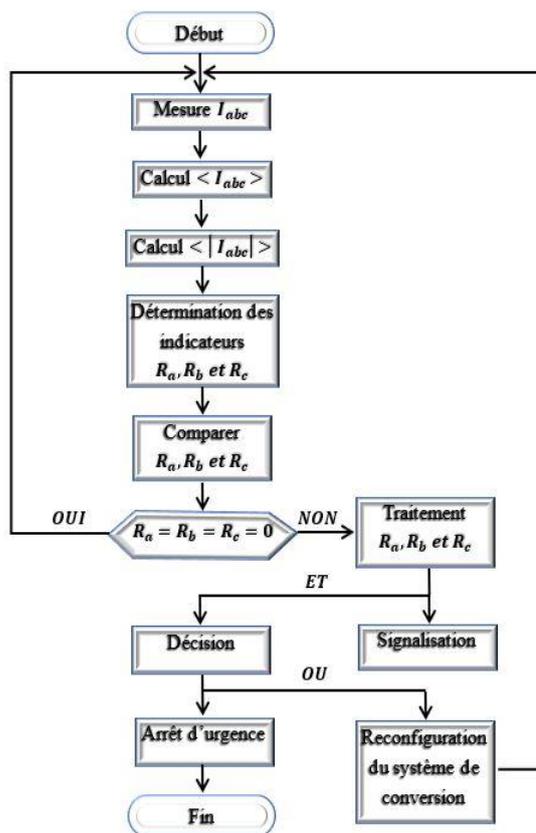
Le tableau ci-dessous nous résume l'état des indicateurs dans tous les cas de défauts (CC/CO) dans notre redresseur

TABLE I
SIGNATURES DES DÉFAUTS C-C & C-O DANS LE REDRESSEUR

Bras	Position	Défauts (CC)			Défauts (CO)		
		R_a	R_b	R_c	R_a	R_b	R_c
(A)	Haute	-1	+1	+1	-1	[0,1]	[0,1]
	Basse	+1	-1	-1	+1	[-1,0]	[-1,0]
(B)	Haute	+1	-1	+1	[0,1]	-1	[0,1]
	Basse	-1	+1	-1	[-1,0]	+1	[-1,0]
(C)	Haute	+1	+1	-1	[0,1]	[0,1]	-1
	Basse	-1	-1	+1	[-1,0]	[-1,0]	+1

E. Organigramme descriptif

L'organigramme ci-dessous nous permet de mieux comprendre les étapes de fonctionnement.[10]



Nous avons vu précédemment que s'il y'a un défaut, la valeur des indicateurs n'est pas nulle, dans ce cas nous allons entrer dans une phase de traitement de ces indicateurs [11-16]. Une signalisation est transmise pour que l'exploitant constate la nature du défaut et sa localisation ; ainsi il pourra prendre une décision qui sera traitée selon l'ampleur du dégât causé par le défaut. Nous pouvons aussi programmer notre système à prendre une décision qui sera liée à l'impact des dégâts causés dans notre système et qui décidera soit à :

- Un arrêt d'urgence : qui nécessite l'isolation totale de l'éolienne
- Une reconfiguration du système.

V. CONCLUSION

Nous avons développé une méthode de diagnostic en exploitant les valeurs moyennes des courants. À cet effet, nous avons créé des indicateurs pour nous faciliter la détection des défauts et leur localisation dans les systèmes d'excitation. En simulant chaque défaut, nous avons interprété l'évolution des indicateurs, qui nous a permis d'établir un organigramme simplifié qui traite ces derniers.

Il serait intéressant que ce travail pourrait être suivi par d'autres travaux portant sur le développement des décisions pouvant être prises par le biais d'un algorithme d'optimisation en utilisant les métaheuristiques.

ACKNOWLEDGMENT

Par cette modeste contribution, nous présentons nos sincères reconnaissances à M^{me} Nadji Bouchra, directrice du Laboratoire de Recherches en Electrification des Entreprises Industrielles (LREEI) ainsi qu'à notre directeur de thèse M^r Omar Bendjehaba.

REFERENCES

- [1] Bouzid Mohamed Amine « Commande Prédicative d'un Site Isolé Eolien Photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [2] P. Bajpai and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 2926–2939, Jun. 2012.
- [3] A. Chauhan and R. P. Saini, "A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for standalone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 38, pp. 99–120, Oct. 2014.
- [4] Y. Soufi et T. Bahi et M. F. Harkat et M. Mohamedi, "Optimisation De La Conversion De L'énergie Eolienne," *Revue des Sciences Fondamentales et Appliquées*, vol. 2, pp. 201–210, April 2010.
- [5] A. Aibeche, « Analyse et Diagnostic de Puissance Appliqués dans la Commande Sans Capteur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP), » Thèse de Doctorat Sciences, Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2016.
- [6] Sobanski, P., & Orłowska-Kowalska, T. "IGBT open-circuit fault diagnosis based on the current prediction in the line-side AC/DC converter". *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, 113–118. 2017.
- [7] Nayeripour, M., Mansuri, M. M., & Ghanbarian, M. M. (2013). "Protection scheme for full wave controlled three phase rectifier base on multi fault detection algorithms". *PEDSTC 2013 - 4th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 436–441.
- [8] A. Mirecki, "Etude Comparative de Chaîne de Conversion d'énergie Dédiées à une Eolienne de petite puissance", Thèse de Doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [9] Kamel, T., Biletskiy, Y., & Chang, L. (2016). "Real-Time Diagnosis for Open-Circuited and Unbalance Faults in Electronic Converters Connected to Residential Wind Systems". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(3), 1781–1792.
- [10] F. Wu and J. Zhao, "Current Similarity Analysis-Based Open-Circuit Fault Diagnosis for Two-Level Three-Phase PWM Rectifier," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 5, pp. 3935–3945, May 2017.
- [11] W. S. Im, J. S. Kim, J. M. Kim, D. C. Lee, and K. B. Lee, "Diagnosis methods for IGBT open switch fault applied to 3-phase AC/DC PWM converter," in *Journal of Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 120–127, Jan. 2012.
- [12] N. Freire, J. O. Estima and A. J. Marques Cardoso, "Open-Circuit Fault Diagnosis in PMSG Drives for Wind Turbine Applications," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3957–3967, Sept. 2013.
- [13] W. Im, J. Kim, D. Lee, K. Lee, "Diagnosis and Fault-Tolerant Control of Three-Phase AC–DC PWM Converter Systems," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 4, pp. 1539–1547, July–Aug. 2013.
- [14] I. Jlassi, J. O. Estima, S. Khojet El Khil, N. Mrabet Bellaaj and A. J. Marques Cardoso, "Multiple Open-Circuit Faults Diagnosis in Back-to-Back Converters of PMSG Drives for Wind Turbine Systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 5, pp. 2689–2702, May 2015.
- [15] K. Rothenhagen and F. W. Fuchs, "Performance of diagnosis methods for IGBT open circuit faults in voltage source active rectifiers," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, pp. 4348–4354, Vol. 6, 2004.
- [16] D. G. Holmes and T. A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters—Principle and Practice*, IEEE Press/Wiley-Interscience, New York, 2003.

FILTRAGE DYNAMIQUE DES HARMONIQUES BASE SUR MSRB Contrôlée Par Régulateur PI

F. BOUROUROU^{#1}, S.A. TADJER^{#2}, I. HABI^{#3}, S. Ben Achour^{#4}

[#] Département d'Automatisation des Procédés et Electrification, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes
55 avenue de l'indépendance, 35000, Boumerdes, LREEI, Algérie

¹f.bourourou@univ-boumerdes.dz

²s.tadjer@univ-boumerdes.dz

³i.habi@univ-boumerdes.dz

Abstract-- Le présent travail est consacré à la minimisation des harmoniques de tension dans un réseau électrique. Une nouvelle génération de filtres actifs basée sur la MSRB est présentée comme filtre dynamique ainsi que les modèles de la machine avec et sans amortisseur en tenant compte des harmoniques de tension dans le référentiel abc et dqo. Des simulations de la machine sur les différentes conditions de charge (charge linéaire, et non linéaire, dans les deux cas constante et variable) sont effectuées grâce au logiciel de simulation PSIM. Une solution constituée principalement d'une machine synchrone à excitation contrôlée (filtre dynamique) dont le rôle est d'imposer un courant d'excitation capable de produire dans le bobinage statorique une f.e.m (fondamental plus des harmoniques) capable de minimiser les harmoniques présentes dans le réseau et d'assurer la régulation par rapport à la tension de source pour offrir une alimentation stable et propre.

Index Terms— APF, Harmonic, MSRP, Modélisation.

1. INTRODUCTION

Les producteurs d'énergie électrique font de grands efforts afin de fournir aux clients une énergie de qualité dont laquelle l'onde électrique à une forme de tension sinusoïdale avec des amplitudes et de fréquence préétablies, d'une manière permanente, malgré certaines circonstances qui empêchent d'assurer cet objectif. Ceci est due, principalement, à la présence significative des équipements polluants de divers types et surtout les charges non linéaires basées sur les équipements d'électronique de puissance. Cependant, cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique est appelé à fonctionner dans un environnement, de plus en plus, agressif. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Nous discuterons, également, les solutions envisagées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques. Les systèmes de filtrage, en particulier le filtrage actif et dynamique, basés sur la machine

synchrone à rotor bobiné

On distingue en 1995 dans [4], une structure de compensation des harmoniques basée sur une machine à double alimentation. D'autres structures basées sur des machines spéciales sont présentées dans [5] comme la machine AACWSM (asymmetric air gap centred winding) où la machine IDEA (Integrated doubly fed electric alternator active filter).

Une autre possibilité est le placement d'un bobinage supplémentaire sur l'axe q d'un générateur synchrone, s'il s'agissait de l'amélioration de la stabilité du générateur (notamment lorsqu'il est connecté à un pont redresseur). Ce bobinage devrait être court-circuité, mais comme il est utilisé pour la minimisation des harmoniques, cet enroulement additionnel est normalement alimenté par une source alternative à une fréquence 6 fois supérieure à celle du fondamentale. Cette structure basée sur la machine synchrone à aimant permanent double stator été proposée dans [6]. Cette structure, qui semble possible, surtout dans le cas des MSAP, est le générateur à double étoile, un des 2 bobinages (bobinage principal) fonctionne en générateur principal, tandis que la 2^{ème} étoile est connectée à un convertisseur statique permettant le contrôle des grandeurs électriques de cette étoile. A l'aide d'une commande adéquate des courants et des tensions du 2^{ème} stator, ce dernier pourra jouer le rôle, par effet mutuel, d'un filtre pour les harmoniques existants dans le premier bobinage. Contrairement aux structures nécessitant un bobinage rotorique, l'effet de la deuxième étoile sur le premier est réparti sur les 2 axes de la machine. En plus, les contraintes liées au bobinage rotorique additionnel (contacts glissant, difficultés de réalisation de ce bobinage) sont éliminées. Cette structure constitue la solution dans le cas d'utilisation d'une machine synchrone à aimant permanent à double stator comme filtre actif.

2. SYSTEMES DE FILTRAGES PROPOSE

Un système de filtrage est l'ensemble des composants et des techniques utilisés pour fournir un système capable d'absorber, d'injecter, ou de court-circuiter des

harmoniques existant dans un circuit ou dans un réseau électrique.

Un système de filtrage a pour objet l'amélioration de la qualité de l'énergie fournie par une source ou absorbée par une charge par l'amélioration du facteur de puissance « l'élimination des harmoniques perturbateurs ».

le principe de compensation est simple; il consiste à superposer à la source de perturbation une autre source d'énergie capable d'absorber ou de compenser les composantes non souhaitées. Ces systèmes sont, généralement, des compensateurs d'harmoniques et/ou d'énergie réactive placés, selon la nature de la perturbation à éliminer, en dérivation ou en série avec le réseau ou avec la charge à protéger. Ces compensateurs sont, généralement, des filtres d'harmoniques qui peuvent être passifs, actifs ou encore hybrides.

Une des solutions permettant la réduction de la pollution harmonique dans un réseau, est la mise en place d'un générateur à excitation commandée de telle sorte que le champ inducteur sera responsable de la création, non seulement d'une composante fondamentale de la f.e.m principale de la machine, mais aussi d'une force électromotrice harmonique dont le rôle est de neutraliser, autant que possible, les harmoniques perturbatrices provenant soit, d'une charge non linéaire (harmonique du temps), soit de la machine elle-même (harmonique de construction).

La structure la plus intéressante dans notre cas est l'utilisation de la machine synchrone à rotor bobiné comme filtre dynamique. On propose de faire une simple variation sur le circuit d'excitation de la machine pour qu'il puisse produire dans le bobinage statorique, non seulement, la composante fondamentale de la f.e.m induite mais, de faire générer aussi des f.e.m de fréquences et d'amplitudes contrôlables constituant des composantes harmoniques en inverse de phase avec celles existantes dans le réseau, créées par les charges non linéaires, pour les compenser.

Parmi ces structures proposées dans la littérature en site quelques exemples illustrés dans les références où on trouve dans [1-3] une structure d'un filtre actif d'harmonique basée sur la machine synchrone selon le principe présenté dans la fig. 1

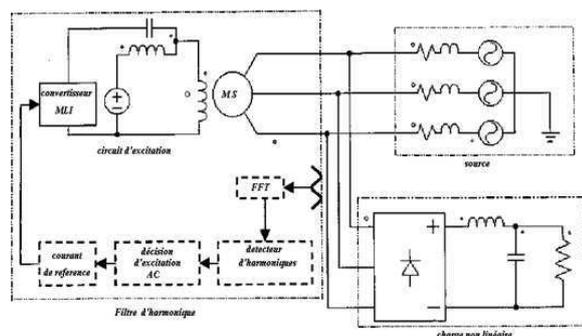


Fig.1. filtre actif électromécanique des harmoniques

Une autre structure basée sur la machine synchrone à rotor bobiné a été proposé dans les références [8], et [9].

3. DESCRIPTION DE LA METHODE PROPOSEE

La figure. 2 présente un bloc diagramme d'une structure de compensation basée sur la machine synchrone à rotor bobiné. Cette structure permet d'exploiter la machine pour générer des harmoniques contrôlables en phase et en amplitude. Ceci permet à l'aide du bloc de détecteur d'harmoniques avec le bloc de décision de compensation des harmoniques d'imposer dans le circuit d'excitation de la machine un courant d'excitation capable de générer dans les enroulements statoriques de la machine des signaux capables de compenser les harmoniques de tension existant dans le réseau.

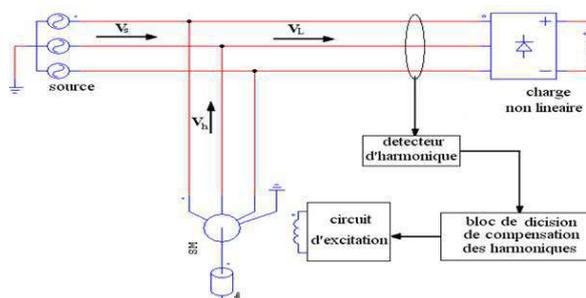


Fig. 2. Bloc Simulation du système proposé.

Cette structure est similaire à celle utilisée dans le filtrage actif basé sur l'onduleur de courant ou de tension, seul la nouvelle structure se base sur la MSRB pour générer les signaux de compensation qui doivent être contrôlables en fréquence, en amplitude, et en phase pour avoir avec la présence d'un système de commande adéquat des résultats au moins semblables à celles, obtenir par la structure onduleur d'un FAP.

4. MODELISATION DE LA MSRB AVEC HARMONIQUES

La modélisation des machines est la description mathématique de ces machines dans leur fonctionnement de la conversion électromagnétique d'énergie par des modèles mathématiques (ensembles des équations différentielles et algébriques). L'utilisateur aura recours aux équations de Maxwell afin d'analyser le comportement de la machine électrique. Sur l'aspect commande, Un modèle basé sur les équations de circuit est en général suffisant pour faire la synthèse de la commande. La simplicité de la formulation algébrique conduit à des temps de simulations courts. En outre, la précision de la modélisation est acceptable.

Les équations du flux sont données par le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \psi_0 \\ \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & M_f & M_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & M_Q \\ 0 & 1.5M_f & 0 & L_f & M_R & 0 \\ 0 & 1.5M_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & 1.5M_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1)$$

Où le flux d'excitation est exprimé par la relation :

$$\psi_f = 1.5M_f i_d + L_f i_f + M_R i_D \quad (2)$$

La fréquence ψ_f est la même que celle du courant i_d sans présence de source alternative dans le circuit d'excitation. Par l'utilisation de la transformée de Park, les courants de la machine synchrone seront exprimés dans le repère dq0 par (3).

$$\begin{pmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (3)$$

Où:

$$\begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{A0} \\ i_{B0} \\ i_{C0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} i_{Ah} \\ i_{Bh} \\ i_{Ch} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Avec:

$$\begin{pmatrix} i_{A0} \\ i_{B0} \\ i_{C0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{A0} \cos(\omega_0 t) \\ I_{B0} \cos(\omega_0 t - 120^\circ) \\ I_{C0} \cos(\omega_0 t + 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} i_{Ah} \\ i_{Bh} \\ i_{Ch} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{Ah} \cos(\omega_h t) \\ I_{Bh} \cos(\omega_h t - 120^\circ) \\ I_{Ch} \cos(\omega_h t + 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (6)$$

Se qui donne les courants i_0 , i_d , i_q

$$\begin{pmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ I_M \\ 0 \end{pmatrix} + I_h \begin{pmatrix} 0 \\ \cos(\omega_{h-1} t) \\ \cos(\omega_{h-1} t + 90^\circ) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} i_{Ah} \\ i_{Bh} \\ i_{Ch} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_{Ah} \cos(\omega_h t) \\ I_{Bh} \cos(\omega_h t + 120^\circ) \\ I_{Ch} \cos(\omega_h t - 120^\circ) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Les axes dq0 peuvent être caractérisés par (9). Par conséquent, les deux (7) et (8), indiquent que les fréquences angulaires des courants harmoniques dans le repère dq sont $h-1$ ou $h+1$.

$$\begin{pmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ I_M \\ 0 \end{pmatrix} + I_h \begin{pmatrix} 0 \\ \cos(\omega_{h+1} t) \\ \cos(\omega_{h+1} t - 90^\circ) \end{pmatrix} \quad (9)$$

D'où les équations du modèle sont :

$$V_{dh} = R_s i_{dh} + \frac{d}{dt} \psi_{dh} - \omega_R \psi_{qh} \quad (10)$$

$$V'_{fdh} = R'_{fd} i'_{fdh} + \frac{d}{dt} \psi'_{fdh} \quad (11)$$

$$V_{qh} = R_s i_{qh} + \frac{d}{dt} \psi_{qh} - \omega_R \psi_{dh}$$

$$V'_{fqh} = R'_{fq} i'_{fqh} + \frac{d}{dt} \psi'_{fqh} \quad (12)$$

$$\psi_{qh} = (L_l + L_{mq}) i_{qh} + L_{mq} i'_{kqh} \quad (13)$$

$$\psi'_{fqh} = (L'_{lfd} + L_{md}) i'_{fdh} + L_{md} (i_d + i'_{kdh}) \quad (14)$$

$$\psi_{dh} = (L_l + L_{md}) i_{dh} + L_{md} (i'_{fdh} + i'_{kdh}) \quad (15)$$

$$\psi'_{fqh} = (L'_{lfq} + L_{mq}) i'_{fqh} + L_{mq} (i_{qh} + i'_{kqh}) \quad (16)$$

Ce modèle est orienté vers l'utilisation de la machine comme filtre actif pour la compensation des harmoniques, notamment, d'ordres 5 et 7 en se basant sur la configuration présentée par fig.2.

5. SIMULATION

On a Effectué plusieurs tests sur la machine synchrone sous différents types de sources d'excitation pour voir l'adaptabilité de la machine au filtrage actif.

Le premier test est de faire exciter la machine par une source continue. Ceci est le cas habituel, et de remarquer si on peut générer dans le bobinage statorique de la machine des composantes harmoniques contrôlables en amplitude, en phase, et en fréquence. L'utilisation de la machine comme un filtre actif nécessite que la machine soit capable d'injecter ou d'absorber des harmoniques présentes sur le réseau à compenser.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'une source continue pour exciter la machine synchrone ne peut produire qu'une onde fondamentale de fréquence dépendant directement de la vitesse d'entraînement de la machine et sa constitution interne.

Le deuxième teste est d'exciter la machine par une source alternative monophasée de fréquence et d'amplitude contrôlables. Ceci montre que lors d'un entraînement

constant de la machine, on peut avoir, selon la fréquence de la source d'excitation avec l'onde fondamentale, la présence des harmoniques d'ordres bien défini. L'ordre de ces harmoniques dépend de la fréquence de courant d'excitation et de la vitesse d'entraînement de la machine et de sa constitution (le nombre de paires de pôles de la machine). Leurs amplitudes dépendent de celle de la source d'excitation.

L'excitation par courant harmonique de fréquence 200 [Hz], la fondamentale est 50 [Hz], donne un f.e.m contient les 2 harmoniques d'ordres 3 et 5.

Mais lors de l'excitation de la machine par courant harmonique de fréquence 100[Hz], On remarque la présence de l'harmonique d'ordre 3.

Ainsi lors de l'excitation par courant harmonique de fréquence 300[Hz], la tension obtenue au stator dans ce cas, contient des harmoniques d'ordres 5 et 7 illustrées dans le spectre d'harmoniques de cette tension

Donc concernant l'ordre des harmoniques c'est exactement comme nous l'avons déjà vu dans la partie modélisation, l'excitation de la machine synchrone par un courant alternatif de fréquence d'ordre harmonique 2 par rapport à la fréquence fondamentale de la f.e.m générée par la machine engendre dans le bobinage statorique la présence de composants harmoniques d'ordre 1, qui est la fondamentale, et l'harmonique d'ordre 3. L'excitation de la machine synchrone par un courant alternatif de fréquence d'ordre harmonique 3 par rapport à la fréquence fondamentale de la f.e.m générée par la machine engendre dans le bobinage statorique la présence de composants harmoniques d'ordres 2 et 4.

L'excitation de la machine synchrone par un courant alternatif de fréquence d'ordre harmonique 4 par rapport à la fréquence fondamentale de la f.e.m générée par la machine engendre dans le bobinage statorique la présence de composantes harmoniques d'ordres 3 et 5. L'excitation par la 6^{em} harmonique donne les harmoniques d'ordres 5 et 7 et ainsi de suite.

Le teste de la machine avec une excitation composée d'une source continue qui nous donne l'onde fondamentale de la f.e.m de la machine et une autre alternative contrôlable permet d'ajouter à l'onde fondamentale de la sortie délivrée par la MSRB des signaux harmoniques. Ces harmoniques contrôlables vont être utilisés pour compenser les harmoniques du réseau dues à la présence de la charge non linéaire.

La figure.3 représente un bloc de simulation d'une structure de compensation des harmoniques de tension basée sur une MSRB

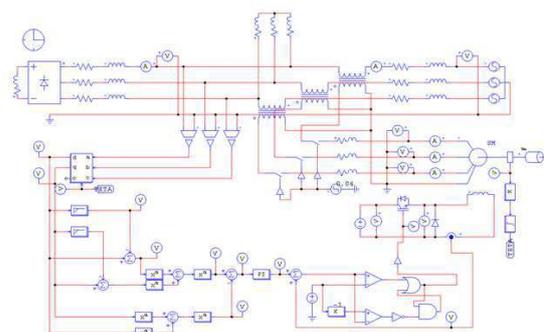


Fig. 3. Bloc Simulation du filtre actif basé sur MSRB.

Les résultats obtenus montrent, brièvement, l'efficacité de la machine synchrone en filtrage des harmoniques malgré qu'elle fonctionne dans un régime déséquilibré et perturbé « harmonisé ». Ceci influe sur les caractéristiques de la machine.

La figure.4 montre que la tension de charge avant de connecter la machine synchrone au réseau est déformée, déphasée et à une valeur faible par rapport à la tension de source du réseau qui représente la référence ou la tension désirée.

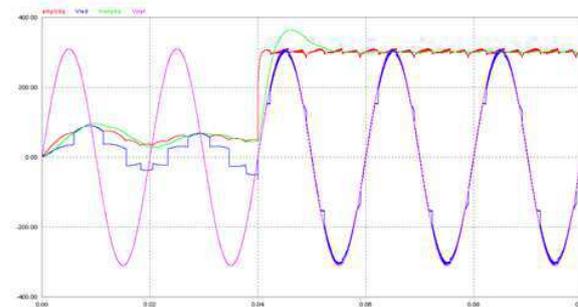


Fig. 4. Tensions de source avant et après filtrage par MSRB.

Mais, après la connexion du filtre « la MSRB » la tension de charge a été réglée en amplitude et devient égale à celle de la tension de source. Sa forme devient aussi plus proche de celle de la source, c'est-à-dire proche de la sinusoïde. Ceci implique que la machine a filtré la tension de charge des harmoniques de tension contenue.

On remarque dans la figure.4 que la tension de charge était filtrée et devient presque sinusoïdale ainsi que sa valeur était réglée à celle de la tension de la source du réseau.

Lorsqu'on injecte, dans le circuit d'excitation d'une machine synchrone à rotor bobiné, des harmoniques d'ordre n , on aura dans le bobinage statorique des harmoniques d'ordre $n+1$ et $n-1$ contrôlables en amplitude, en fréquence et en phase. Ce qui permet d'exploiter la machine pour le filtrage des harmoniques présentes dans le réseau qui est alimenté par la machine elle-même (lorsqu'elle est utilisée comme une centrale de

base) ou lorsqu'elle est connectée avec une autre centrale (utilisée comme centrale intermédiaire ou de pointe).

6. CONCLUSION

Une nouvelle structure a été présentée, à savoir, le filtre dynamique et notamment le filtrage dynamique par la machine synchrone à rotor bobiné. on a présenté une structure de compensation permettant à la machine synchrone de générer des harmoniques de tension contrôlables en fréquence, en amplitude et en phase. Elle nous a permis d'exploiter la machine pour le filtrage des harmoniques de tension. Les résultats des travaux de simulation effectués et présentés, montrent brièvement la possibilité de contrôle des paramètres (fréquence, amplitude et phase) de ses harmoniques générées via un circuit d'excitation basé sur un hacheur série contrôlé par un régulateur. Ceci permet de compenser les harmoniques de tension de charge et d'assurer sa régulation par rapport à la tension de source. Ceci permet d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et la minimisation de la présence des perturbations harmoniques dans les réseaux domestiques et d'offrir une alimentation stable et propre.

Finalement, nous espérons que les travaux dans cet axe de recherche se poursuivent pour mettre sur terrain ces expériences et exploiter ces techniques pour l'amélioration de la qualité de l'énergie avec une étude économique permettant d'avoir une réduction du prix unitaire de l'énergie électrique, la plus propre énergie disponible entre les mains des hommes, améliorant le rendement des centrales de production et aidant efficacement à l'amélioration de la vie des êtres humains. Ceci d'une côté et d'un autre côté d'ouvrir une autre porte dans la maîtrise de contrôle des perturbations dans les réseaux électriques d'une manière nous nous permettent d'intégrer le plus grand nombre possible des sources basées sur des énergies renouvelables comme les sources éoliennes et solaires sans affecter la qualité de l'énergie distribuée au client.

REFERENCES

- [1] Mehdi T. Abolhassani, Hamid A. Toliyat, Prasad Enjeti "AN ELECTROMECHANICAL ACTIVE HARMONIC FILTER", 2001 IEEE.
- [2] Fuyuto Takase, Masatoshi Tominaga, Yoshisuke Ueda, &all, "Harmonic Compensation Using A Synchronous Machine With Resonant Field Circuits", IEEE 1996.
- [3] Mehdi Towliat Abolhassani, "Integrated Electric Alternators/Active Filters", Thèse Ph.D, Mais 2004.
- [4] P. Poure, S. Saadate, B. Davat, " Filtrage dynamique d'harmoniques d'un réseau électrique à l'aide d'une machine à double alimentation commandée par le rotor", journal de physique, pages 2087-2099, décembre 1995.
- [5] Khechiba kamel, , Zellouma Laid, Kouzou abdallah, Hafaifa Ahmed, Khiter Anissa, "Comparison of Control Strategies for Shunt

Active Power Filters in Three-Phase Three-Wire Systems", The 3rd International Conference on Power Electronics and their Applications ICPEA 2017, 16-17 September 2017, Djelfa, Algeria

- [6] BELHAOUCHET NOURI, "Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie", Thèse Doctorat en sciences, Electrotechnique, Université FERHAT ABBAS – SETIF, 2011.
- [7] P.m. Hart, w.j.bonwick," Harmonique modeling of synchronous machines" IEEE 1988
- [8] wilsun w. Xu, hermann w. Dome1, jose r. Marti, "A synchronous machine model for three-phase harmonic analysis and emtp initialization", IEEE 1991.
- [9] Synchronous machine modeling for low-frequency harmonic studies [vikas singhvi, s. Mark halpin, ieeec 2007]
- [10] H.faida et J.Saadi et M.Khaider et S.El Alami et M.Monkadel, "Etude et analyse des données du vent en vue de dimensionner un système de production d'énergie éolienne cas d'un site au nord du maroc," Revu des Energies Renouvelables, vol. 13, pp.477-483, 2010.
- [11] M.T. Benchouia, I. Ghabane, A. Golea, K. Srairi, M.E.H. Benbouzid, "Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter", Applied Soft Computing, 28, pp. 125-131,2015.
- [12] Math Works, 2001, What is SIMULINK, the Math Works, Inc. M.
- [13] Michel Etique, "Régulation automatique", Yverdon-les-bains, octobre 2004.
- [14] Jhc Pretorius Jd Van Wyk Ph Swart,"Evaluation Of The Effectiveness Of Passive And Dynamic Filters For Non Active Power In A Large Industrial Plant", 1998 IEEE.

Impact de l'intégration de l'énergie photovoltaïque au réseau (Aspect Qualité de l'énergie électrique)

Asma REBAI¹, Saliha BOULAHCHICHE², Salim HADDAD^{*3}

^{1,2}Laboratoire LGMM -université 20 aout 1955 Skikda
Skikda21000, Algérie

¹a.rebai@univ-skikda.dz

^{3*}s.haddad@univ-skikda.dz

² Centre de Développement des Energies Renouvelables BP. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, 16340, Algérie

² boulahchiche21@live.com

Abstract— Les gestionnaires de distribution de l'énergie électrique sont continuellement sous pression pour l'extension de leurs réseaux afin de faire face à la croissance de la charge et d'approvisionner correctement leurs consommateurs. Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de fournir un climat acceptable pour entrer des ressources solaires et des pratiques d'exploitation novatrices. Ce travail se concentre sur une étude de l'impact de l'insertion de l'énergie photovoltaïque au réseau basse tension de distribution. Dont nous avons montrée l'impact des conditions météorologiques sur la puissance injectée au réseau, l'impact d'utilisation d'un onduleur monophasé sans transformateur avec un régime de neutre TT, l'écoulement de la puissance active et réactive bidirectionnelle au PCC, et l'Impact des charges intégrés sur la qualité de l'énergie au PCC. Cette étude est effectuée par une modélisation et stimulation sur l'environnement de Matlab Simulink. Avec une confirmation par des résultats expérimentaux du premier système connecté au réseau en Algérie du CDER site de BOUZEREA Alger.

Keywords— Système photovoltaïque, qualité de l'énergie, PCC, réseau BT, harmonique.

I. INTRODUCTION

La consommation mondiale de l'énergie électrique ne cesse d'augmenter eu égard à la croissance de la démographie et au développement de la technologie. Jusqu'ici, l'énergie électrique produite dans le monde est en grande partie à base de sources fossiles (gaz, fioul, charbon, pétrole, uranium...). Cependant, la combustion de ces matières émet des gaz à effet de serre et pollue fortement l'environnement ; ce qui ne répond pas aux exigences du développement durable. Aussi, l'utilisation excessive de ces matières premières conduit-elle à la réduction des réserves disponibles et compromet par conséquent, la chance des générations futures.

Aujourd'hui, les technologies 'Energies Renouvelables'(EnRs) sont considérées non seulement comme un moyen d'assurer la sécurité énergétique et la lutte contre les changements climatiques. Mais, aussi comme un investissement qui peut garantir des avantages économiques directs et indirects par la réduction de l'importation

énergétique, la qualité de l'air et la sûreté, l'accès à l'énergie, le développement économique et la création d'emploi.

La baisse des coûts de production des modules photovoltaïques (PV) a également joué un rôle important dans le déploiement des EnRs au cours des dernières années. Plusieurs technologies d'énergies renouvelables sont aujourd'hui compétitives avec les technologies conventionnelles de production, sans prendre en considération l'environnement et d'autres aspects.

Parmi les énergies renouvelables considérées, l'énergie solaire est une source abondante d'énergie renouvelable, ce qui entraîne de faibles coûts d'entretien. Ainsi, les modules solaires sont considérés comme une composante importante du bâtiment des futurs réseaux électriques

Dans ce travail, nous aborderons l'un de ces types d'énergies à savoir l'énergie solaire photovoltaïque, définie comme étant la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein des matériaux semi-conducteurs comme le silicium.

Ainsi, la production PV peut être autonome ou injectée au réseau électrique. Ce présent travail traite un système PV connecté au réseau. Etant donné que la production PV est intermittente, l'injecter dans un réseau dont la production est stable nécessite une étude approfondie.

II. MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTEE AU RESEAU

A. MODÈLE PROPOSÉ

Le système PV proposé contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation », l'onduleur de tension (DC-AC) commandé par MLI, un filtre RLC, une charge non linéaire et le réseau électrique BT (figure.1)

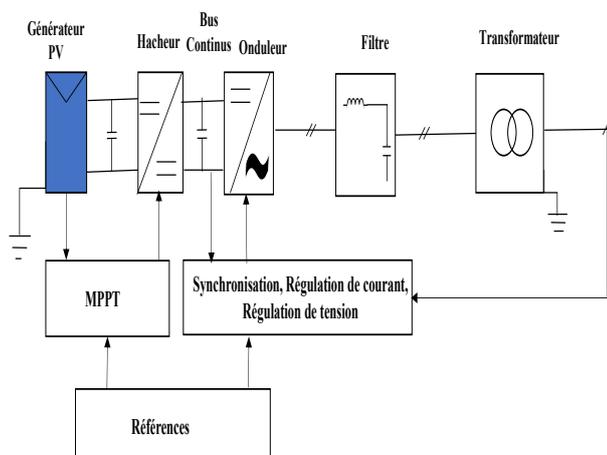


Fig. 1 : Modèle du système photovoltaïque proposé

Dans notre exemple, le générateur photovoltaïque est constitué d'une chaîne de 14 modules Trina Solaire TSM-250 connectés en série. À des conditions variables de rayonnement solaire et de température, la chaîne peut produire 3500W.

Deux petits condensateurs, connectés aux bornes + et - du générateur photovoltaïque, permettent de modéliser la capacité parasite entre les modules PV et la terre.

TABLE I
 CARACTERISTIQUE TECHNIQUE DU GENERATEUR

Symbole	Paramètres	Valeur	Unité
N	Nombre de cellule	47	
V	La tension nominale	31	V
P_{max}	La puissance max	249,86	Wp
$I_{sc.ref}$	Le courant de court-circuit	8,55	A
$V_{oc.ref}$	Tension du circuit ouvert	21,6	V
$I_{mpp.ref}$	Courant MPP	8,06	A
$V_{mpp.ref}$	La tension MPP	31	V

III. RESULTATS ET INTERPRETATION

A. Impact des conditions météorologiques

Nous avons effectué la simulation du système PV connecté au réseau en variant l'éclairement et la température. Nous avons mesuré à l'entrée et à la sortie de l'onduleur (PCC) les paramètres suivants : Le courant, la tension et la puissance.

B. Profil de l'éclairement

La figure 2 illustre le profil de l'éclairement. Nous avons varié l'éclairement dans l'intervalle 0,5 à 1 seconde de 1000w/m² jusqu'à 150w/m² et garder la température fixe à 25°C pour voir l'effet de l'éclairement sur le courant, la tension, et la puissance du GPV.

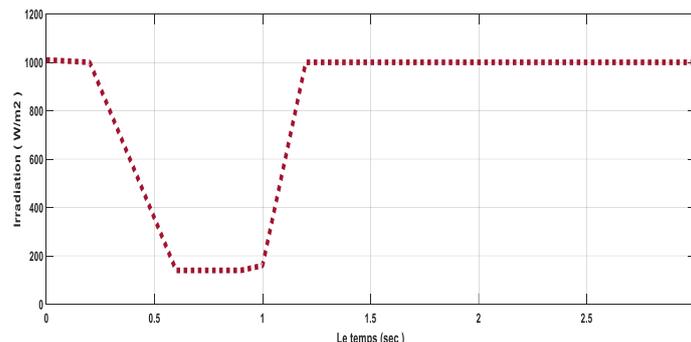


Fig. 2 : Profil d'éclairement par rapport au temps

C. Profil de la température

La figure 3 illustre le profil de la température. Nous avons varié la température dans l'intervalle 1,4 à 2,7 seconde de 25°C jusqu'à 60°C et garder l'éclairement fixe à 1000W/m² pour voir l'effet de la température sur le courant, la tension, et la puissance du GPV.

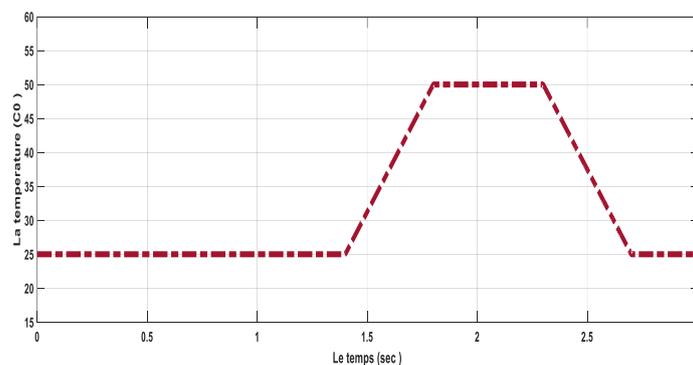


Fig. 3 : Profil de la température par rapport au temps

D. Impact de l'éclairement et la température sur le niveau de tension continu

La figure 4 montre l'impact de l'éclairement et de la température sur le niveau de tension à l'entrée de l'onduleur, nous avons remarqué que la température joue un rôle très important par rapport à l'éclairement sur la diminution de la tension.

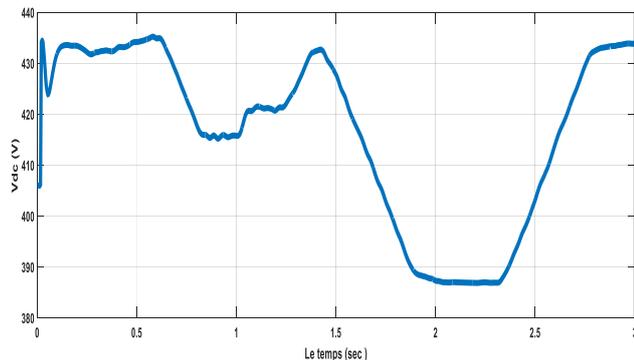


Fig. 4 : Impact de la température et l'irradiation sur la tension continue

E. Impact de l'éclairement et la température sur la puissance continue

Dans cette figure, on peut constater l'effet de l'éclairement et de la température sur la puissance à la l'entrée de l'onduleur dont nous avons montré que l'éclairement est le facteur le plus important sur la production, car le système PV est un générateur de courant

La figure 5 donne les variations de la puissance injectée au réseau dont nous avons constaté l'impact de l'éclairement et de la température sur le niveau de puissance au point de raccordement commun. Mais l'éclairement à une grande influence sur la produite par rapport à la température qui a moins d'influence.

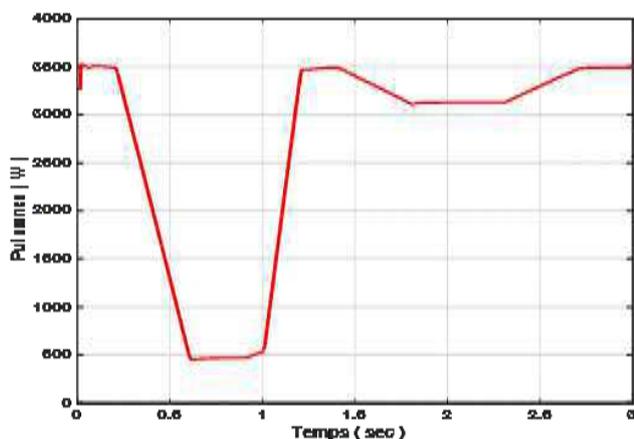


Fig. 5 : Impact de la température et l'irradiation sur la puissance au PCC

IV. RESULTATS SANS INTEGRATION D'UNE CHARGE AU PCC

Pour voir l'impact de l'intégration d'un système photovoltaïque connecté au réseau sans l'impact du réseau, nous avons présentés les performances d'un onduleur monophasé sans transformateur au PCC.

A. Tension maximal et efficace au PCC

La figure 6 illustre l'allure de la tension maximale au point de raccordement commun (PCC).

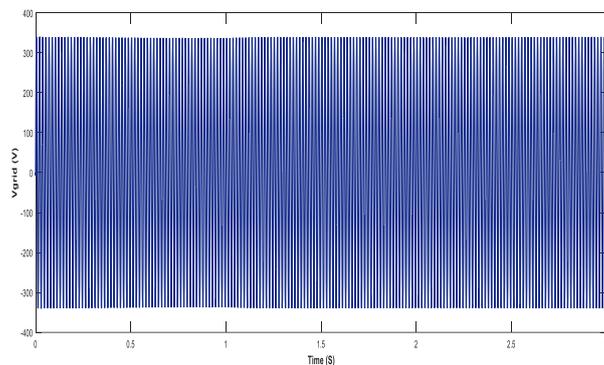


Fig. 6 : Tension sinusoïdale maximale au PCC

La figure 7 donne les variations de la tension efficace (RMS) au PCC dont nous avons constaté l'impact de l'éclairement et la température sur le niveau de tension au point de raccordement avec le réseau.

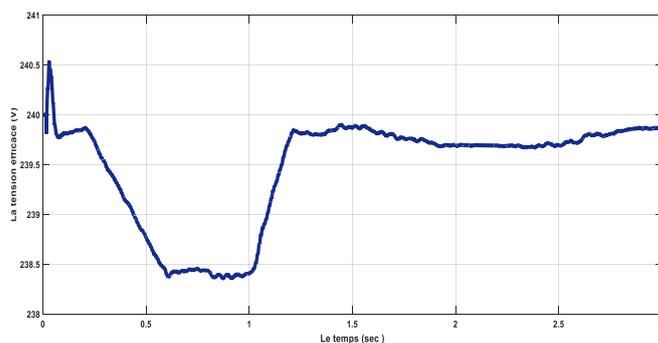


Fig. 7 : Impact de la température et l'irradiation sur la tension continue

B. COURANT EFFICACE AU PCC

La figure 8 donne les variations du courant au PCC dont nous avons constaté l'impact de l'éclairement et de la température sur le niveau du courant au point de raccordements commun avec le réseau. Mais l'éclairement à une grande influence sur le courant produit par rapport à la température qui a moins d'influence.

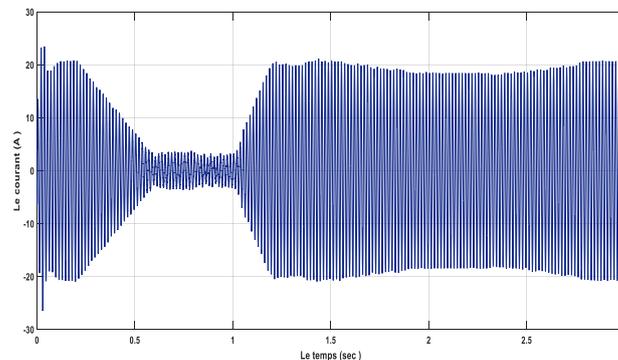


Fig. 8 : Impact de la température et l'irradiation sur le courant au PCC

C. ECOULEMENT DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE AU POINT DE CONNEXION COMMUN

L'énergie solaire est une source de la puissance active délivrée dans notre cas par l'onduleur sans transformateur. On peut montrer dans la Figure 9 l'impact de l'éclaircement et de la température sur la puissance active et La puissance réactive. Dont la puissance active dépend de la puissance produite par le système PV, et la puissance réactive est presque nulle à cause du type de l'onduleur utilisé (onduleur sans transformateur).

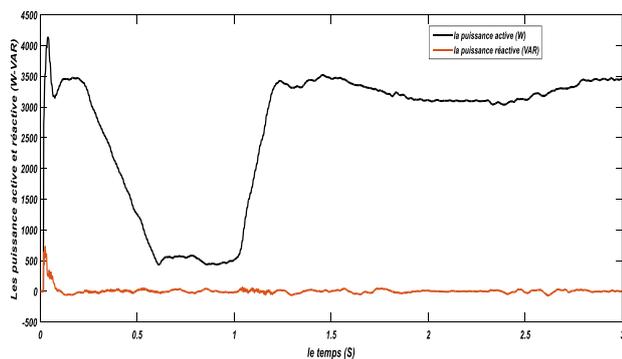


Fig. 9 : l'écoulement de la puissance active et réactive au PCC sans intégration d'une charge

D. COURANT DE FUITE CAPACITIF

Les onduleurs sans transformateur sont plus attrayants pour le système photovoltaïque lié à la terre en raison de son plus haut niveau d'efficacité, le coût minime, et le poids. Malheureusement, l'absence de l'isolation galvanique crée des défauts à la terre causée par le passage du courant de fuite capacitif. La figure 10 montre les caractéristiques du courant de fuite capacitif dont nous avons constaté les caractéristique alternatif du courant, étant donné que le courant de fuite augmenter à une valeur 250mA et diminue à une valeur de 0 mA en raison d'une fin des électrons parasite de générateur PV.

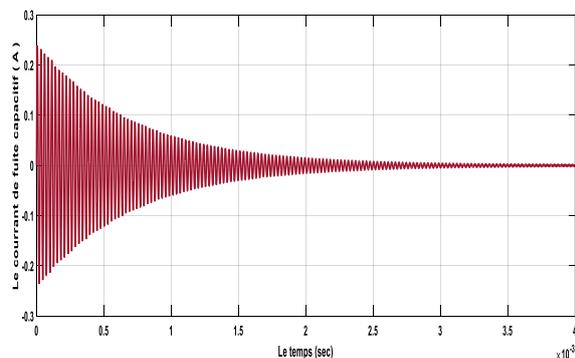


Fig. 10 : Impact la présence d'un onduleur sans transformateur sur la présence du courant de fuite capacitif

E. ANALYSE LE TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE AU PCC

D'après les résultats obtenus illustré dans la figure 11 on peut remarquer que le taux de distorsion harmonique du courant est dans les limites acceptable déclaré sur les normes internationaux (<5%) en raison de l'effet de filtrage au niveau de l'onduleur et l'absence d'une charge connecté au PCC.

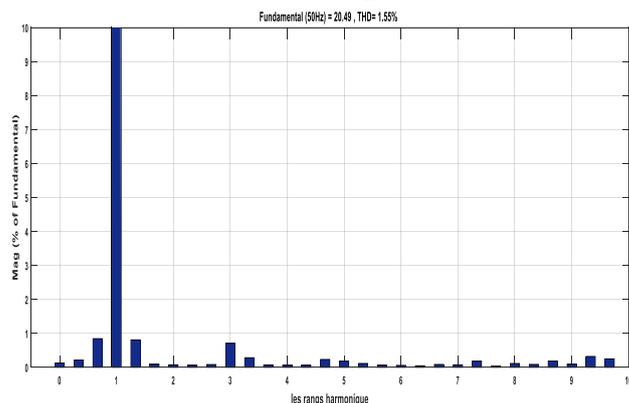


Fig. 11 : Présentation spectrale des rangs harmoniques sans intégration d'une charge au PCC

V. RESULTATS AVEC INTEGRATION D'UNE CHARGE AU PCC

Pour voir l'impact de l'intégration d'un système photovoltaïque connecté au réseau avec l'intégration des différents types des charges, nous avons présenté les performances du système au PCC.

A. Intégration une charge RLC en série au PCC

Dans notre cas nous avons intégré une charge RLC au PCC. La figure 12 donne les variations du courant par rapport le temps. Nous avons montré l'impact de la charge sur la variation du courant selon les besoin de la charge qui défini comme une admittance stable, dont la consommation de cette dernière dépend à la production du GPV et la demande du charge.

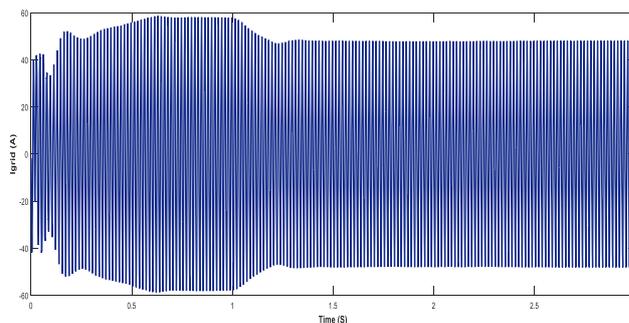


Fig. 12 : Impact de la charge sur le courant au PCC

B. ÉCOULEMENT DE LA PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE EN PRESENCE UNE CHARGE RLC

Dans le cas d'une charge connecté au point de raccordement PCC la consommation de cette dernière dépend de la présence des composants inductif et capacitif qui sont consommés et produits la puissance active et réactive d'une part. Ainsi que le système PV connecté au réseau avec un onduleur sans transformateur injecté seulement la puissance active à cause de l'absence du transformateur au niveau de l'onduleur .la Figure 13 illustre l'écoulement de la puissance active et réactive au PCC par le système PV et le réseau conventionnel vers une charge selon leur caractéristique inductive et capacitive.

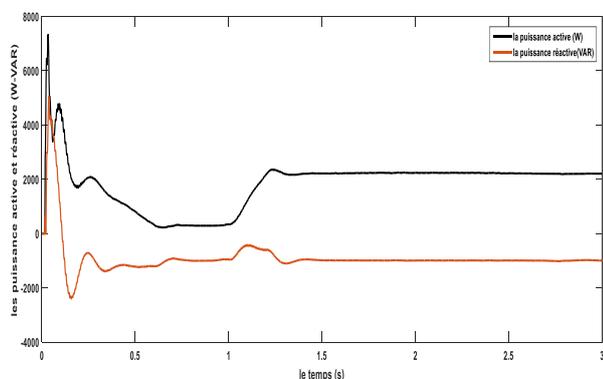


Fig. 13 : Ecoulement de la puissance active et réactive selon la consommation de la charge au PCC

C. ANALYSE DES HARMONIQUES AU PCC

1)- Intégration d'une charge RLC en série

La figure 14 illustre la forme d'onde du courant et la présentation spectrale des harmoniques. Nous avons constaté selon Figure III.20 l'impact de l'intégration de la charge RLC en série sur le niveau de distorsion harmonique du courant dont le $THDi = 18.09\%$ et le $THDv = 0.93\%$ (voir le tableau) en raison de la connexion d'une l'inductance en série et la puissance réactive positive consommé par la charge qui joue un rôle d'amélioration ou de perturbation la qualité d'onde du courant.

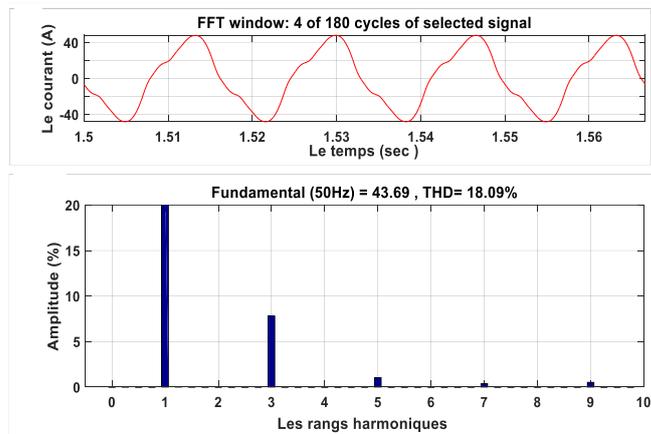


Fig. 14 : Présentation spectrale des rangs harmoniques et la forme d'onde avec intégration d'une charge RLC en série au PCC

2)- Intégration une charge RLC parallèle

La figure 15 illustre la forme d'onde du courant et la présentation spectrale des harmoniques. Nous avons constaté selon la figure l'impact de l'intégration du charge RLC en parallèle sur le niveau de distorsion harmonique du courant et de tension dont le $THDi = 14.13\%$ et le $THDv = 6,14\%$ (voir le tableau) en raison que la connexion de la capacité est en parallèle avec une puissance réactive négative selon la consommation de la charge nous avons montré que la connexion de la capacité en parallèle impact sur l'amélioration ou la perturbation de la qualité d'onde de tension

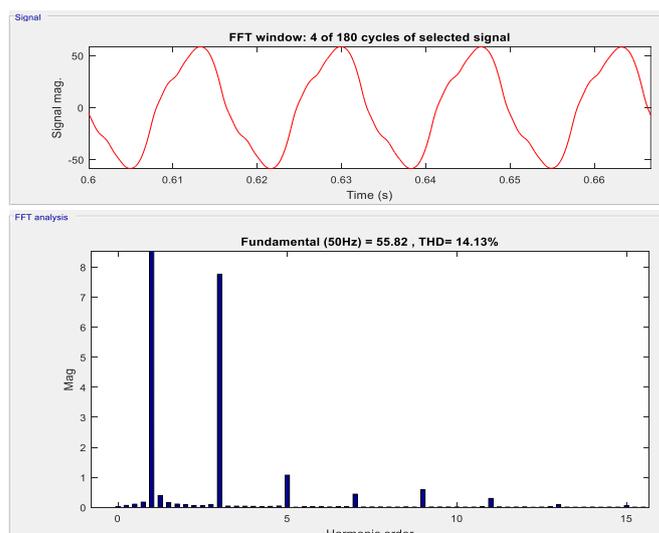


Fig. 15 : Présentation spectrale des rangs harmoniques et la forme d'onde avec intégration d'une charge RLC en parallèle au PCC

3)- Intégration un redresseur avec une charge RL en série

La figure 16 et La figure 17 sont illustré respectivement la forme d'onde et la présentation spectrale des harmoniques du courant et de tension. Dans ce cas nous avons choisi une charge redresseur avec une charge RL en série de $L = 50 \cdot 10^{-3}$ pour voir l'impact sur le niveau de distorsion harmonique du courant et de tension, d'après les résultats de la simulation obtenus le $THDi = 39.13\%$ et le $THDv = 15.88 \%$, ces résultats donnent les taux de distorsion harmonique global de redresseur avec la charge intégrée.

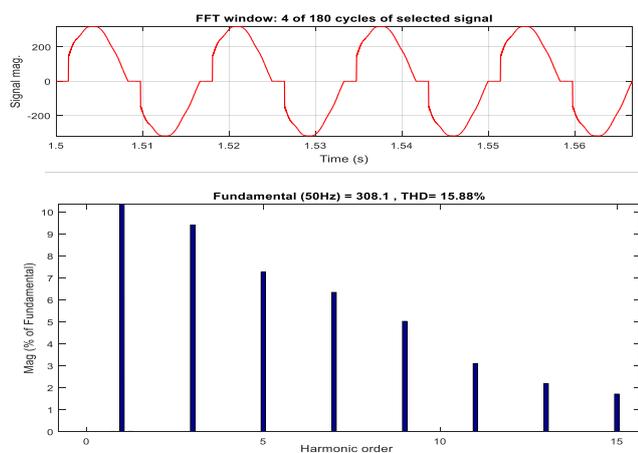


Fig. 16 : Présentation spectrale des rangs harmoniques et la forme d'onde de tension avec intégration d'un redresseur avec une charge RL en série au PCC

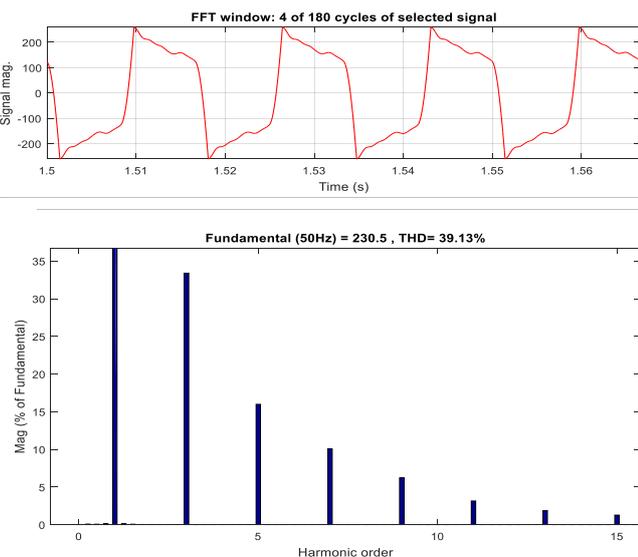


Fig. 17 : Présentation spectrale des rangs harmoniques et la forme d'onde de courant avec intégration d'un redresseur avec une charge RL en série au PCC

Nous avons répété l'étude sur cette charge avec le changement de la valeur d'inductance L par des valeurs différentes. Les taux de distorsion harmonique global du courant et de tension enregistré dans le tableau III. Les résultats, montrés que la connexion de l'inductance en série joue un rôle très important sur l'amélioration ou la perturbation de la qualité d'onde du courant.

TABLE III
 IMPACT L'INDUCTANCE SUR LA QUALITE DE COURANT ET DE TENSION

R (ohms)	L (H)	THD _v (%)	THDi (%)
1	$L = 50 \cdot 10^{-3}$	15,88	35,87
1	$L = 100 \cdot 10^{-3}$	15,79	39,44
1	$L = 200 \cdot 10^{-3}$	15,25	40,52

4)- Intégration un redresseur avec une charge RC en parallèle

La figure 18 et La figure 19 sont illustrent respectivement la forme d'onde et la présentation spectrale des harmoniques du courant et de tension. Dans ce cas nous avons choisir une charge redresseur avec une charge RC en série de $C = 100 \cdot e^{-6}$ pour voir l'impact sur le niveau de distorsion harmonique du courant et de tension, d'après les résultats de la simulation obtenus le $THDi = 44,86 \%$ et le $THDv = 5,76 \%$, ces résultats donnent les taux de distorsion harmonique global de redresseur avec la charge intégrée.

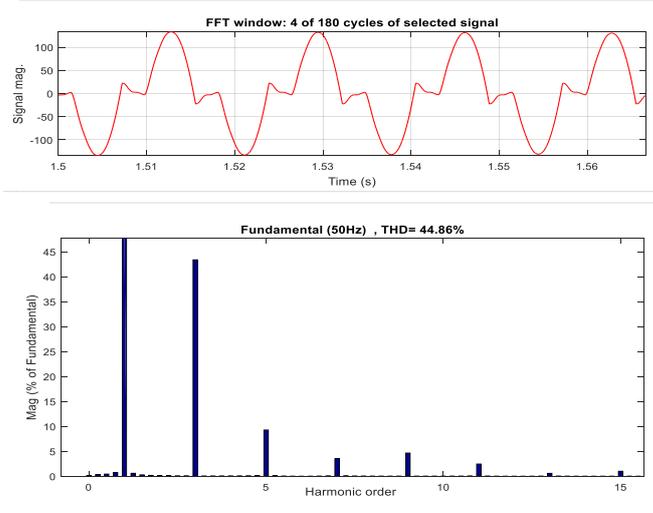


Fig. 18 : la présentation spectrale des rangs harmoniques et la forme d'onde de tension avec intégration d'une charge RC en parallèle au PCC

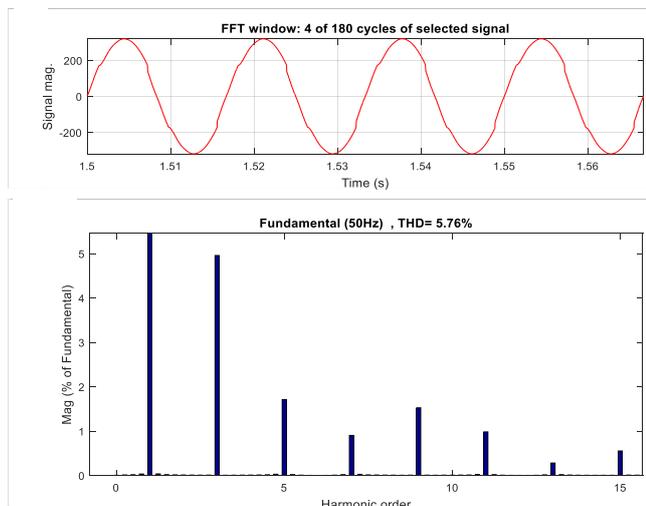


Fig. 19 : Présentation spectrale des rangs harmoniques et la forme d'onde du courant avec intégration d'une charge RC en parallèle au PCC

Nous avons répété l'étude sur cette charge avec le changement de la valeur de capacité C par des valeurs différentes. Les taux de distorsion harmonique global de courant et de tension enregistré dans le tableau 3. Les résultats Montré que la connexion d'une capacité en parallèle joue un rôle très important sur l'amélioration ou la perturbation de la qualité d'onde de tension qui influence sur la qualité du courant.

TABLE IIIII
 IMPACT LA CAPACITE EN PARALLELE SUR LA QUALITE DE COURANT ET DE TENSION

R (ohms)	C(F)	THDi (%)	THDv (%)
1	$C = 1 \cdot 10^{-6}$	16,74	5.54
1	$C = 4 \cdot 10^{-6}$	5,03	2.98
1	$C = 8 \cdot 10^{-6}$	3,37	1.98

5)- *Intégration un redresseur avec une charge RC en série*

Pour voir l'impact de l'absence d'inductance au convertisseur nous avons intégrés une redresseur avec RC en série pour des différents valeurs le tableau donne les résultats de THDi et THDv :

TABLE IVV
 IMPACT LA CAPACITE EN SERIE SUR LA QUALITE DE COURANT ET DE TENSION

R (ohms)	C (F)	THDi (%)	THDv (%)
1	$C = 1 \cdot 10^{-6}$	44.86	5.76
1	$C = 4 \cdot 10^{-6}$	24.80	5.89
1	$C = 8 \cdot 10^{-6}$	89.20	4.31

6)- *Intégration un redresseur avec une charge LC en parallèle*

Pour voir l'impact des composant passif L et C nous avons intégrés une charge avec LC avec $L = 200 \cdot 10^{-3}$ H et $C = 100 \cdot 10^{-6}$ F les résultats donne que THDi = 3,23% et THDv = 5.74%.

VI. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons présenté la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau bas tension avec un onduleur sans transformateur, l'étude consacrée sur les points suivants :

- impact de l'éclairement et de la température sur la tension, le courant, et la puissance à produite par l'onduleur (PCC).
- Impact de la topologie de l'onduleur sans transformateur sur le passage du courant de fuite capacitif, dont avec l'absence de l'isolation galvanique, la présence du courant parasite sur le contact avec le cadre du GPV, et le régime de neutre TT.
- Impact de la topologie de l'onduleur sans transformateur sur l'injection de la puissance active et réactive, dont la puissance réactive injecté au réseau est presque nulle.
- Ecoulement de la puissance active et la puissance réactive au PCC du système PV et du réseau au PCC dépend la production PV et les besoins des charges intégrés.
- Impact les charges intègres au PCC sur la qualité d'onde du courant et de tension
- Impact le type de charge sur la qualité du courant et de tension, dont joue la présence d'inductance et le condensateur en série ou en parallèle un rôle très important sur l'amélioration ou bien la perturbation de la qualité du courant et de tension selon les équations différentielles.

Choix du Système d'Entraînement Electrique dans une Station de Pompage d'Eau

Djamila Talah¹, Rachid Chaibi²

Département d'Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri
Tizi Ouzou, Algérie

¹t1hdjamilia@yahoo.fr

Abstract—Un entraînement électrique est un système électromécanique destiné à réaliser un processus technologique grâce au mouvement d'un organe de travail. Il se compose principalement d'un moteur électrique et d'une machine productrice. Le travail présenté dans cet article est consacré à l'étude du système d'entraînement électrique d'une station de pompage d'eau. Ce système est constitué, principalement, d'un variateur de fréquence et d'un moteur asynchrone accouplé à une pompe centrifuge. Pour assurer le bon fonctionnement du système et aboutir aux résultats escomptés, le choix du moteur électrique, des calculs de charge des mécanismes et calculs de puissances sont effectués. Cependant, le moteur d'entraînement est choisi en se basant sur un calcul préliminaire de sa puissance, et en recourant à la gamme normalisée des puissances utilisées dans les stations de pompage d'eau.

Mots clés— Entraînement électrique, moteur asynchrone, système de commande, station de pompage, variateur de fréquence.

I. INTRODUCTION

Les stations de pompage d'eau sont utilisées pour un transfert et une distribution d'eau potable, fiable et efficace afin de garantir la disponibilité de cette ressource précieuse à la consommation propre de l'Homme, ainsi qu'à la production industrielle et agricole. Les défis de création de nouvelles infrastructures et de modernisation de celles existantes ne sont pas limités simplement à assurer une disponibilité de l'eau, mais aussi à garantir un développement durable, en prenant en compte d'importants facteurs tels que : l'efficacité d'énergie, la productivité, la fiabilité et les coûts de cycle de vie. Dans les stations de pompage d'eau, depuis l'évolution de l'électronique de puissance, et l'apparition de nouvelles techniques de commande des machines électriques, le moteur asynchrone à cage est la solution presque générale [1]. Ce dernier, s'est imposé comme le moteur de premier choix dans les applications industrielles, notamment les stations de pompage d'eau, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques. Dans notre travail, la charge du moteur est une pompe centrifuge qui impose un couple résistant dépendant de sa vitesse de rotation. Le moteur est alimenté par un variateur de fréquence commandé par la loi V/f constant. La variation de la vitesse est obtenue par la variation de la pulsation statorique qui est générée directement par le régulateur de vitesse [1, 2, 3]. Ceci permet par conséquent de contrôler le débit et la hauteur manométrique de la pompe. En effet, les entraînements de pompes sont classés parmi ceux exigeant une moindre qualité

de régulation [4, 5]. Toutefois, il est important de connaître les caractéristiques possibles du couple utile du moteur ainsi que les caractéristiques du couple résistant de la charge entraînée.

II. CHOIX DU MOTEUR ELECTRIQUE

A. Calcul préliminaire de la puissance du moteur

Les informations nécessaires pour le calcul de la puissance, dans le cas d'une pompe centrifuge, sont : le débit massique, la hauteur d'élévation, le poids spécifique du liquide transporté et le rendement mécanique.

La puissance absorbée P_m par une pompe au niveau de l'arbre ou de l'accouplement, peut être déterminée en utilisant la formule suivante [6, 7] :

$$P_m = \frac{\rho g Q H k_r}{1000 \eta} \quad (1)$$

avec :

P_m : puissance mécanique fournie par le moteur (kw),

$Q = 90 \text{ m}^3/\text{s}$, débit refoulé par la pompe

$\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, masse volumique de l'eau,

$g = 9.81 \text{ m}/\text{s}^2$, accélération de pesanteur,

$H = 20 \text{ m}$, hauteur manométrique totale,

$\eta = 79.5\%$, rendement de la pompe.

$k_r = 1.25$, coefficient de sécurité indiqué par des normes techniques [6].

La puissance préliminaire du moteur d'entraînement est: $P_m = 7.71 \text{ kW}$

B. Construction du diagramme de charge et précision de la puissance du moteur

La précision de la puissance du moteur d'entraînement nécessite un contrôle en capacité de surcharge et d'échauffement, qui se fait à travers un calcul du couple thermique du moteur. Pour ce faire, il faut tracer les diagrammes de charge du moteur et de la pompe.

Les courbes caractéristiques d'une même pompe varient avec les vitesses de rotation N , selon la loi de similitude (loi d'affinité) [6,8].

- Le débit est proportionnel à la vitesse $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1}$
- La hauteur manométrique totale est proportionnelle au carré de la vitesse $\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$
- La puissance de la pompe est proportionnelle au cube de la vitesse : $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$

C. Diagramme de vitesse de la pompe

En se basant sur l'histogramme de la demande de consommation en eau donné en fig. 1, et sur la première loi de similitude, on peut construire le diagramme de vitesse de la pompe, représenté en fig. 2.

$$N_2 = \left(\frac{N_1}{Q_1}\right) Q_2 = K_q Q_2 \quad (2)$$

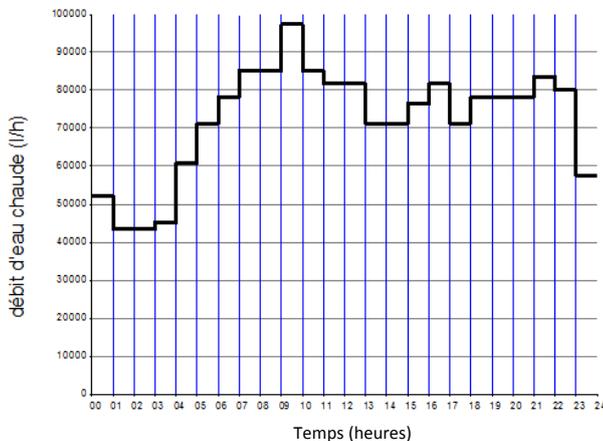


Fig. 1 Histogramme de débit journalier d'eau consommée

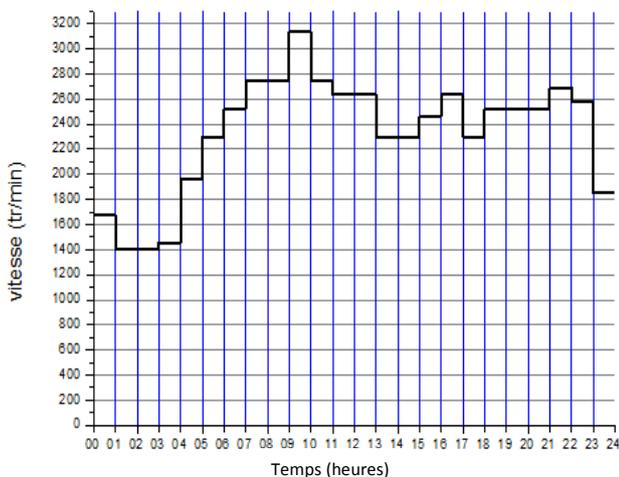


Fig. 2 Diagramme de vitesse de la pompe

D. Diagramme de vitesse du moteur

Le couple résistant exercé par une pompe centrifuge varie en fonction du carré de la vitesse d'entraînement [9, 10,11].

$$C_p = c_0 + 0.95 c_p (\Omega^*)^2 \quad (3)$$

c_0 : couple déterminé par les forces de friction dans le mécanisme, on le prend égal à 5% du couple nominal de la pompe,

c_p : couple nominal de la pompe,

$\Omega^* = \frac{\Omega}{\Omega_n}$ vitesse relative du moteur

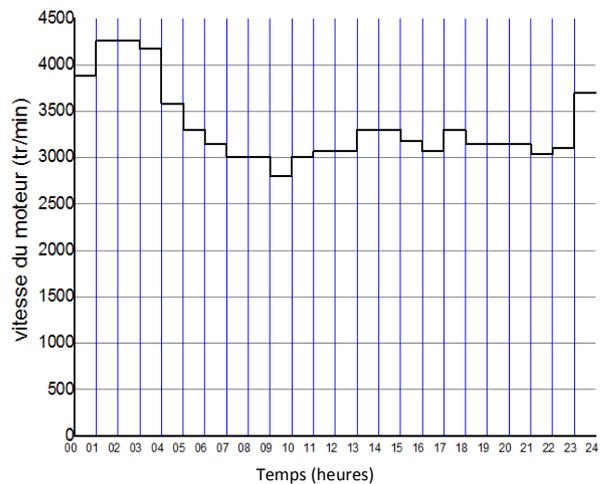


Fig. 3 Diagramme de vitesse du moteur

E. Diagramme de couple du moteur

Le couple fourni par le moteur est donné par la formule suivante :

$$C_m = \frac{P_m}{\Omega} \quad (4)$$

avec :

C_m : le couple électromagnétique du moteur en (Nm),

P_m : la puissance du moteur en (W),

Ω : vitesse du moteur en (rd/s).

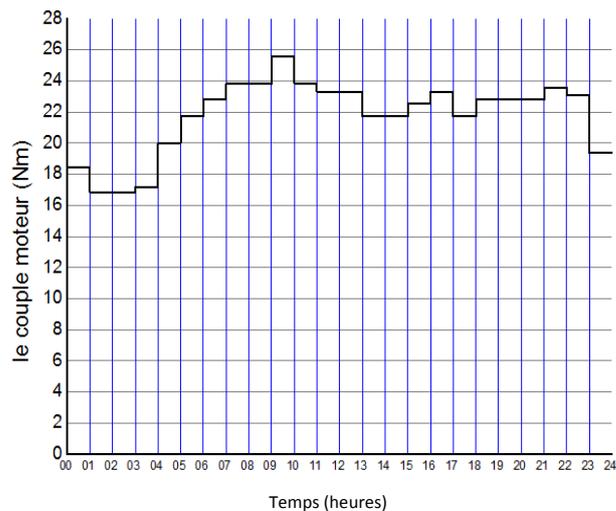


Fig. 4 Diagramme de couple du moteur

F. Calcul du couple équivalent thermique C_{th}

La norme CEI 60034-1 définit des services types qui permettent de calculer une image thermique et de dimensionner les moteurs en fonction de l'utilisation prévue. Le couple équivalent thermique peut être calculé, sur une période bien identifiée [10], comme suit :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C^2(t) dt} \quad (5)$$

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum_1^n C_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i}} \quad (6)$$

avec :

C_i : couple moteur variable (Nm),

$\sum_1^n t_i$: période de fonctionnement du moteur.

Le couple thermique équivalent calculé, en exploitant le diagramme du couple moteur représenté sur fig.4, pour une période de 24 heures, est $C_{th} = 21.77$ Nm

Ce calcul confirme que le couple nominal ($C_m = 24.51$ N m) est supérieur au couple équivalent thermique. En se basant sur le calcul préliminaire de la puissance du moteur et le calcul de couple thermique, la puissance du moteur la plus proche dans la gamme normalisée est de 7.5 kW.

Les paramètres du moteur choisi selon le cahier de charge sont donnés dans le tableau 1.

TABLEAU I
 LES PARAMETRE DU MOTEUR D'ENTRAINEMENT

Désignation	Valeur
Puissance nominale	7.5 kW
Vitesse synchrone	3000 tr/min
Glissement nominale	2.6%
Rendement nominal	87.5%
Facteur de puissance nominal	$\cos\varphi = 0.88$
C_{max}/C_n	2.2
C_d/C_n	2
Glissement critique (maximal)	17%
Coefficient de multiplicité du courant de démarrage	$I_d/I_n = 7.5$
Moment d'inertie du moteur	0.01 kg m ²
Réactance statorique	$X_1 = 0.864 \Omega$
Réactance rotorique	$X'_2 = 2.087 \Omega$
Résistance rotorique	$R'_2 = 0.417 \Omega$
Résistance statorique	$R_1 = 1.686 \Omega$
Réactance magnétique	$X_\mu = 55.149 \Omega$

III. CARACTERISTIQUE DU GROUPE ELECTROPOMPE

Pour évaluer les propriétés du moteur asynchrone on se sert de sa caractéristique mécanique, on fait recours à la formule de KLAUSS [12,13], qui exige la connaissance du glissement critique et du couple critique.

$$C = \frac{2 C_{cr} (1 + a |g_{cr}|)}{\frac{g}{|g_{cr}|} + \frac{|g_{cr}|}{g} + 2 a |g_{cr}|} \quad (7)$$

avec : $a = \frac{R_1}{R'_2}$

Le couple de la pompe (C_p) transmis par l'accouplement d'arbre dépend directement de la puissance et de la vitesse de

rotation du moteur. L'équation générale de la pompe est donnée par la relation suivante :

$$C_p = 1.0375 + 2.1 \cdot 10^{-4} \Omega^2 \quad (8)$$

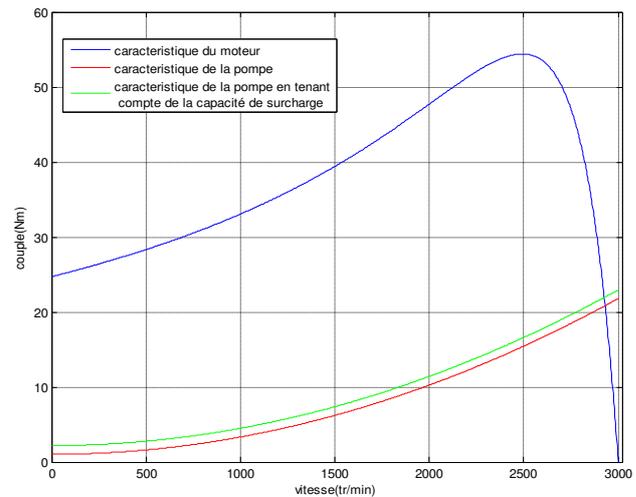


Fig .5 Caractéristique du groupe électropompe

La fig.5 représente la caractéristique du groupe électropompe pour un fonctionnement nominal et en tenant compte de la capacité de surcharge de la pompe de 2.2 Nm. Le point d'intersection entre la caractéristique du couple moteur et celle de la pompe représente le point de fonctionnement nominal du groupe électropompe. Ce point correspond à : $f(C_p; \Omega) = (20.86 \text{ Nm}; 2930 \text{ tr/min})$. Dans le cas d'une surcharge on a noté une augmentation du couple et diminution de la vitesse d'entraînement, ce point vaut : $f_s(C_p; \Omega) = (21.95 \text{ Nm}; 2925.45 \text{ tr/min})$. Au démarrage de la pompe centrifuge, le couple fourni par le moteur asynchrone est important afin que ce dernier atteigne sa vitesse nominale, tel qu'il est montré sur la même figure. En effet, le courant absorbé par le moteur augmente, ce qui provoque des échauffements inadmissibles du moteur et de même dans le cas d'une surcharge de ce dernier.

IV.CALCUL DES PARAMETRES DU VARIATEUR DE FREQUENCE

Les variateurs de vitesse les plus utilisés dans des stations de pompage d'eau sont constitués d'un pont redresseur associé à un filtre, et d'un onduleur autonome réglable en fréquence et en valeur efficace, grâce à des lois appropriées de commande des interrupteurs électroniques [14].

- Calcul de la puissance d'entrée du variateur P_{ent} :

$$P_{ent} = \frac{P_{mot}}{(\eta_{conv} \eta_{mot})} = 9.5 \text{ kW} \quad (9)$$

- Calcul du courant d'entrée de phase du variateur :

$$I_{ent} = \frac{P_{ent}}{(3 \cos \varphi_{conv} U_{ph})} = 15.19 \text{ A} \quad (10)$$

- Calcul de la chute de tension admissible :

$$\Delta U_{adm} = 0.03 U_n = 6.6 \text{ V} \quad (11)$$

- Calcul de la réactance inductive X_1 :

$$X_1 = \frac{\Delta U_{adm}}{I_{ent}} = 0.44 \Omega \quad (12)$$
- Calcul de l'inductance du filtre L1

$$L_1 = \frac{X_1}{2 \pi f} = 0.0014 H \quad (13)$$
- Calcul de la puissance dissipée dans L1 :

$$\sigma_{p1} = 0.02 P_{ent} = 0.19 kW \quad (14)$$
- Calcul de la puissance du variateur :

$$P_{conv} = P_{ent} - \sigma_{p1} = 9.31 kW \quad (15)$$
- Calcul du courant à la sortie du variateur :

$$I_{sort} = \frac{P_{mot}}{(3 \cos \varphi_{conv} U_{ph})} = 11.96 A \quad (16)$$
- Calcul de la réactance X_2 :

$$X_2 = \frac{\Delta U_{adm}}{I_{sort}} = 0.55 \Omega \quad (17)$$
- Calcul de l'inductance du filtre L2

$$L_2 = \frac{X_2}{2 \pi f} = 0.0018 H \quad (18)$$
- La puissance dissipée dans L2 :

$$\sigma_{p2} = 0.02 P_{mot} = 0.15 kW \quad (19)$$

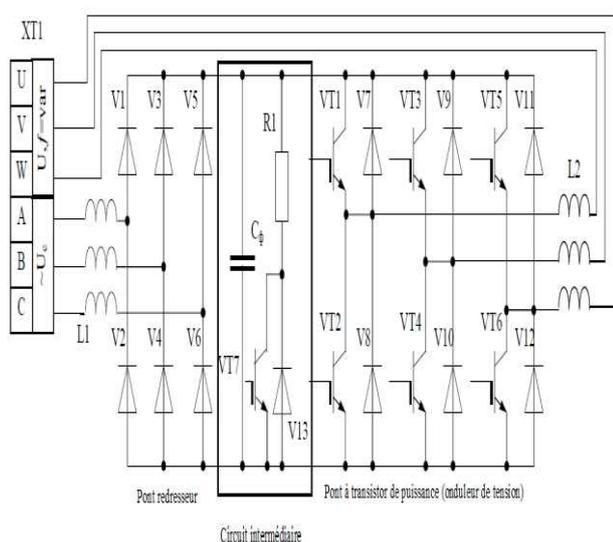


Fig. 6 Schéma de circuit de puissance

V. CONCLUSION

L'objectif de ce travail est le choix du système d'entraînement électrique dans une station de pompage d'eau. Le choix du moteur d'entraînement dépend essentiellement du type de la pompe entraînée et de la puissance absorbée par cette dernière. Ce choix est basé sur un calcul préliminaire de la puissance du moteur, bien que, la vérification du critère de surcharge de ce denier est indispensable afin d'assurer un fonctionnement normal du moteur désigner. Toutefois, les caractéristiques mécaniques du groupe électropompe ont été tracées dans le but de déterminer son point de fonctionnement, et un système de commande a été mis en œuvre, en déterminant les paramètres principaux de chaque dispositif. Par conséquent, le choix du moteur doit être compatible à la fois avec l'alimentation et avec la charge entraînée.

REFERENCES

- [1] B. K. Bose, « Modern Power Electronics and AC Drives », Edition Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.
- [2] J. Bonal, G. Segier, « Variable Speed Electric Drives: Reminders on Power and Control Electronics, Electronics Variable Speed Drives », Edition Lavoisier, Paris 2000.
- [3] M. Etique, « Entraînement Régles », Cours, Haut Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canto de Vaude (HEIG-Vd), mars 2006.
- [4] Kohlirusz, D. Fodor, « Comparison of Scalar and Control Strategies of Induction Motors », HUNGARIAN Journal, Vol. 39 (2), pp. 265-270, 2011.
- [5] M. L. Doumbia, « Outil d'Aide à la Conception des Systèmes d'Entraînement de Machines Electriques: Exemple d'Application », Thèse de philosophiea doctor, École polytechnique de Montréal, 2000.
- [6] Guide technique, « Détermination des Pompes Centrifuges », Edition KSB Aktiengesellschaft, Allemagne, Novembre 2005.
- [7] Guide technique, « Dimensionnement d'un Système d'Entraînement », ABB-Industriel, 2012.
- [8] Guide technique, « Installations de Pompage d'Eau », SNECOREP, Paris, 2010.
- [9] P. Michel, « Commande Electronique des Moteurs Electriques », Edition Dunod, Paris, 2004.
- [10] C. Letrionnaire, J. P. Picheny, « Vade-mecum d'électrotechnique », Edition Ellipses, Paris, 2001.
- [11] Kenneth E. Okedu, « Effects of Drive Train Model Parameters on a Variable Speed Wind Turbin », International Journal of Renewable Energy Research , vol.2, no.1, 2012.
- [12] F. Labrique, G. Segulier, R. Bausière, « Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance: la Conversion Continu-Alternative », Edition Lavoisier, Tec et Doc, Paris 1995.
- [13] S. Meziane « Commande Adaptative et Prédictive de la Machine Asynchrone », Thèse de Doctorat, université Mentouri constantine, 2009.
- [14] J. P. Caron, J. P. Hautier, « Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone », Edition Technip, Paris 1995.

Amélioration de la performance énergétique des Bâtiments résidentiels en Tunisie entre le choix et l'exigence

Naima Guedich ^{#1}, Rahma Ben Amor ^{#2}

^{#1,2}Département Génie Civil, Institut Supérieur des Études Technologiques de Sfax¹, Nabeul², Tunisie

¹naima.guedich@hotmail.fr

²rahmabenamor@gmail.com

Résumé—

La Tunisie est un pays en cours de développement, le secteur de l'énergie a joué un rôle très important dans le développement socio-économique du pays durant la dernière décennie et jusqu'à aujourd'hui. Ce développement s'est traduit par l'amélioration de niveau de vie des citoyens qui sont devenus plus exigeants vis-à-vis du confort au sein de leurs bâtiments. Cette exigence s'est exprimée à travers l'acquisition des équipements de chauffage et de climatisation, ce qui a conduit à une forte augmentation de la demande énergétique. Afin de baisser la consommation, la Tunisie a engagé des actions de maîtrise de l'énergie. Un des principaux plans, est la mise en œuvre d'une réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs en Tunisie en vue d'améliorer le confort thermique à l'intérieur de ces bâtiments et de maîtriser la consommation de l'énergie.

Cette réglementation thermique s'est basée sur le découpage de la Tunisie en zones réglementaires, le choix des matériaux de construction et la qualité du vitrage utilisé.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du développement durable elle est formée par trois axes. Le premier concerne l'amélioration du confort thermique en analysant l'effet de quelques mesures d'efficacité sur la consommation énergétique.

Le deuxième remet en question l'enveloppe architecturale et sa dépendance des agents climatiques selon l'emplacement géographique en discutant la fiabilité du découpage utilisé pour la réglementation thermique. Des simulations à l'aide du code de calcul CLIP ont été effectués pour déterminer la classe énergétique du bâtiment étudié.

Le troisième permet de mettre en évidence la rentabilité de l'isolation à travers une étude économique de surcoût.

Mots clés— Consommation d'énergie – isolation – orientation – ombrage – efficacité énergétique – zonage climatique – climat – surcoût

I. INTRODUCTION

La production énergétique de la Tunisie est largement dominée par les énergies fossiles ce qui implique un approvisionnement extérieur important et par la suite une forte dépendance. Afin d'apporter remède, la Tunisie a adopté une politique d'efficacité énergétique depuis une décennie même

avant que ne s'installe le déficit de la balance énergétique. Cette politique s'est renforcée à partir du milieu des années 2000 suite à l'envolée du prix international du pétrole et à un déficit énergétique de plus en plus croissant. [1].

La situation énergétique actuelle est caractérisée par des ressources en énergies primaires en déclin de plus de 6% par an durant la période 2010-2017, passant de 7,8 MTep en 2010 à 4,8 MTep en 2017. Alors que les ressources sont en baisse la demande ne cesse d'augmenter [2].

Face à cette situation, la Tunisie a élaboré un programme volontariste couvrant l'ensemble des secteurs en privilégiant le dispositif institutionnel, le cadre réglementaire et les incitations financières.

Le cadre réglementaire, s'est traduite par la promulgation de nouvelles lois et l'adoption de textes réglementaires exprimant à la fois l'appui aux investissements dans ce domaine et l'intérêt attaché à la maîtrise de l'énergie en tant qu'axe prioritaire de la politique énergétique du pays [3].

La réglementation thermique des bâtiments neufs s'inscrit dans ce cadre, elle vise à rationaliser la consommation énergétique des bâtiments surtout pour les besoins de chauffage et de climatisation. Cette réglementation a pour objectif de garantir le confort thermique tout en obligeant les concepteurs de penser aux types des matériaux de construction utilisés et de prendre en considération certains critères lors de la conception de l'enveloppe thermique. Les solutions proposées sont déterminées en fonction de l'emplacement géographique et la nature des contraintes climatiques afin d'avoir un bâtiment dont l'identité thermique obéit aux spécifications énergétiques réglementaires minimales

Dans ce travail on présente en premier lieu le cadre de l'étude en mettant en lumière la nécessité de concevoir des bâtiments thermiquement économes. On analysera par la suite l'effet de quelques mesures d'efficacité énergétique sur le besoin énergétique de chauffage et de climatisation. On discutera dans une troisième partie la fiabilité des résultats trouvés par rapport au découpage proposé par la réglementation thermique. Pour mettre en évidence l'effet de l'isolation thermique, une étude économique illustrant le

surcote engendré par l'isolation est présentée. On finira par une conclusion avec des recommandations concernant cette étude.

II. CADRE ET APPROCHE

Le travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments. Les mesures d'efficacité énergétique proposées dans cette étude visent l'établissement des bâtiments qui s'intègrent parfaitement dans leurs sites, ce qui permet de renforcer la stratégie du développement durable adopté par le pays.

A. Description du Cas d'Etude Choisi

Le choix est porté sur un bâtiment à usage d'habitation situé à la zone de Tunis de type villa d'une surface de 230 m². Le bâtiment comporte 4 façades exposées au vent dont la façade principale est orientée Nord. La figure 1 représente l'architecture du cas d'étude choisi.

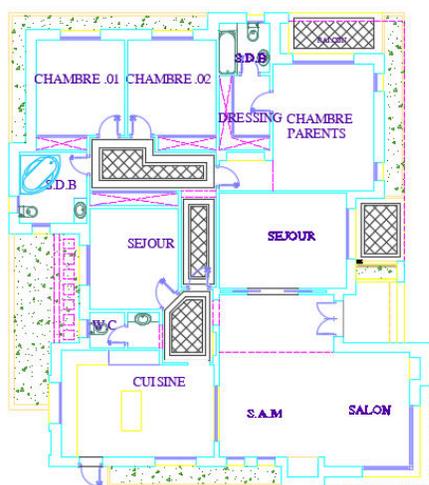


Fig. 1. Plan du bâtiment étudié.

B. Paramètres Etudiés

Le but de cette partie est de déterminer les meilleurs techniques et dispositions à mettre en œuvre pendant la phase de conception et d'exécution pour rationaliser la consommation de l'énergie dans un bâtiment. Les paramètres étudiés sont regroupés selon la figure 2.

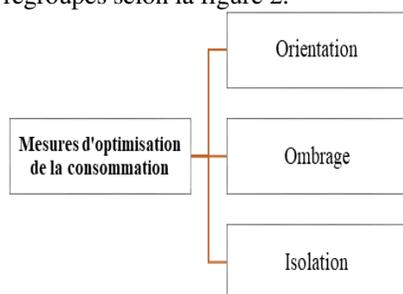


Fig. 2 Mesures d'optimisation de la consommation énergétique dans un bâtiment

1) Orientation du Vitrage

Le vitrage joue un rôle important dans le comportement thermique d'un bâtiment, néanmoins son orientation n'est pas à négliger. Les apports solaires dépendent de la trajectoire du soleil et de la durée d'exposition, ils sont ainsi liés à la position du soleil qui change selon les saisons. C'est à travers cette réflexion que l'influence de ce paramètre a été analysée [4].

Dans notre cas d'étude les baies vitrées sont concentrés sur la façade principale orientée Nord. On calculera les déperditions thermiques dans ce cas puis on abordera les différents cas d'orientation de la façade principale, le but étant de tirer la direction la plus favorable énergétiquement.

2) Ombrage

Le choix et la position d'ombrage doivent dépendre des conditions d'ensoleillement de ce fait, les apports solaires en hiver sont les bienvenus car ils permettent d'économiser une quantité importante d'énergie. Par contre en été ils sont à éviter puisqu'ils causent des surchauffes. La solution optimale à envisager est donc différente selon l'orientation de la façade et l'environnement du bâtiment. Pour le cas étudié on supposera l'absence du facteur ombrage et on proposera une création d'ombrage par des dispositions mobiles amovibles permettant ainsi de réduire les apports en chaleur en été tout en permettant la pénétration des rayons solaires en hiver.

3) Isolation

Plus le flux échangé entre l'ambiance intérieure et extérieure est important plus le confort thermique n'est plus garanti. La solution étant d'affaiblir ces transferts en intercalant des matériaux isolants afin d'améliorer la qualité thermique de l'enveloppe. Dans cette partie on essaiera d'appliquer une isolation au niveau des parois verticales et horizontales et d'améliorer la qualité thermique des vitrages.

Pour cela, on se propose de décrire la composition des différentes parois du bâtiment et d'identifier le coefficient de transmission thermique U des parois avant et après l'isolation. Avant l'isolation, les murs extérieurs sont formés en double cloison avec une lame d'air d'épaisseur 35 cm. Les caractéristiques de différentes couches sont données dans le tableau I.

TABLE I. Composition des murs extérieurs.

Matériaux	Épaisseur e (cm)	Conductivité (W/mK)
Enduit de plâtre	1	0.35
Briques de 12 sur chant	20	0.47
lame d'air	5	0.3
Briques plâtrières	6.5	0.47
Enduit de mortier	2.5	1.15

Pour le plancher terrasse il est accessible, les épaisseurs et la conductivité thermique de différentes couches sont présentées par le tableau II.

TABLE II. Composition du plancher haut terrasse.

Matériaux	Épaisseur e (cm)	Conductivité (W/mK)
Carrelage	3	0.47
Mortier	2.5	1.15
Lit de sable	2	0.33
Étanchéité	0.4	0.23
Enduit de ravaillage	1	1.15
Béton	15	1.75
Corps creux	16	0.94
Mortier	2	1.15

Les vitrages utilisés initialement sont coulissantes, en menuiseries aluminium, les caractéristiques thermiques des fenêtres sont illustrées dans le tableau III.

TABLE III. CARACTERISTIQUES THERMIQUES D'UN SIMPLE VITRAGE.

Fenêtre	Coefficient de transmission U (W/m ² K)	Facteur solaire
Simple vitrage	6.172	0.95

En appliquant l'isolation, La lame d'air pour les murs en double cloisons est remplacée par la laine de roche de conductivité thermique 0.04 W/mK. Le coefficient de transmission a baissé ainsi 1.05 à 0.49W/m²K.

Pour le plancher terrasse, on garde les mêmes couches en intercalant une couche de polystyrène extrudé de conductivité thermique 0.035 W/mK et d'épaisseur 7 cm. La valeur du coefficient de transmission a été réduite de 1.71W/m²K à 0.386W/m²K. Finalement les vitrages simples sont remplacés par des vitrages doubles faiblement émissifs de coefficient de conductivité 1.65 W/m²K.

4) Effet du Climat

Le bâtiment est en interaction permanente avec son environnement, la consommation énergétique est en relation étroite avec l'environnement extérieur qui change selon la saison et l'emplacement géographique. Pour mettre en lumière l'effet de ce paramètre plusieurs régions sont testées, ces régions sont réparties dans Nord, le centre et le Sud. Les régions analysées sont les suivantes :

- Tunis, Nabeul pour le Nord
- Kef et Béja pour les hauts plateaux Nord
- Kairouan pour le centre
- Tozeur, Kebili, Médenine et Gabes pour le Sud

III. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

A. Étude Paramétrique

1) Orientation

Le bâtiment étudié présente une façade principale Nord, Pour mettre en évidence l'effet de l'orientation du vitrage, les besoins thermiques en hiver et en été ont été calculés, les résultats trouvés ont été comparés par rapport à une orientation principale Sud, Ouest et Est. Les baies vitrées sont considérées uniquement sur la façade étudiée en gardant une surface constante pour les différents murs extérieurs, le vitrage utilisé est simple d'épaisseur 6 mm. La figure 3 montre les besoins énergétiques en hiver liés au confort thermique pour les quatre directions. On remarque que le Sud représente la direction la plus performante énergétiquement puisqu'il présente le moins de besoins. Cette constatation s'explique par le fait que la paroi exposée direction Sud offre un meilleur ensoleillement en hiver du fait qu'elle est éclairée naturellement pendant les heures les plus intéressantes de la journée. La direction Nord ne reçoit pratiquement pas des apports solaires utiles en saison froide c'est une paroi froide causant souvent une sensation d'inconfort thermique qui peut être accentué par l'apparition d'humidité et de moisissures.

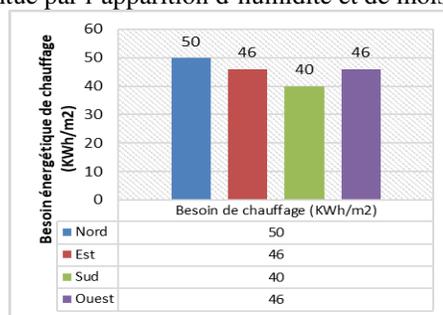


Fig. 2. Besoin énergétique de chauffage.

En été la direction Nord est toujours à l'abri du soleil. Pour le Sud, les apports solaires sont limités puisque la trajectoire du soleil est en dessus du bâtiment. L'utilisation des protections solaires pour les vitrages peuvent réduire considérablement les rayonnements solaires. Bien que les besoins énergétiques en saison chaude ont été fortement réduits pour le Nord la direction Sud reste toujours la plus performante. La figure montre les besoins annuels pour les différentes directions.

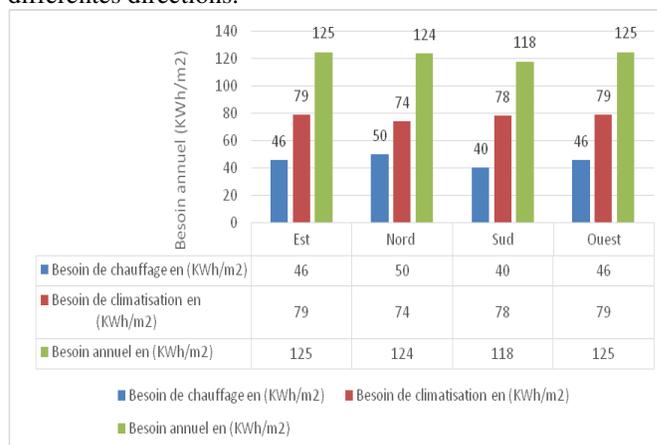


Fig. 3. Besoin énergétique annuels des différentes orientations.

La direction Est est la deuxième direction à privilégier après la direction Sud avec un besoin énergétique annuel de 123 KWh/ m², le problème majeur pour l'Est et l'Ouest est la direction des rayons solaires qui pénètrent directement par les ouvertures ce qui est difficile à réduire par les protections solaires. En été les rayons solaires en Ouest arrivent au moment le plus chaud de la journée ce qui est peu toléré par l'utilisateur influençant ainsi la sensation du confort thermique.

L'optimisation de l'orientation des baies vitrées conduit à choisir une direction principale Sud, une minimisation des surfaces vitrées orientées direction Nord, des surfaces vitrées raisonnables et réfléchies pour les orientations Est et Ouest ce qui contribuerait à l'amélioration de l'éclairage naturel en hiver et la ventilation naturelle en été lorsque les fenêtres sont ouvertes.

2) Ombrage

Considérant une façade principale Sud, le but étant toujours d'améliorer la performance thermique du bâtiment. On considère maintenant la géométrie réelle du bâtiment étudié. Les rayons solaires constituent une source d'apports et d'ensoleillement en hiver et une source de surchauffe pendant l'été, ils doivent être ainsi réduits pour une meilleure sensation de confort. On se propose ainsi de créer de l'ombrage, pour cela plusieurs pourcentages d'ombrage de 10 % à 50% ont été analysés. La figure 6 illustre la variation des besoins thermiques en été en fonction du pourcentage d'ombrage. Les résultats obtenus montrent que plus on augmente l'ombrage en été plus les besoins sont réduits.

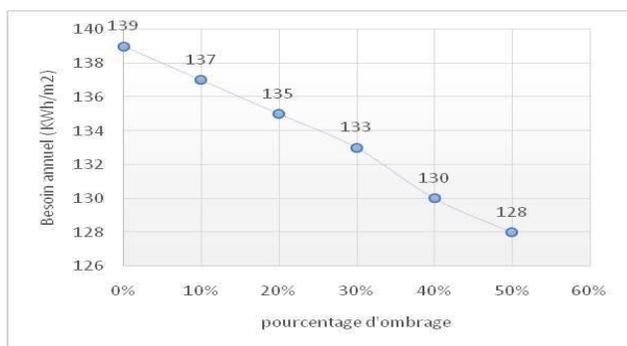


Fig. 4. Évolution du besoin énergétique en été en fonction du pourcentage d'ombrage.

L'ombrage peut être renforcé par les végétaux à feuilles caduques qui sont bien adaptés au climat de type tempéré car ils offriront un ombrage apprécié l'été, tout en ne diminuant pas l'ensoleillement l'hiver. L'effet de ce facteur peut être renforcé par une bonne organisation des espaces intérieurs

3) Isolation

L'implantation du bâtiment ainsi que son enveloppe thermique influencent énormément la quantité d'énergie consommée, le bâtiment étudié est entouré de ses différents cotés par le milieu extérieur ce qui a accentué les transferts thermiques vers l'extérieur. L'isolation est parmi les mesures les plus efficaces en termes de réduction des déperditions

thermiques. Cela est prouvé par les résultats présentés dans le tableau IV où la valeur du besoin énergétique annuel a été considérablement diminuée passant progressivement de 128 KWh/m² avant l'isolation à 59 KWh/m² avec un gain de 54 %.

Le flux économisé dépend de la nature et l'épaisseur de l'isolant utilisé. Pour les murs extérieurs le choix d'une épaisseur de 4 cm est justifié par l'épaisseur de la lame d'air, pour la toiture plus on augmente l'épaisseur plus l'isolation est meilleure toutefois la contrainte coût et facilité d'exécution sont à ne pas à négliger.

TABLE IV. BESOINS ENERGETIQUES AVANT ET APRES L'ISOLATION.

Besoins énergétiques sans isolation (KWh/m ²)	Besoins énergétiques avec isolation (KWh/m ²)
128	59

Ce qui précède a montré l'intérêt de tout paramètre pour optimiser la consommation et améliorer le confort. On retiendra qu'un seul paramètre ne suffit pas pour assurer un confort optimal. La prise en considération de tous les paramètres permet d'atteindre une valeur considérable du gain permettant multiple avantages.

4) Effet du climat

Les paramètres analysés précédemment ont pour but de trouver les meilleurs dispositions et mesures permettant de rationaliser la consommation énergétique. La quantité d'énergie économisée est fonction d'un autre facteur qui est le climat car les spécifications climatiques influencent énormément l'intensité des échanges entre l'enveloppe thermique du bâtiment et le milieu extérieur. Bien que la Tunisie est un pays qui présente une petite surface non étendue, la nature du climat est différente d'une zone à une autre selon son emplacement géographique. La consommation énergétique obtenue pour les différentes régions testées sont représentés dans le tableau V.

TABLE V. LA CONSOMMATION ENERGETIQUE DES REGIONS.

Région	Besoin de climatisation (KWh/m ²)	Besoin de chauffage (KWh/m ²)	besoins annuels (KWh/m ²)
Tunis	88	40	128
Nabeul	88	40	128
Gabes	78	37	115
Béja	93	73	166
Kef	94	74	168
Kairouan	92	48	140
Tozeur	124	33	157
Kebili	124	33	157
Médenine	98	37	135

Les résultats montrent une variation de la consommation énergétique d'une région à une autre. Tunis et Nabeul sont situées au Nord, ils présentent la même valeur de consommation qui est proche de la valeur de consommation de Gabès malgré son emplacement géographique au Sud. De même Kef et Béja présentent des valeurs rapprochées qui sont largement supérieures à la consommation énergétique au Kairouan situé au centre du pays. Pour les régions du Sud, la consommation énergétique de Médenine est inférieure à Tozeur et Kébili qui ont le même besoin énergétique. La différence entre les valeurs trouvées peut être expliquée par les spécificités climatiques et géographiques de chaque région.

Tunis et Nabeul sont des zones côtières situés au Nord caractérisées par un climat tempéré. Leurs emplacements à proximité de la mer leur offre un climat méditerranéen maritime caractérisé par un été sec et chaud et des hivers frais, pluvieux et humides. L'irradiation solaire est moyennement élevée en hiver [6].

Gabès présente un climat maritime aussi, qui se caractérise par des faibles amplitudes journalières de température, été comme hiver.

Kef et Béja se trouvent au Nord-Ouest loin de la mer, elles sont caractérisées par un climat très continental, leurs emplacements géographique au centre des terres est responsable d'un été plus chaud et d'un hiver plus froid et glacial que les régions qui bénéficient des effets adoucissants de la mer. Le rayonnement solaire dans ses régions est faible surtout en hiver ce qui justifie l'augmentation importante des besoins de chauffage en hiver.

Kairouan se trouve au centre du pays, son climat est continental avec un hiver frais et un été très chaud. Le rayonnement solaire est plus intense durant l'hiver par rapport à Kef et Béja.

Pour Tozeur et Kébili, le plateau continental, présente une pente très douce, et très étendue leurs emplacements au sud leur offre un climat sec et aride caractérisé par des journées fortement ensoleillées et des nuits douces et modérées d'où un besoin de chauffage très faible par rapport aux autres régions.

Médenine est situé au Sud – Est du pays, elle appartient à l'étage bioclimatique aride avec un hiver doux, son emplacement limité par la mer méditerranée lui offre un climat plus toléré par rapport à Tozeur et Kébili.

Les résultats obtenus justifient le découpage géographique de la Tunisie en trois zones climatiques réglementaires qui sont :

- La ZT1 appelée zone méditerranéenne qui renferme le littoral allant du gouvernorat de Bizerte à celui de Gabès.
- La ZT2 des hauts plateaux du Nord constituée par le Nord et le Centre hors littoral, s'étendant du gouvernorat de Jendouba au gouvernorat de Gafsa.
- La ZT3 qui renferme les gouvernorats de Tozeur, de Kébili et de Tataouine.

Avec l'instauration de cette réglementation, le permis de bâtir ne sera délivré que lorsque le bâtiment analysé sera conforme aux exigences minimales d'économie d'énergie selon son appartenance à une zone climatique réglementaire.

Bien que les résultats obtenus confirment ce zonage climatique, la consommation énergétique varie pour des régions appartenant à la même zone climatique.

Même si le besoin annuel est rapproché pour les régions appartenant à la même zone climatique réglementaire, les besoins de chauffage et de climatisation sont différents. La figure 5 illustre les besoins énergétiques des régions pour chaque zone réglementaire.

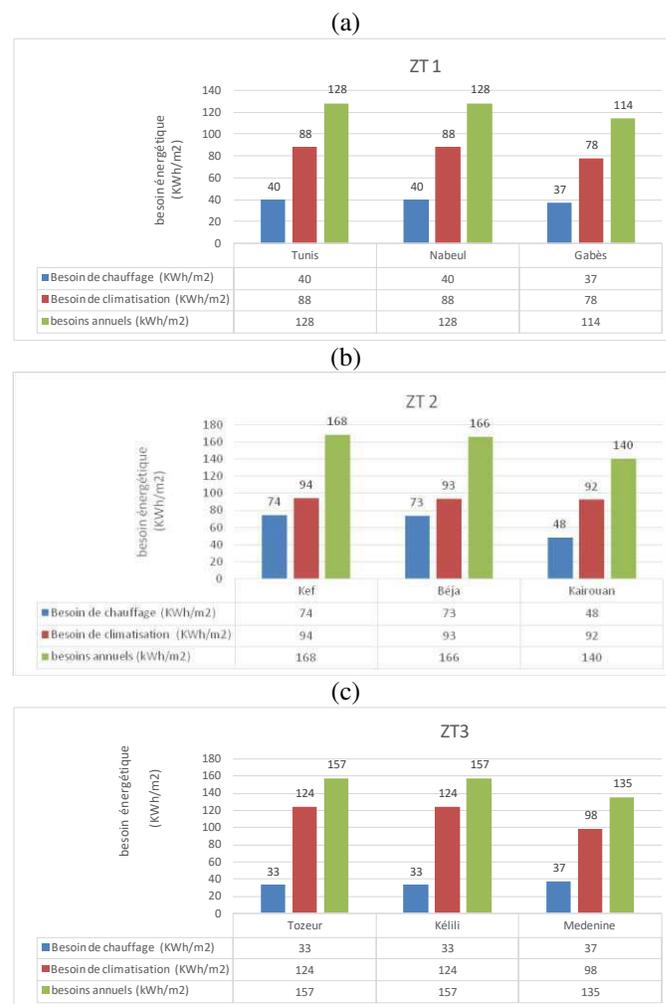


Fig. 5. Besoin énergétique des régions pour chaque zone.

Gabès appartient à la zone climatique réglementaire 1 qui renferme les gouvernorats qui présentent des limites avec la mer méditerranée. Ce critère est pris en considération pour l'élaboration du zonage, les faibles amplitudes de températures en été et le milieu aride tempéré justifie la baisse du besoin énergétique par rapport à Nabeul et Tunis.

Béja, Kef et Kairouan sont trois régions appartenant au Nord et au centre hors littoral, ils font partie de la même zone climatique réglementaire 2 ce qui suppose la même nature du climat. Les régions de Kef et de Béja ont un emplacement géographique caractérisé par des altitudes importantes et par la suite une consommation énergétique très élevée surtout en

hiver à l'opposé de Kairouan qui présente une pente moyenne ainsi des besoins modérés en hiver.

L'analyse de la figure 5 montre que le modèle de découpage réglementaire proposé ne prend pas en considération les modifications des milieux urbains qui influencent les microclimats ni les modes d'adaptation dans chaque région climatique. On s'aperçoit qu'il est difficile de transposer une méthode de calcul mise au point à partir des conditions climatiques spécifiques d'une région à l'autre, car cela peut entraîner un certain nombre de problèmes sur les plans thermiques des enveloppes architecturales, énergétiques et hygrothermiques dans le bâtiment [7].

L'élaboration du zonage réglementaire s'est basée sur les données suivantes [5]:

- La température minimale quotidienne
- L'humidité relative moyenne
- L'irradiation globale quotidienne sur le plan horizontal
- La durée quotidienne d'ensoleillement

Les données prises en considération sont des données climatiques. Le tableau VI illustre les valeurs de température de base et l'humidité relative dans le cas de chauffage et climatisation pour les différentes régions analysées.

TABLE VI. TEMPERATURE DE BASE ET L'HUMIDITE RELATIVE DES REGION

Région	Température de Base (C°)		Humidité relative (%)	
	Climatisation	Chauffage	Climatisation	Chauffage
Tunis	4	33	94	41
Nabeul	4	33	94	41
Gabes	7	34	85	40
Béja	2	37	96	27
Kef	2	36	90	22
Kairouan	4	37	79	27
Tozeur	5	40	74	19
Kebili	5	40	74	19
Médénine	5	40	74	14

Le tableau VI montre que les régions appartenant à la même zone climatique réglementaire présentent la même valeur de température, tel que le cas de la zone 2 ou des valeurs proches comme pour les autres zones. Pour l'humidité relative elle varie dans un ordre décroissant du nord vers le sud et des pays présentant une limite avec la mer vers les pays qui se trouvent au centre.

L'effet du relief, la composition géologique et les ressources naturelles ont été négligés lors de l'élaboration du zonage. Cela justifie les valeurs différentes du besoin de chauffage et de climatisation pour chaque région car une zone climatique doit comporter les régions présentant les mêmes spécifications par contre, on trouve Gafsa et Jendouba appartiennent à la même zone climatique réglementaire pourtant, le climat y est assez différent. Cette différence des besoins énergétiques ne provient pas uniquement du climat

mais encore de la spécificité de l'emplacement géographique de Gafsa caractérisé par des fortes altitudes avec une moyenne de 313 m par rapport à 143 m à Jendouba. Le tableau VII présente les altitudes des différentes régions étudiées de la zone 2.

TABLE VII. ALTITUDES DES DIFFERENTES REGIONS

Région	Kef	Béja	Kairouan
Altitude (m)	518	258	60

Le zonage climatique recommandé a été élaboré pour raffiner le découpage en prenant en considération les données géographiques et même socio-économiques ce qui permet donc d'avoir une information plus pointue et une différenciation au niveau de l'architecture et, par conséquent, offrir la possibilité d'économiser davantage d'énergie. Ceci est possible par le découpage de la Tunisie en 10 zones climatiques selon un deuxième zonage appelé zonage recommandé.

En tenant compte des paramètres climatiques et géographiques on peut choisir la solution architecturale optimale pour chaque région.

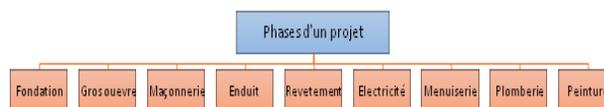
Pour les régions qui présentent un taux élevé de radiations solaires, on doit penser à intégrer l'inertie thermique en utilisant des murs en briques de terre crue ou en pierres de tailles. Ces murs permettent de bénéficier des apports solaires gratuits qui vont être stockés pendant la journée pour être diffusés la nuit en saison froide. Cette technique fait partie du patrimoine architectural des pays de sud connus par ce style tel que Tozeur et Zarzis.

Pour les régions présentant un rayonnement solaire faible, l'isolation thermique demeure la meilleure solution permettant d'assurer un confort thermique tout en minimisant la consommation énergétique.

B. Estimation du Coût de l'Installation de l'Isolant

D'après l'étude paramétrique on peut considérer que l'isolation est la mesure la plus efficace pour la réduction des besoins énergétiques. Il est intéressant par la suite de déterminer le surcoût engendré par cette solution par le biais d'une étude économique.

Tout projet est constitué par une série d'étapes consécutives qui se déroulent selon un ordre chronologique pour donner l'aspect final attendu du projet. Les travaux de construction peuvent être divisés selon leurs natures, les besoins en matériaux, matériel et main d'œuvre. La figure 8 présente les différentes opérations dans un projet de bâtiment.



Chaque projet est unique, le coût de réalisation des travaux varie selon l'emplacement, la durée et la solution technique employée. Pour pouvoir estimer le coût global il faut pouvoir déterminer le coût de chaque étape de construction. La surface

et la qualité demandée et exigée par la maitre d'ouvrage influence intensivement le coût des travaux. Le tableau VIII présente les différents articles à exécuter avec leurs prix unitaires pour l'étape de fondation établis selon un exemple de cahier de charges.

TABLE VIII. EXEMPLE DES ARTICLES POUR L'ETAPE DE FONDATION.

Article	Unité	Prix unitaire (DT)
Fouille en puit	m ³	21
Fouille en rigole	m ³	23
Gros béton	m ³	226
Béton de propreté	m ³	230
Béton armé en fondation	m ³	650
Remblai en tout-venant	m ³	38
Chappe	m ²	28

Pour déterminer le coût global du projet il faut déterminer la quantité de chaque article afin d'avoir le coût des différentes étapes. Le tableau IX illustre les coûts de réalisation de chaque étape dès la phase de fondation jusqu'à la phase d'exploitation du bâtiment.

TABLE IX. COÛTS DES DIFFERENTES OPERATIONS DU CAS D'ETUDE.

Opération	Coût (DT)
Fondation	33000
Gros œuvre	36000
Maçonnerie + Enduit	23500
Revêtement	16100
Étanchéité	5750
Menuiserie	58000
Électricité + Plomberie	32000
Peinture	13000
Divers	9000
Coût total	226350

Les travaux d'isolation sont nécessairement accompagnés par un coût supplémentaire dû à l'installation de l'isolant, pour pouvoir déterminer le surcoût, il faut savoir le coût de différents éléments avant et après la pose de l'isolation. Le tableau X illustre le coût de ces éléments par m².

TABLE X. COUT DES DIFFERENTS ELEMENTS AVANT ET APRES L'ISOLATION.

Éléments	Surface (m ²)	Coût avant l'isolation (DT/m ²)	Coût après l'isolation (DT/m ²)
Double cloison 35 cm	178.35	65	82
Vitrage	33.65	240	320
Toiture	230	110	145
Total	-	44968.75	58742.7

D'après les résultats trouvés on peut conclure que l'opération d'installation de l'isolant représente une valeur de 13773.95 DT, cette valeur représente 6.1 % du coût global du projet. Elle sera remboursée dans un peu de temps.

Cette phase de calcul est préliminaire elle a pour objectif de mettre en valeur l'effet de l'isolation et de montrer que la valeur de surcoût n'est pas très marquante comparée aux gains réalisés. À savoir confort thermique, diminution de la consommation énergétique, baisse de la facture d'électricité et préservation de l'environnement par la minimisation des émissions de CO₂. Les valeurs trouvées montrent l'intérêt de l'isolation pour les différents types des bâtiments, elles sont encourageantes pour les acteurs dans le secteur du bâtiment permettant une forte amélioration de la qualité de l'enveloppe du bâtiment et une rentabilité économique dans le temps.

IV. CONCLUSION

Les simulations effectuées dans cette étude ont permis de montrer l'efficacité des mesures orientation, ombrage et isolation dans la réduction de la consommation énergétique. Renforcer ces paramètres par l'utilisation des lampes à basse consommation, d'appareils électroménagers efficaces, et des chauffe-eau solaires permet d'avoir un bâtiment thermiquement confortable avec une consommation énergétique bien maîtrisée. Du côté économique, le temps de retour est très intéressant pour le consommateur final.

Le choix des techniques et des mesures d'efficacité énergétique doit se faire en se référant au climat et la spécificité de l'emplacement géographique de la région pour avoir une efficacité optimale.

Le choix des solutions à adapter doit se faire selon la température de base de la région, l'humidité relative, le taux de radiations et l'effet du relief.

Le choix des bâtiments avec inertie thermique forte est un des atouts pour mieux gérer les apports de chaleur. On peut sans risquer de se tromper affirmer qu'elle induira une économie d'énergie, surtout pour les régions présentant un climat chaud et aride.

REFERENCES

- [1] CHEBIL F, Politique énergétique en Tunisie, l'Institut Tunisien de la Compétitivité et des Études Quantitatives, Mai 2017.
- [2] Marzouk H, Secteur de l'énergie en Tunisie de la nécessité d'agir en urgence, Décembre, 2018
- [3] Osman N, Tunisie : une politique nationale d'efficacité énergétique, 2012
- [4] M. Annabi, A. Mokhtari et T.A. Hafrad, Estimation des performances énergétiques du bâtiment dans le contexte maghrébin, Revue des Énergies Renouvelables Vol. 9 N°2, Juin 2006
- [5] Agence nationale pour la maîtrise de l'énergie, Données climatiques de base pour le dimensionnement des installations de chauffage et de refroidissement, Juillet, 2005
- [6] Agence nationale pour la maîtrise de l'énergie, Initiation à la réglementation thermique et énergétique des logements neufs, Aout 2007
- [7] Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie, Efficacité énergétique de la climatisation en région tropicale : Tome 1 : conception des nouveaux bâtiments, janvier, 2002

Le Dispositif de la Façade Ventilée, une Réponse de l'Architecture Climatique Pour Un Rafraîchissement Passif, Le cas de la ville Alger.

D. Baziz^{#1}, A. Boussoualim^{*2}

[#] Ecole polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, Alger, Algérie.

¹djiga.baziz@gmail.com.

²a_boussoualim@hotmail.com.

Le Résumé — Beaucoup de recherches affirment que l'architecture bioclimatique présente une démarche très pertinente pour réduire les besoins en énergie à travers l'exploitation du potentiel environnemental. Cet article rentre dans le cadre d'une recherche doctorale qui s'intéresse au dispositif de la façade ventilée, comme un procédé architectural climatique qui peut représenter une solution aux problématiques du rafraîchissement passif et de l'efficacité énergétique en Algérie, un retour à la littérature est donc obligatoire pour guider notre sélection d'indicateurs, et de donner des orientations même d'ordre générales pour l'utilisation de la façade ventilée à Alger..

Mots clés — l'architecture climatique, la façade ventilée, le rafraîchissement passif, les indicateurs climatiques, Alger.

I. INTRODUCTION

L'efficacité énergétique et la protection de l'environnement sont les majeures problématiques actuelles dans le monde, depuis les années 70 divers politiques énergétiques sont mises au point par les gouvernements, notamment dans le secteur du bâtiment qui représente un principal consommateur d'énergie. En Algérie, le secteur du bâtiment est classé au premier rang avec 41% de la consommation nationale globale de l'énergie d'après le CDER, d'où la nécessité de tracer une politique qui va rationaliser cette consommation excessive. Les politiques énergétiques dans le monde mettent le paquet sur l'isolation thermique comme stratégie pour réduire les pertes dans le bâtiment, mais beaucoup de recherches affirment que l'architecture bioclimatique présente une démarche très pertinente pour réduire les besoins en énergie à travers l'exploitation du potentiel environnemental et la diminution des besoins [1].

Optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments à travers leurs enveloppe à fait objet de plusieurs recherches, notamment le dispositif de la façade ventilée, son utilisation dans l'architecture connaît une tendance croissante que ce soit dans le monde au ici en Algérie. Dans cette optique, l'idée d'une méthode permettant d'évaluer l'enveloppe d'un bâtiment doté d'un dispositif de façade ventilée et de son aptitude à exploiter les ressources de son environnement dans un climat méditerranéen, et précisément celui du littoral

Algérois avec les spécificités de ses brises thermiques semblent intéressantes.

Cet article rentre dans le cadre d'une recherche doctorale qui s'intéresse au dispositif de la façade ventilée, comme un procédé architectural climatique qui peut représenter une solution aux problématiques du rafraîchissement passif et de l'efficacité énergétique en Algérie, sachant que c'est un dispositif qui peut être utilisé pour les nouveaux projets, tout comme les constructions existantes dans le cadre d'une réhabilitation thermique.

II. LE DISPOSITIF DE LA FACADE VENTILEE

On peut le qualifier d'un procédé architectural climatique puisque il utilise les ressources de l'environnement pour améliorer le confort thermique des occupants, il peut représenter une repense efficace pour répondre aux besoins de rafraîchissement notamment dans les climats tempérés, un choix prétentieux doit être fait au préalable selon les spécificités d'un climat local. Dans cet article le type de façades ventilées est celui qui correspond plus à une façade ventilée opaque OVF qui est une façade double peau multicouche industrialisée composée de deux couches opaques et un canal de ventilation entre les deux. Tableau 1 montre la configuration la plus courante de OVF.[2]

TABLE 1 : LES DIFFERENTS TYPES ET MATERIAUX POUR LES FAÇADES VENTILEES OPAQUES.[2]

La couche	Le type	Les plus fréquemment utilisés
Peau extérieure	lourd	Céramique, pierre, panneaux de béton,...
	Léger	Panneau GRC, panneaux métalliques, composite,...

Cavité d'aire	Naturellement ventilée	De 4cm à 10 cm
Isolation thermique	L'épaisseur dépend des normes de chaque pays	MW, EPS, XPS, PUR
Peau intérieure	Lourd	Brique, béton ...
	léger	Panneau sandwich, plaques de plâtre

L'industrialisation de la façade ventilée ainsi que son utilisation dans les projets architecturaux d'envergure par des architectes de renommée internationale a contribué à sa diffusion dans le monde. Beaucoup de recherches sont menées sur ce dispositif, principalement en termes de confort thermique et d'efficacité énergétique dans des climats différents, affirment que l'efficacité du dispositif varie selon plusieurs paramètres qu'on peut classer en deux catégories: Les paramètres environnementaux et les paramètres conceptuels.

A. Le principe de fonctionnement

L'air extérieur pénètre à l'intérieur de la cavité par l'ouverture au fond de la paroi extérieure, une fois à l'intérieur de la cavité il gagne de la chaleur par convection en raison du rayonnement solaire sur la paroi, et sous l'effet de cheminée il continue à monter jusqu'à en ressortir à travers les ouvertures supérieures et extrait de l'énergie thermique à l'intérieur de la cavité, et refroidie ainsi la cavité Fig 1

On peut relever deux types de la façade opaque ventilée, suivant la nature des joints, les façades opaques ventilées à joints ouverts et les façades opaques ventilées à joint fermés, et selon la spécificité climatique le type de façade est choisi en fonction du besoin, pour refroidissement ou pour gain de chaleur.

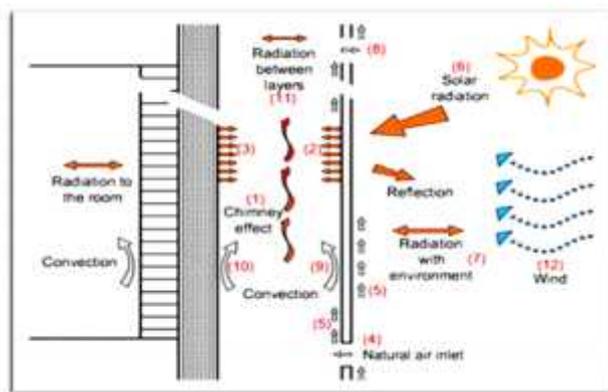


Fig. 1 la performance thermique des Façades Opaques Ventilées (OVF).[2]

B. L'influence du vent sur la performance thermique de la façade ventilée

Le rayonnement solaire n'est pas le seul pilote qui influence le mouvement de l'air à l'intérieur des deux couches qui forment la cavité, le vent également influence le mouvement de l'air en l'absence d'un rayonnement solaire important et en période de nuit l'influence du vent sur l'air à l'intérieur de la cavité est plus remarquable que l'effet de cheminée, l'augmentation de la vitesse d'entrée de l'air à l'intérieur de la cavité influe sur la dissipation de la chaleur à l'intérieur de la cavité et plus la vitesse est importante plus de 2,5m/s plus le refroidissement est efficace, mais ce n'est pas seulement la vitesse des vents qui influence le rendement de la façade ventilée mais aussi sa direction[3].

III. LE CONTEXTE DE LA VILLE D'ALGER

Notre choix c'est porté sur la ville d'Alger comme site d'étude pour le grand parc de bâtiments dont elle dispose, sa dynamique urbaine comme capitale du pays et future métropole méditerranéenne, et le grand nombre de projets qui sont en train de voir le jour à un rythme accéléré, et qui représentent un véritable enjeu environnemental et énergétique pour le pays, ces dernières années le concept de façade ventilée c'est fait un succès et en retrouve des entreprises d'importation installées et font la promotion à leur produit comme étant écologique et garanti une économie d'énergie.

Alger ville au bord sud du bassin méditerranéen dotée d'un climat chaud et sec pendant l'été, doux et pluvieux pendant l'hiver, provoquant une forte demande de rafraîchissement en saison estivale, et une augmentation significative de la charge sur la demande énergétique pendant cette période, comme conséquence d'une utilisation excessive de la climatisation électrique est enregistrée. Le grand défi sera donc de minimiser les besoins en rafraîchissement.

A. Le rafraîchissement passif dans le bâtiment traditionnel à Alger

Le bâtiment méditerranéen est connu pour sa spécificité constructive dans la prise en charge du besoin de rafraîchissement pendant la période estivale, des dispositifs comme le patio, El melkef, les moucharabiés ainsi que l'orientation introvertie des espaces intérieurs et des ouvertures sont quelques-uns de ces dispositifs fig 2.

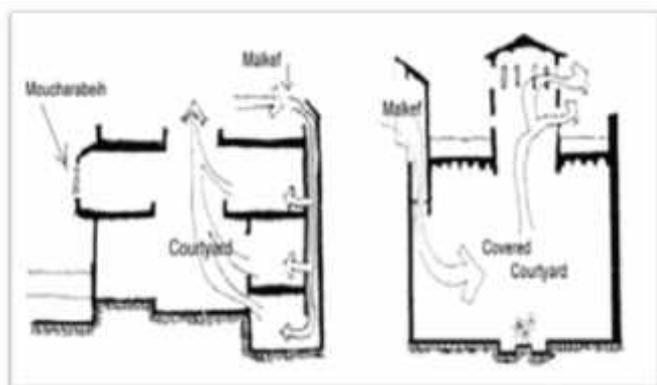


Fig 2 : combinaison de dispositifs de ventilation naturelle dans la maison arabe traditionnelle "Malkef, cour" (revue scientifique architecture n ° 4, 1988) [7]

Composer et capter le vent est la principale stratégie utilisée pour la ventilation naturelle. Renouer avec le savoir-faire et la technique ancestrale et profiter des vents et de la brise littorale mais d'une manière à les intégrer au dispositif de la façade ventilée est notre champs de réflexion pour ce travail. La brise littorale influence le confort thermique en améliorant l'ambiance bioclimatique par son effet rafraichissant, certains habitant de la méditerranée opte pour la ventilation naturelle on orientant les ouvertures de leurs maison vers le sens de la brise et économise l'énergie électrique utilisée pour la climatisation.[4].

B. Les brises thermiques littorales comme indicateur climatique à Alger

Le cas du littoral Algérien est particulièrement intéressant car l'interface mer/terre permet la création de brises thermiques dont les caractéristiques sont très intéressantes pour la ventilation naturelle fig 3.

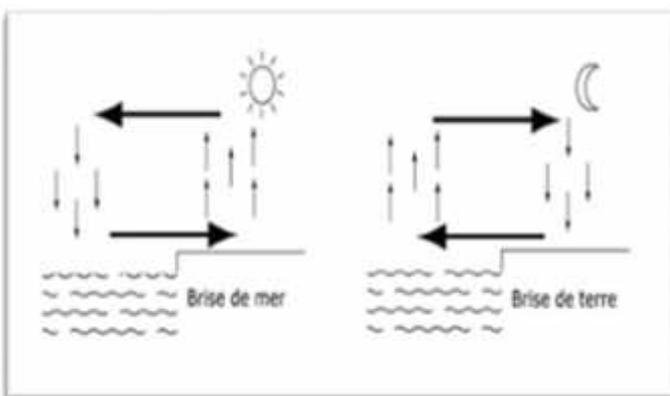


Fig 3 – Brise de mer et brise de terre.[5]

Le contraste thermique entre la mer et la terre joue le rôle essentiel dans l'établissement des brises. Le déclenchement est

qu'au voisinage d'une forêt. Ces mêmes éléments interviennent à une certaine distance des côtes pour changer la direction ou la vitesse des brises.[4]

Ces brises sont causées par la différence de rafraîchissement entre l'eau et la terre, la terre se réchauffant et se rafraichissant plus vite que la mer. La journée, par ciel clair, l'air au-dessus de la terre se réchauffe et s'élève par convection, créant ainsi une zone de basse pression locale. Ce phénomène se traduit par l'apparition d'une brise circulant de la mer vers la terre. La nuit c'est le phénomène inverse qui se produit et la brise va circuler de la terre vers la mer[5]

C. Quelques particularités de la brise thermique littorales

plus fréquent là où le sol s'échauffe vite, à proximité des villes Les études menées par Dahech Salem, et al .2012 sur la dynamique des brises de mer au Maghreb oriental, indique que le phénomène commence à apparaître 4 heures après le lever du soleil avec des vitesses de moins de 5m/s, et peuvent pénétrer dans le continent jusqu'à 80 km pour les côtes Tunisiennes avec une extension verticale qui peut atteindre 100m.

C'est caractéristiques indique que les brises peuvent couvrir le territoire d'une ville ce qui va profiter aux maximums de bâtiments de l'air frais.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le phénomène des brises thermiques littorales constitue un excellent indicateur climatique qui peut optimiser le rendement thermique et énergétique du dispositif de la façade ventilée à Alger, les recherche sur la vitesses du vents en démontrés que plus l'air entre en vitesse dans la cavité plus le rafraichissement y est, dans ce sens des études plus approfondies pour étudier le phénomène naturelle de brises thermiques littorales seront menées dans nos prochains travaux pour mieux cerner l'apport des brises thermiques sur le comportement de la façade ventilée, et son influence sur son rendement énergétique pendant la saison estivale.

References

- [1] C. Lou, « Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques », p. 217.
- [2] M. Ibañez-Puy, M. Vidaurre-Arbizu, J. A. Sacristán-Fernández, et C. Martín-Gómez, « Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, p. 180-191, nov. 2017.
- [3] A. Gagliano, F. Nocera, et S. Aneli, « Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period », *Energy Build.*, vol. 122, p. 131-139, juin 2016.

- 4) [4] S. Dahech, « Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude », *Cybergeo Eur. J. Geogr.*, déc. 2014.
- 5) [5] G. A. Faggianelli, « Rafraîchissement par la ventilation naturelle traversante des bâtiments en climat méditerranéen », p. 238.
- 6) [6] P. Kvoles, « CLIMA 2016 - Actes du 12e Congrès mondial REHVA », p. 12.
- 7) [7] Y. Mansouri, F. Allard, et M. Musy, « CONCEPTUAL IMPLEMENTATION OF NATURAL VENTILATION STRATEGY », p. 8.
- 8) [8] G. Escourrou, « Quelques particularités des brises marines. », *Norois*, vol. 116, no 1, p. 577-583, 1982.

Vers un Seuil limite de Référence des Consommations Energétiques dans le Bâtiment Résidentiel Existant en Algérie en vue d'une Réhabilitation Thermique ; Etat des Lieux, Démarches et Perspectives

Nouara Issaadi*¹, Aicha Boussoualim²

Ecole Polytechnique D'architecture et D'urbanisme d'Alger, Algérie

¹issaadi.no88@outlook.fr

²a_boussoualim@hotmail.com

Résumé — En Algérie, un grand nombre de logement ne répond pas aux exigences du confort thermique et d'économie d'énergie. En effet, selon l'Agence pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'Energie, plus de 200 000 logements sont construits annuellement et un parc existant qui dépasse les huit (08) millions d'unités, nécessitent une réhabilitation thermique. Ce parc représente plus de 41% de la consommation globale nationale. Cela s'explique par l'absence de texte réglementaire régissant le contrôle de l'efficacité énergétique qui entrave l'application de la réglementation thermique, et aussi, par le manque de savoir-faire et une méconnaissance du sujet par les praticiens du bâtiment.

Par ailleurs, plusieurs outils d'évaluation et d'aide à la conception ont été développés. Ces outils sont destinés aux bâtiments neufs, et ne prennent pas en considération le bâtiment existant. Aussi, ils n'établissent pas clairement un seuil limite de référence de la consommation énergétique qu'un bâtiment doit atteindre pour dire qu'il est économe en énergie. Ils permettent seulement d'évaluer l'efficacité d'une solution par rapport à une autre.

Cet article, élaboré dans le cadre de notre recherche de doctorat en cours, vise à mettre en exergue la nécessité de mettre en place un seuil de référence de la consommation énergétique dans le bâtiment résidentiel spécifique à l'Algérie. Ce seuil dont l'objectif est de présenter un étiquetage énergétique des logements, permettrait de dresser un panorama de l'efficacité énergétique du parc existant.

Une analyse de l'état des consommations énergétiques en Algérie en comparaison avec les seuils de consommation établis dans les pays méditerranéens serait effectuée. Ceci permettrait à la fin, de démontrer les efforts que l'Algérie devrait fournir sur le bâtiment existant en termes de réhabilitation énergétique.

Mots clés— Seuil de consommation, Réglementation thermique, Efficacité énergétique, Réhabilitation thermique, Bâtiment résidentiel, Algérie.

I. INTRODUCTION

La promotion des économies d'énergie, la durabilité et l'amélioration du confort thermique dans les constructions, sont parmi les problématiques importantes de nos jours. La résolution de ces problèmes, permet une plus grande économie d'énergie et permet d'améliorer la qualité de vie des usagers.

Dans cet objectif, le programme de développement d'efficacité énergétique publié par l'Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) à l'horizon 2030, s'intéresse à l'ensemble des secteurs de consommation: il s'agit du bâtiment, du transport et de l'industrie. Il vise globalement la réduction de la consommation de 9% à travers la substitution inter énergétique et l'introduction des équipements et des technologies performantes. (APRUE, 2015)

Le secteur du bâtiment est particulièrement concerné par ces engagements car il constitue un formidable gisement d'économie d'énergie et de réduction de gaz à effet de serre. En effet, la consommation d'énergie du secteur du bâtiment représente plus de 41% de la consommation globale nationale, selon une étude réalisée par l'APRUE. ("Bilan énergétique national 2017," 2018)

Selon l'Agence pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'Energie (APRUE), plus de 200 000 logements sont construits annuellement et un parc existant qui dépasse les sept (08) millions d'unités, nécessitent une réhabilitation thermique. Cela s'explique par l'absence de texte réglementaire régissant le contrôle de l'efficacité énergétique qui entrave l'application de la réglementation thermique, malgré son institution depuis l'année 2000 d'une part, et d'autre part, par le manque de savoir-faire et une méconnaissance du sujet par les praticiens du bâtiment.

De ce fait, l'adoption d'une stratégie de maîtrise de l'énergie dans le secteur résidentiel représente un enjeu

capital pour les problèmes économiques, environnementaux et sociaux.

Plusieurs outils d'évaluation et d'aide à la conception ont été développés par le centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB) Ces outils se sont traduits sous forme de trois produits:

1. Un guide sur les constructions éco-énergétiques en Algérie ;

2. Un système d'évaluation de l'efficacité énergétique basé sur un ensemble de 14 critères, qui servira de référence dans l'élaboration des cahiers des charges pour des projets de constructions devant intégrer les mesures d'efficacité énergétique ;

3. Un logiciel de calcul thermique baptisé CTBAT (calcul thermique dans le bâtiment) spécifique à l'Algérie. Ce logiciel a été développé afin de faciliter l'intégration des exigences de la réglementation thermique algérienne.

Ces outils sont non seulement destinés aux bâtiments neufs, et ne prennent pas en considération le bâtiment existant, mais n'établissent pas clairement un seuil de référence de la consommation énergétique qu'un bâtiment doit atteindre pour dire qu'il est économe en énergie. Ils permettent seulement de donner des solutions d'efficacité énergétique et d'évaluer l'efficacité d'une solution par rapport à une autre.

Contrairement à la réglementation thermique Algérienne, plusieurs pays disposent de réglementations thermiques dans les bâtiments existants. L'objectif général de ces réglementations est d'assurer une amélioration significative de la performance énergétique.

Cet article élaboré dans le cadre du développement de notre recherche de doctorat en cours, vise à mettre en exergue la nécessité de mettre en place un seuil limite des consommations énergétique dans le bâtiment résidentiel existant, spécifique à chaque région climatique en Algérie. Ce seuil sert d'indicateur direct, dont l'objectif est de, présenter un étiquetage énergétique des logements après diagnostic de performance, afin de dresser un panorama de l'efficacité énergétique du parc existant d'une part, et de procéder à la proposition de scénarios de réhabilitation énergétique, d'autre part.

Pour se faire, dans un premier lieu, nous présenterons un état des consommations moyennes dans le bâtiment en Algérie. Ensuite nous présenterons, un aperçu sur les réglementations thermiques dans l'existant et ses exigences régissant des pays méditerranéens; dont l'expérience à déjà donné ses preuves-

A la fin, une comparaison des différents critères caractérisant les réglementations présentées à la réglementation algérienne serait établie afin de démontrer les disparités et les efforts que l'Algérie devrait effectuer.

II. L'ETAT DU BATIMENT RESIDENTIEL EN ALGERIE

Le parc national de logements a atteint fin 2014, 8.325.186 logements. Il atteindra à fin 2019 un nombre de 9.900.000 logements enregistrant une augmentation de 18,92%, selon les projections de l'Office National des Statistiques (ONS).

A. Consommation Finale du Bâtiment en Algérie :

Avec une population estimée à 42.2 millions d'habitants au 1er janvier 2018, selon l'Office National des Statistiques (ONS)¹, la consommation de l'Algérie en énergie a atteint 56 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) en 2014.

La consommation énergétique en Algérie ne cesse d'augmenter chaque année, avec une progression de 10% par an, à horizon 2030-2035, toute notre production en hydrocarbures va à peine subvenir à notre propre consommation.(CDER, 2018)

Le secteur du bâtiment représente 41% de la consommation globale nationale, et de ce fait, il est le premier consommateur d'énergie en Algérie suivi du secteur des transports (33%), l'industrie (19%) et l'agriculture (7%) selon le CDER.(Portail Algérien des Énergies Renouvelables," n.d.)

La consommation énergétique moyenne annuelle d'un logement est de 1,303 TEP=11630 kilowattheure.

Cette forte consommation est due à l'explosion du parc immobilier, l'usage de matériaux modernes dans la construction qui sont très énergivores, l'application des prix bas en matière d'énergie et la non application de la réglementation thermique du bâtiment.

B. Application des Normes de Qualité et de Confort :

Malgré l'institution d'une réglementation thermique en Algérie depuis les années 2000, l'absence de texte réglementaire régissant le contrôle de l'efficacité énergétique entrave son application, cette situation a engendré un parc existant de plus de 8 millions d'unités, construit sans aucune norme de conforme thermique et d'efficacité énergétique.

En effet , le boom colossal qu'a connu l'Algérie ces dernières années en matière de constructions résidentielles notamment les programmes quinquennaux 2005-2009 et 2010-2014 qui prévoient des milliers de logements et dont la quantité a failli à la qualité. Le développement de ces logements s'est nécessairement accompagné d'un accroissement important des besoins énergétiques en matière de chauffage, de climatisation et d'électricité; car la généralisation d'un nouveau confort moderne repose sur une grande consommation d'électricité, ce qui engendre souvent des coupures d'électricité dans les heures de pointe dues à la consommation maximale.

De ce type d'habitat, découle les problèmes d'inconfort des ambiances intérieures dus à la précarité énergétique de l'enveloppe de la bâtisse: ils sont hyper consommateurs en énergie, très froids en hiver et très chauds en été. (Issaadi,n, 2016)

C. Programme National d'Efficacité Énergétique :

Le nouveau programme national d'efficacité énergétique (PNEE) lancé en 2016, vise essentiellement à réduire graduellement la forte croissance de la consommation d'énergie.

¹ Extrait du Portail Algérien des ENERGIES RENEUVABLES ; Utilisation rationnelle de L'énergie en Algérie : Quels efforts à faire et comment y parvenir ? Dans actualité du dimanche 2 août 2015.

L'adoption par le gouvernement du programme national sur l'efficacité énergétique à l'horizon 2030, réaffirme cette dernière comme priorité. La réalisation de ce programme par une diversité d'actions et de projets, devrait favoriser l'émergence, à terme, d'un marché durable de l'efficacité énergétique en Algérie.

Le programme se focalise sur les secteurs du bâtiment du transport et de l'industrie. Nous allons nous intéresser au secteur du bâtiment objet de notre article.

Dans le secteur du bâtiment, le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements tels que l'optimisation de l'orientation des bâtiments et la prise en compte de l'environnement immédiat des projets de conception.

Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eau solaires et les lampes économiques : l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie.

- **Isolation thermique des logements :**

Le programme prévoit l'isolation thermique de 100.000 logements annuellement (mur, toiture, double vitrage), permettant une économie d'énergie de 25 Millions TEP sur 30 ans (durée de vie d'un logement).

L'Etat assurera 80% des coûts d'isolation, ce plan permettra non seulement de contribuer à la généralisation des bonnes pratiques dans la conception architecturale de l'habitat mais aussi de développer une industrie locale des isolants et de promouvoir la création de bureaux d'architectures spécialisés en efficacité énergétique.

- **Lampes à basse consommation;**

Dans le domaine de l'éclairage, l'objectif est de diffuser 10 millions de lampes à basse consommation/an. En parallèle, il sera interdit d'importer les lampes à incandescence à partir de 2016 alors que l'interdiction totale de la commercialisation de ce type de lampes est prévue pour 2020.

L'Etat prendra en charge 50% du prix des lampes économiques qui pourront économiser d'ici 2030 près de 19,5 millions de TEP.

- **Chauffe-eau solaires :**

Il est prévu d'installer 100.000 chauffe-eau solaires annuellement avec un apport de l'Etat fixé à 45% du prix de référence de l'installation.

A noter que la mise en exécution de ce programme n'est pas effectuée à ce jour.

D. Projets Pilotes d'Efficacité Énergétique dans le Bâtiment :

On recense deux projets pilotes dans le domaine de l'efficacité énergétique dans le bâtiment. Il s'agit du programme Eco Bat, et de la maison pilote de Souidania .

-Programme Eco Bat ; Concerne la réalisation de 600 logements à haute performance énergétique répartis sur l'ensemble du territoire national, à travers 11 wilayas réunissant les différentes zones climatiques du territoire national et ayant comme objectifs de réaliser différentes variantes de logements bioclimatiques, en fonction de la variation des climats locaux ; favoriser l'utilisation des matériaux locaux pour la construction des logements et démontrer la faisabilité de l'économie d'énergie quelles que soient les conditions climatiques. Il consiste à optimiser le confort thermique dans ces logements tout en minimisant la consommation énergétique liée au chauffage et de climatisation par environ 40%.

Beaucoup de recherches sont entamées afin de démontrer l'efficacité de ces programmes , et en récence , la thèse de FERRADJI Kenza réalisée en 2017, dont l'évaluation de l'efficacité énergétique et de confort thermique des 80 logements Eco Bat réalisés à Blida , a démontré qu'en hiver, le modèle HPE n'assure que 9% des économies d'énergie par rapport au logement ordinaire , loin de l'objectif des 40 % fixé au départ par l'APRUE.

Concernant la saison d'été, l'appartement en HPE minimise la consommation énergétique par 80%. Les solutions proposées dans le modèle HPE de Blida restent à développer en termes de confort

Hivernal, alors que le confort estival est presque atteint.(FERRADJI, 2017)

- La maison rurale de Souidania : Réalisée par le Centre national d'étude et de recherche intégrée du bâtiment (CNERIB) et le centre de recherche des énergies renouvelables (CDER) avec des normes d'efficacité énergétique, sert de logement témoins.

Concernant la réhabilitation du parc existant, aucun projet pilote n'a été recensé à ce jour.

Concernant la réhabilitation du parc existant, aucun projet pilote n'a été recensé à ce jour.

E. La Réglementation Thermique du Bâtiment en Algérie

Afin de réglementer la conception et l'exécution des bâtiments en Algérie, une série de documents Techniques, ont été élaborés dès 1997 par le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB).

Ces documents définissent les méthodes permettant de vérifier si les solutions techniques adoptées correspondent bien aux exigences énoncées dans les textes réglementaires et législatifs, et précisent les principes généraux au cours de l'élaboration des projets de bâtiments.

En l'an 2000, ces DTR ont fait l'objet d'un décret portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs en application à la loi relative à la maîtrise de l'énergie adoptée le 28 juillet 1999.

L'application de la réglementation thermique a pris effet dès 2005 et devait permettre de réduire de 30 % la consommation d'énergie des bâtiments neufs, hors poste climatisation. Dans cette optique, un décret exécutif a été adopté en 11 janvier 2005 fixant les règles spécifiques d'efficacité énergétique applicables aux appareils fonctionnant à l'électricité, aux gaz et aux produits pétroliers.

1. *Le D.T.R. C 3.2 : Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques*

Conçu pour réduire de 25 % la consommation de l'énergie pour le chauffage des logements, ce document approuvé par arrêté ministériel, fixe les déperditions de référence à ne pas dépasser ainsi que les conventions de calcul pour le dimensionnement des installations de chauffage.

Les objectifs recherchés par les concepteurs du D.T.R. C 3-2 sont :

- La détermination des déperditions calorifiques des bâtiments ;
- La vérification de la conformité des bâtiments à la réglementation thermique ;
- Le dimensionnement des installations de chauffage des bâtiments ;
- La conception thermique des bâtiments.

Les déperditions calorifiques d'un bâtiment, telles que présentées dans le D.T.R. C3-2, sont :

- Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois
- Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois en contact avec le sol
- Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois en contact avec des locaux non chauffés
- Déperdition linéique à travers les ponts thermiques.
- Déperdition par infiltration et renouvellement d'air.

2. *Le D.T.R. C 3.4 : Règles de Calcul des Apports Calorifiques des Bâtiments*

Le DTR C 3.4 édité par le CNERIB a pour objet de fixer les méthodes de détermination des apports calorifiques des bâtiments ainsi que la méthode de vérification de la conformité à la réglementation thermique d'été des bâtiments. Il s'applique à la plupart des locaux, entre autres ceux à usage d'habitation, d'hébergement, de bureaux, d'enseignement, d'accueil, de réunion, de vente, de restauration, artisanal, etc.

Les apports calorifiques d'un bâtiment, tels que présentés dans le D.T.R. C 3-4, sont répartie en trois familles :

- Par introduction d'air extérieur (débit d'air neuf et débit d'air du aux infiltrations).
- Apports de chaleur internes (gains dus : à l'évaporation, à l'éclairage, aux appareils à gaz, aux machines électriques, aux occupants)
- A travers les parois opaques.

F. Analyse Critique de la Réglementation Algérienne

L'analyse sommaire de la réglementation thermique en Algérie fait ressortir ce qui suit :

- Absence de texte réglementaire régissant le contrôle de l'efficacité énergétique entrave l'application de la réglementation thermique ;
- Absence d'outils permettant de faciliter l'application de la réglementation thermique ;
- Absence de seuil minimum de consommation adapté à chaque zone climatique que ce soit pour le bâtiment neuf ou existant ;

-La complexité de la réglementation mise en œuvre la rendant difficile voire incompréhensible par la majorité des acteurs du bâtiment (architecte, ingénieurs, maître d'ouvrage, etc ...) ;

- Manque de savoir-faire et méconnaissance du sujet par les praticiens du bâtiment pour une application effective de la réglementation. Ceci est induit par le manque de vulgarisation auprès des bureaux d'études, des architectes et des promoteurs à travers notamment des journées techniques ;

-Non prise en considération du bâtiment existant à travers des normes de réhabilitation thermique, et ce, malgré sa part importante de consommation énergétique ;

-Absence de mesures coercitives dans l'application de la réglementation thermique.

A travers cette analyse, nous constatons que l'Algérie devrait mettre en place un dispositif réglementaire accompagné de mesures incitatives et coercitives dans le bâtiment et particulièrement, dans le parc existant, car ce dernier, représente un gisement important d'économie d'énergie d'une part et d'autre part afin d'améliorer le confort dans les bâtiments et lutter contre la précarité énergétique.

Par ailleurs, l'expérience des pays méditerranéens dans le domaine de la réglementation thermique pourrait constituer une référence pour l'Algérie afin d'accélérer la mise en place d'une démarche de réhabilitation thermique, voire énergétique.

III. APERÇU SUR QUELQUES REGLEMENTATIONS THERMIQUES DANS LE BATIMENT ET LEURS LIMITES DE CONSOMMATIONS ENERGETIQUES DANS LES PAYS MEDITERRANEENS

L'objectif des réglementations thermiques est de fixer des limites maximales de consommation énergétique des bâtiments neufs, mais aussi existants, et ce pour le chauffage, l'éclairage, la ventilation, la production d'eau chaude sanitaire et la climatisation.

Afin de démontrer la nécessité de mettre en place un seuil de consommation énergétique dans le bâtiment existants en Algérie, en vu d'une réhabilitation thermique, voire énergétique, une analyse des réglementations thermiques du bâtiment régissant les pays méditerranéen semble nécessaire afin de s'inspirer de ces pays dont l'expérience à déjà donné ses résultats.

A. La Réglementation Thermique en Espagne

La réglementation nationale espagnole du bâtiment repose sur le Code technique de la Construction (Código Técnico de la Edificación, CTE). Ce dernier s'applique au niveau national. Elle concerne tous les bâtiments neufs ainsi que les bâtiments de plus de 1000 m² pour lesquels est effectuée une réhabilitation de plus de 25% de la surface.

Les principales exigences :

La réglementation n'impose pas de limite chiffrée quant à la consommation totale en énergie primaire du bâtiment. Elle propose deux méthodes pour les limiter les besoins énergétiques du bâtiment :

Une méthode simplifiée : elle s'appuie sur le contrôle indirect des besoins énergétiques à travers la limitation des paramètres caractéristiques de l'enveloppe tel que les

coefficients de transmission des parois en contact avec l'extérieur et le facteur solaire des vitrages en fonction de la zone climatique étudiée. Le coefficient de transmission thermique des vitrages varie entre 1,9 et 5,7 W/m².K et le facteur solaire des fenêtres varie de 0,29 et 0,6 en fonction de l'orientation, de la charge thermique interne (faible ou élevée), la surface des fenêtres et de la zone climatique (CTE, 2013). Concernant l'humidité relative moyenne mensuelle, la réglementation exige de ne dépasser les 80%. Les bâtiments doivent être équipés de systèmes d'éclairage et de production énergétique en adéquation avec les besoins des usagers en utilisant des systèmes de contrôles ajustés en fonction des scénarios d'occupation. De plus, l'utilisation de sources d'énergies renouvelables est devenue obligatoire pour produire de l'eau chaude sanitaire (pour les bâtiments résidentiels et tertiaires), ou pour produire de l'énergie électrique dans les bâtiments tertiaires.

La deuxième méthode, dite générale, s'appuie sur l'évaluation des besoins énergétiques à travers une comparaison avec un bâtiment de référence. La modélisation se fait via le logiciel LIDER (gratuit). Les températures de consignes pour l'hiver et l'été sont respectivement 21 et 26°C. (Romani, 2016)

S'agissant des mesures de renforcement de son application, on citera le plan d'action (Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE)) 2008-2012 promulgués par le Ministère de l'Economie et du Tourisme qui préconise des aides pour des rénovations thermiques et l'amélioration de la performance énergétique des installations. (POCARD Ronan, 2012)

Par ailleurs, on recense un petit nombre de bâtiment certifiés selon le label national Verde, attribué par le Green Building Council Espagne (GBCe) ou selon des labels internationaux (BREEAM et son équivalent d'origine américaine, LEED). Des outils basés sur VERDE ont été développés, que ce soit pour la réhabilitation ou pour le neuf. Un certain nombre de professionnels du secteur ont été formés à l'utilisation de ces outils et du label en général. À l'échelle régionale, l'institut de la construction de la province de Valence (Instituto Valenciano de la Edificación) a créé le Perfil de calidad, label assorti d'exigences minimales en matière d'économies d'énergie et d'utilisation durable des ressources naturelles. Le label Perfil de calidad s'applique principalement au logement social ; environ 2 000 logements sont labellisés ou en cours de labellisation. (Commission Environnement et Construction Durable, 2013)

B. La Réglementation Thermique au Maroc

La Règlements Thermique de Construction au Maroc (RTCM) fixe les niveaux de performance pour les composantes de l'enveloppe du bâtiment selon deux approches : performancielle et prescriptive.

Ces niveaux de performance dépendent du type de bâtiment concerné mais également du zonage climatique établi. Le RTCM définit également les performances énergétiques minimales des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation – CVC, permettant ainsi de promouvoir des équipements efficaces et de qualité supérieure.

1. Approche Performancielle

Les spécifications techniques minimales des performances thermiques des bâtiments sont fixées par le RTCM conformément à l'approche performancielle suivante:

TABLE I
 RESIDENTIEL: SPECIFICATION TECHNIQUES MINIMALES KWH/M²/AN

Zone climatique		Résidentiel
Agadir	Z1	40
Tanger	Z2	46
Fès	Z3	48
Ifrane	Z4	64
Marrakech	Z5	61
Errachidia	Z6	65

2. Approche dite Prescriptive

Consiste à fixer les spécifications techniques exprimées, pour chaque type de bâtiment et chaque zone climatique, sous forme de coefficients maximaux de transmission thermique surfacique des toitures, des murs extérieurs, du plancher sur pilotis, des baies vitrées ainsi que du facteur solaire équivalent (incluant l'effet des protections solaires) des baies vitrées et à la résistance thermique (R) des planchers, en fonction du rapport du taux global des baies vitrées .

L'utilisation des vitrages teintés, réfléchissants ou spéciaux est exigée lorsque les protections solaires extérieures ne peuvent être envisagées ou sont insuffisantes. Cette approche est applicable seulement dans le cas où le TGBV (Taux Global des Baies Vitrées) est inférieur à 45%. Ces spécifications techniques peuvent être calculées par les formules statiques facilement programmables sous Excel ou par des outils informatiques comme le logiciel BINAYATE Prescriptive développée par l'ADEREE². (Romani, 2016)

C. Réglementation Thermique en Tunisie

La mise en place d'une réglementation thermique en Tunisie, relève du projet régional de la réglementation thermique maghrébine de bâtiment (RTMB) en 1991.

Cette réglementation a été mise en place d'une manière progressive avec une approche participative.

C'est jusqu'à 2008 que la réglementation thermique en Tunisie a été publiée par l'Arrêté du 23 juillet 2008 pour les constructions à usage de bureau (ANME, 2008) et en 2009 , par l'Arrêté du 01 juin 2009 pour les Bâtiments à usage résidentiel (ANME, 2009). Elle vise à limiter les besoins énergétiques du bâtiment liés au conditionnement (Chauffage et Refroidissement), et améliorer les caractéristiques thermiques de l'enveloppe. Deux approches sont donc proposées :

1. Approche Performancielle

Elle consiste à fixer les spécifications techniques minimales en termes de performances thermiques du bâtiment. Celles-ci sont évaluées à travers les besoins énergétiques annuels du bâtiment liés au confort thermique. Ces besoins correspondent aux besoins calorifiques et/ou frigorifiques du bâtiment

² Agence de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique

indépendamment du type d'installations de chauffage et/ou de refroidissement utilisées. Ils correspondent à la somme annuelle des sollicitations thermiques qu'impose le bâtiment à ses installations pour satisfaire les besoins de confort thermique de ses occupants.

Les performances thermiques d'un bâtiment objet du présent arrêté sont classées selon les besoins énergétiques annuels du bâtiment liés au confort thermique (BEcTh) conformément au tableau suivant :

TABLE II
 RESIDENTIEL: BESOINS ENERGETIQUES ANNUELS kWh/M²/AN

Classes de performances thermiques du bâtiment	Besoins énergétiques spécifiques annuels (BEcTh) en kWh/m ² .an
classe 1	BEcTh = 36
classe 2	36 < BEcTh = 41
classe 3	41 < BEcTh = 46
classe 4	46 < BEcTh = 51
classe 5	51 < BEcTh = 60
classe 6	60 < BEcTh = 72
classe 7	72 < BEcTh = 87
classe 8	BEcTh > 87

Pour ce type de bâtiments, la réglementation exige un niveau de performance minimal de classe inférieure ou égale à 5.

Un travail important a été mené dans le cadre du processus de promulgation de la réglementation afin de bien préparer les conditions de son applicabilité et sa durabilité, à travers le renforcement de capacité des différents acteurs de la construction (administration, concepteurs, architectes, bureaux de contrôle, promoteurs et grand public).

Par ailleurs, les nouvelles dispositions réglementaires de 2008 (loi n°2009-7 et décret n°2009-362 du 9 février 2009) ont instauré une obligation d'audit sur plan pour les grands projets de bâtiments neufs, couvrant tous les systèmes énergétiques du bâtiment.

-Tous les bâtiments à usage de bureau (2008) et les bâtiments à usage résidentiel collectif (2009) sont assujettis à des spécifications thermiques minimales. L'application de cette réglementation est liée à l'octroi de l'autorisation de bâtir. Les textes relatifs aux bâtiments à usage de santé et les bâtiments à usage touristiques sont en cours de promulgation.(Hanchi, 2014)

2. Approche Prescriptive

Elle consiste à fixer les spécifications techniques minimales en terme de propriétés thermo physiques de l'enveloppe du bâtiment et ce, en fonction de la zone climatique et du taux des baies vitrées des espaces chauffés et/ou refroidis ainsi que leur répartition sur les différentes orientations. L'approche prescriptive ne s'applique pas aux bâtiments résidentiels collectifs composés d'un rez-de-chaussée et de quatre étages ou plus. Elle ne s'applique pas également dans le cas où le taux global des baies vitrées est supérieur à 45% de la surface des murs extérieurs et/ou sa distribution sur les orientations «

Est » + 45° et les orientations « Ouest » + 45° est supérieure à 35%.

Par ailleurs, Afin de compléter la réglementation thermique actuelle, un programme d'isolation thermique des toitures des maisons individuelles existantes ou neuves est en cours de mise en place par l'ANME, qui ne vise pas ce segment.

Le programme devrait se dérouler en deux phases :

- Une phase pilote 2010-2011 : 10.000 logements, soit environ 1 million de m² de toitures,
- Une phase de diffusion 2012-2016 : 100.000 logements, soit 10 millions de m² de toitures.

A rappeler que les simulations réalisées montrent que l'isolation des toitures permet de réduire en moyenne de 20 % les besoins en climatisation et de 25 % les besoins en chauffage dans le contexte tunisien.

Le programme est basé sur un mécanisme financier à deux composantes :

- L'octroi d'une subvention de 20 % du coût de l'isolation, pour ramener le temps de retour pour le consommateur à moins de 7 – 8 ans,
- L'octroi d'un crédit sur 7 ans pour le financement du reste du montant, ce qui permet d'éliminer la barrière de l'investissement initial.

Un programme d'accompagnement du contrôle de qualité, de formation et d'habilitation des opérateurs est prévu également dans ce cadre.(Rafik Missaoui, Plan Bleu and Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM, 2010)

D. Réglementation Thermique en France

La réglementation thermique 2012 dite « RT 2012 » est l'une des réglementations les plus ambitieuses d'Europe, car elle pose des objectifs ambitieux en matière d'efficacité énergétique. En effet cette réglementation s'est fixée un maximum d'énergie consommée à 50 kW hep/(m².an) en moyenne, divisant ainsi par 3 le niveau maximal de consommation de la RT 2005. Cette valeur peut être modulée à la hausse ou à la baisse suivant la zone climatique et l'altitude à laquelle le bâtiment se trouve.

Dans le but de concrétiser cet objectif d'efficacité, la RT2012 impose des normes élevées en matière d'isolation et de système énergétique, et exige aussi une réduction des besoins dès la conception du projet avec des objectifs à atteindre en matière de conception bioclimatique et de confort d'été.

Cette réglementation, s'applique, depuis le 1er janvier 2013, à tous les bâtiments neufs, qu'ils soient à usage d'habitation ou à usage tertiaire. ("Comprendre la RT 2012 - Plan Bâtiment Durable," 2013)

S'agissant de la rénovation des bâtiments existants, la loi Grenelle I avait pour objectif de réduire les consommations d'énergie du parc des bâtiments existants d'au moins 38 % d'ici à 2020. À cette fin, l'État s'est fixé comme objectif la rénovation complète de 400 000 logements chaque année à compter de 2013.

Ainsi, L'objectif de la réglementation thermique des bâtiments existants (RT existant) est d'apporter une réelle

amélioration au niveau de la performance énergétique et aussi la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Cette réglementation définit une performance énergétique minimale, pour chaque élément (ventilation, fenêtre, climatisation, chauffage...) changé ou installé, et concerne toutes les constructions existantes, qu'elles soient résidentielles ou non, et. Elle se compose de deux volets : « RT globale » et « RT élément par élément ». (Romani, 2016)

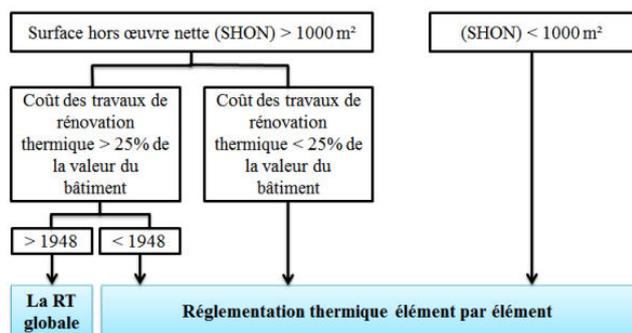


Fig. 2 Les conditions d'application de la RT existant

1. Les Exigences de la RT Globale

La RT globale s'applique dans le cas d'une rénovation lourde. Elle concerne les bâtiments dont :

- La surface hors œuvre nette (SHON) est supérieure à 1000m² ;
- Le coût des travaux de rénovation « thermique » décidés par le maître d'ouvrage est supérieur à 25% de la valeur hors foncier du bâtiment
- La date d'achèvement est postérieure au 1er janvier 1948.

Dans les logements, la consommation d'énergie pour le chauffage, le refroidissement et l'eau chaude sanitaire après les travaux devra être inférieure à un maximum qui pourra être modulé entre 80 et 165 kWh/ (m².an) en fonction du type d'installations et du climat.

2. Les Exigences de la RT Elément par Elément :

La RT « élément par élément » s'applique dans le cas des bâtiments existants résidentiels ou tertiaires soumis au remplacement d'un élément tels que les chaudières, les fenêtres, les isolations, les radiateurs, les ballons de production d'eau chaude, les climatiseurs. Elle s'applique à tous les bâtiments auxquels la RT globale ne s'applique pas.

Lorsque les maîtres d'ouvrage remplacent ou installent un élément dans le bâtiment, tel que l'isolation, un équipement de chauffage, de production d'eau chaude sanitaire, de refroidissement, de ventilation, ou, pour les bâtiments tertiaires, un équipement d'éclairage, la RT existant les oblige à installer des produits dont la performance énergétique doit être supérieure ou égale aux caractéristiques données dans l'arrêté du 3 mai 2007. Dont les seuils ont été rehaussés par l'arrêté du 25 mars 2017 entrée en vigueur en janvier 2018.

IV. COMPARAISON DES DIFFERENTES REGLEMENTATIONS THERMIQUES DES PAYS MEDITERRANEENS AVEC LA REGLEMENTATION THERMIQUE ALGERIENNE

A l'issus de notre aperçu des différentes réglementations dans la région méditerranéenne, une comparaison est établie avec la réglementation algérienne, à base de critères préalablement établis (inspirés du mémoire institué ;La prise en charge de la réglementation thermique dans le permis de construire, Benlaouar, 2016)

TABLE III
 COMPARAISON DES DIFFERENTES REGLEMENTATIONS THERMIQUES

Critères	Algérie	France	Tunisie	Espagne	Maroc
Existence de la RT	✓	✓	✓	✓	✓
L'application effective de la RT dans le neuf	X	✓	(Obligatoire depuis 2010)	✓	✓
Application de la RT dans l'existant	X	✓	X	Equipement et bâtiment résidentiel de plus de 1000 m ² pour lesquels est effectuée une réhabilitation de plus de 25% de la surface de l'enveloppe	X
Consommation maximale d'énergie primaire (CEP)* Dans le neuf KWhEP/m ² .	X	50 KWhEP/m ² .an Selon la zone géographique et la surface de la bâtisse	51 < BECTh = 60	-N'impose pas de limite chiffrée des consommations. -Limitation des paramètres caractéristiques de l'enveloppe. -impose l'utilisation d'énergie solaire pour l'eau chaude sanitaire.	40<kWh/m ² .an>65 selon la zone climatique et le type de bâtiment étudié.
Consommation maximale d'énergie primaire (CEP) Dans l'existant KWhEP/m ² .	X	1-RT global : Entre 80 et 165 kWh/ (m ² .an) en fonction du type d'installations et du climat. 2--RT, élément par élément	X	X	X
Existence de mesure de renforcement de son application	X	- Attestation de prise en compte au dépôt de permis de construire - Attestation à l'achèvement des travaux	Attestation de prise en compte au dépôt de permis de construire	✓	X
Organisme	X	Bureau de	Centre	✓	En

de contrôle et certification RT		contrôle - Organisme de certification	technique de bâtiment (CTB)		cours
Sanction de non application	X	Rejet de la demande de PC/travaux seront interrompus. -Une amende est appliquée -Une peine de prison de 6 mois (en cas de récidive)	X	Amendes	
Sensibilisation et diffusion d'information	X	Notice d'utilisation lors de livraison de projet de BC -Réunion d'information des professionnels de bâtiment	Communication au grand public : séminaires, colloques...etc -Implication forte des professionnels : dans les projets pilotes,...etc -...etc	✓	
Subvention et réduction de taxes	X	✓	✓	X	X
Projets pilotes (bâtiments neufs)	2 projets : (ECO-BAT) et maison rurale	Plusieurs projets ont été réalisés	44 opérations de démonstration réalisées	Plusieurs projets ont été réalisés	✓
Projets pilotes (Réhabilitation/Rénovation)	X	300 000 logements sont rénovés par an		160 000 logements sont rénovés par an	X

A travers cette analyse, nous constatons que la réglementation thermique Algérienne est très en retards quand aux moyens de renforcement de son application, comparée aux pays méditerranéens notamment la France, la Tunisie et l'Espagne.

La France étant le pays qui présente la réglementation la plus ambitieuse, vu les mesures de renforcement de son application à savoir les mesures contraignantes, les mesures incitatives et la présence de projets pilotes, que ça soit dans le bâtiment neuf ou bien l'existant.

La France, à travers son seuil de consommation établi dans le bâtiment existant, a permis de faciliter la mise en place de la réglementation thermique dans les opérations de réhabilitation et de rénovation énergétique.

Cependant, en Algérie, afin de procéder à l'établissement de seuil de consommation minimal dans le parc du bâtiment résidentiel existant en vue d'une réhabilitation thermique, il est recommandé ce qui suit :

1- Dans un premier temps, de procéder à la caractérisation du bâtiment existant selon plusieurs critères (zone climatique, altitude, forme du bâtiment, architecture, composition des

parois, type de chauffage et de climatisation, orientation, surfaces des parties opaques et vitrées ...);
 2-Etablir un guide comportant des scénarios de réhabilitation selon la spécificité de chaque bâtiment en se basant sur les techniques et matériaux existants dans chaque contexte ;
 3- Etablir les consommations moyennes des bâtiments selon la région climatique, altitude et surface, et définir un seuil limite de consommation en se basant sur un pourcentage de réduction des consommations ;
 4-En se basant sur les niveaux de performance recherchés préalablement établis, définir la résistance thermique des enveloppes des bâtiments selon leurs régions climatiques, l'altitude et leurs surfaces de contact (enveloppe) ;
 5-Le renforcement de capacité des différents acteurs de la construction (administration, concepteurs, architectes, bureaux de contrôle, promoteurs et grand public) ;
 6- Instaurer une obligation d'audit sur plan pour les grands projets de bâtiments neufs, couvrant tous les systèmes énergétiques du bâtiment ainsi que l'institution de l'obligation de ravalement thermique pour tous les bâtiments existants abritant des installations de chauffage central et/ou de climatisation ;
 7-Mise en place d'entreprises de service énergétique ;
 8-Elaboration de projet pilote dans le domaine de la réhabilitation ou de la rénovation thermique des bâtiments
 9- Une procédure de contrôle et de sanction pour assurer l'effectivité de la réglementation thermique dans l'existant.
 10- Mettre en place des mécanismes de financement spécifiques combinant de manière optimale subventions publiques à l'investissement et crédits bancaires à des conditions acceptables pour le consommateur final, dans une optique d'un développement gagnant-gagnant entre les acteurs.

V. CONCLUSIONS

Le secteur du bâtiment constitue un enjeu énergétique important pour l'Algérie. Le scénario tendanciel montre en effet une forte augmentation prévisible de la consommation de ce secteur sous le double effet de la croissance du parc de logements, et de l'augmentation de la consommation des ménages du fait de l'amélioration de leurs conditions de vie.

Dans cet article, nous avons présenté le contexte énergétique en Algérie, qui a fait ressortir un constat très critique dans le secteur du bâtiment, où la construction sans aucune norme d'efficacité énergétique et de confort thermique, a engendré un énorme parc existant conçu sans aucune norme de confort, et constitue de ce fait, le premier secteur de consommation énergétique en Algérie. La nécessité d'adopter des mesures permettant de réduire ces consommations énergétiques dans ces bâtiments nous semble incontournable.

Afin de répondre à la problématique de la nécessité pour l'Algérie d'adopter un seuil de consommation énergétique minimum dans l'existant à l'instar des pays méditerranéens (France, Espagne, Tunisie), et de mettre en place un cadre légal d'application de mesures afin de procéder à la réhabilitation du parc neuf et existant, un aperçu des différentes réglementations thermiques existantes à l'échelle régionale (La méditerranée), a été développé. Une comparaison des différentes réglementations avec la réglementation algérienne nous démontre que l'Algérie

devrait faire un effort considérable dans le domaine de la réglementation dans le bâtiment existant afin de remédier à la situation, et la mise en place d'un seuil minimum de consommation énergétique semble la première étape à franchir afin de procéder à la réhabilitation thermique dans le bâtiment en Algérie et à l'adoption d'une réglementation thermique dans l'existant, car cela permettrait à court terme :

- De développer en amont, un diagramme de performance énergétique qui servira de référence aux bureaux d'étude pour classer les bâtiments résidentiels selon leur catégorie de performance.
- Ensuite, un référentiel de solutions de réhabilitation basé sur la catégorie du bâtiment serait développé . a travers une méthode d'aide à la décision multicritère qui permettra d'adopter les choix optimaux. (l'un des objectifs de notre recherche de doctorat en cours) ; cela, faciliterait aux praticiens du bâtiment le choix de la mise en place d'une solution de réhabilitation par rapport à une autre, selon le seuil de performance recherché, afin d'améliorer le confort thermique et réduire la consommation énergétique.

Et à Long terme de :

- Développer une filière industrielle qui doit s'adapter, notamment proposer des matériaux innovants, des isolants, des pompes à chaleur adaptées au collectif,...etc
- Généraliser les bâtiments basse consommation.

Par ailleurs, il serait intéressant d'adapter et de réajuster l'application CT BAT prévu pour le bâtiment neuf, laquelle est basée sur la réglementation thermique algérienne, et ce, à travers une extension du logiciel permettant ainsi, de définir une étiquette énergétique d'une construction existante et de proposer des solutions adaptées à chaque zone climatique, un des objectifs de notre recherche de doctorat en cours.

REFERENCES

- ANME, 2012. Rapport plan d'action visant le renforcement de l'application de la réglementation thermique des bâtiments en Tunisie.
- APRUE, 2015. - Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030.
- Bilan énergétique national 2017, 2018.
- CDER, 2018. Débat sur l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment - Algérie Eco [WWW Document]. URL <https://www.algerie-eco.com/2018/01/19/organise-oxxo-cder-debat-lefficacite-energetique-secteur-batiment/> (accessed 12.9.18).
- Commission Environnement et Construction Durable, 2013. Énergie, environnement : comment font nos voisins Européens : FFB [WWW Document]. URL http://www.ffbatiment.fr/federation-francaise-du-batiment/laffb/mediatheque/batimetiers.html?ID_ARTICLE=1929 (accessed 12.10.18).
- Comprendre la RT 2012 - Plan Bâtiment Durable [WWW Document], 2013. URL <http://www.planbatimentdurable.fr/comprendre-la-rt-2012-r174.html#Elaboration> (accessed 12.10.18).
- FERRADJI, K., 2017. ÉVALUATION DES PERFORMANCES ÉNERGÉTIQUES ET DU CONFORT THERMIQUE DANS L'HABITAT : Cas des logements HPE de l'OPGI de Blida.
- Hanchi, F., 2014. 22e Assemblée annuelle du MEDELEC Politique de l'Efficacité Énergétique en Tunisie 22.
- Issaadi, Nouara, 2016. Contribution à la réhabilitation thermique d'un immeuble collectif Essai d'évaluation de la conformité à la réglementation thermique en Algérie (Mémoire de Master). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Tizi ouzou.
- POCARD Ronan, 2012. Evaluation des performances énergétiques de l'habitat participatif en France et en Espagne.
- Portail Algérien des Energies Renouvelables, 2018. Energie : Le secteur du bâtiment représente plus de 40% de la consommation nationale globale selon le CDER - [WWW Document]. URL <https://portail.cder.dz/spip.php?article6315> (accessed 12.9.18).
- Rafik Missaoui, Plan Bleu, Centre d'Activités Régionales PNUE/PAM, 2010. Energie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée _etude_batiment_tunisie.pdf [WWW Document]. URL https://planbleu.org/sites/default/files/publications/2-6-fr_etude_batiment_tunisie.pdf (accessed 11.30.18).
- Romani, Z., 2016. Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique 261.

Production Décentralisée de l'Énergie Électrique à Partir d'un Système Hybride (PV/PAC)

Mimi Belatel

Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, Faculté des Sciences de la Technologie
Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie
belatelmimi2002@yahoo.fr

Résumé— La production décentralisée de l'énergie électrique attire de plus en plus et constitue pour certaines entreprises une forme demandée de la production d'électricité dans le futur. Les systèmes hybrides de types photovoltaïques, piles à combustibles (PV/PAC) font valoir des arguments fort qui pourraient permettre à cette technologie de s'imposer dans les applications de production décentralisée d'énergie. Dans ce contexte, cet article est basé sur la production de l'énergie électrique à partir d'un système hybride de type (PV/PAC) pour alimenter une charge DC.

Mots-clés — Production décentralisée, Énergie électrique, PV, PAC, DC.

I. INTRODUCTION

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer, il aura fallu la produire, en général dans les unités de production d'électricité de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Ce qui représente un lourd fardeau financier pour la fourniture de l'électricité dans les sites isolés. Installer des lignes électriques sur des centaines de kilomètres ne pourra pas résoudre ce problème! [1].

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire. Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité [2].

Un élément nouveau est apparu dans la définition de la branche du thermique, l'interdisciplinarité naturelle de cette branche est maintenant intégrée par la prise en compte des différents couplages, l'exemple de la pile à combustible à membrane échangeuse de protons PEMFC présente le couplage (chaleur/charges électriques).

Aussi, la pile PEMFC a récemment attiré une attention significative comme générateur d'énergie potentiel dans des applications multiples, et de nombreux avantages énergétiques et environnementaux sont attribués à cette technologie, Toutefois, certains problèmes techniques tels que la gestion de la chaleur et de l'eau dans la cellule, le module de Stack et le système de cette pile PEMFC restent à surmonter pour convaincre les principaux acteurs de l'intérêt du développement d'une économie de l'hydrogène. En réalité, les piles à combustible sont formées d'un empilement de cellules élémentaires (Stack) connectées en série afin d'obtenir des puissances plus élevées. Les Stacks peuvent être composés au maximum d'une centaine de cellules, une augmentation du nombre de cellules engendre des difficultés pour la gestion thermique [3]. Dans ce travail l'alimentation de l'électrolyseur est assurée par une source à base de panneaux photovoltaïques, ces derniers sont couplés aux (PAC).

II. MODELISATION ENERGETIQUE

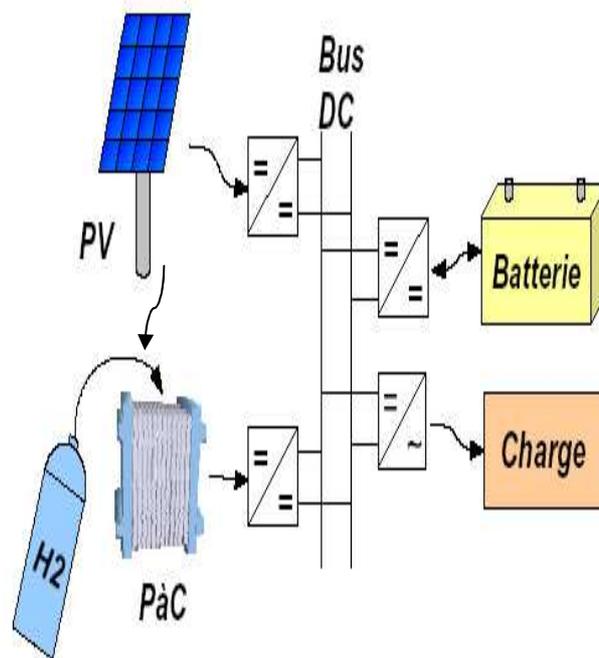


Fig. 1. Système Hybride (PV/PAC)

Le système hybride (PV/PAC) est composé d'un générateur photovoltaïque (PV) et également d'une pile à combustible (PAC) à membrane échangeuse de protons, d'un réservoir d'hydrogène, un électrolyseur et des batteries [4].

A. Modélisation des Panneaux Photovoltaïques

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus encourageante (gratuite) et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque est le résultat d'une transformation directe de la lumière du soleil en électricité au moyen des cellules PV. Elles sont essentiellement constituées d'une jonction PN [5].

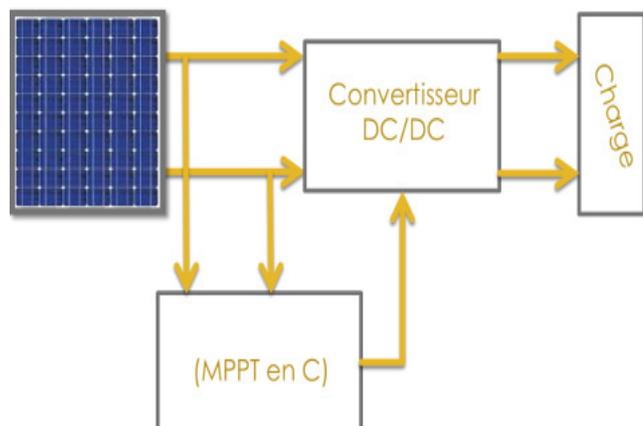


Fig. 2. Chaîne de conversion photovoltaïque

Un réseau de cellules solaires transforme l'énergie solaire en une quantité utilisable de courant continu (DC).

La cellule photovoltaïque ou encore photopile qui est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque, se compose de matériaux semi-conducteurs. A l'heure actuelle, fondamentalement, trois types de technologies sont employés dans la production des cellules solaires: silicium monocristallin, polycristallin et amorphe, avec des rendements qui s'étendent de 15%, 13% et 7% respectivement. Elle transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Elle est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. Cette transformation est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule. Les cellules solaires sont connectées en série pour augmenter la tension de sortie. De même, les cellules en parallèle donneront un courant plus élevé [6].

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la Fig. 3, par un générateur de courant, une diode et deux résistances R_s et R_{sh} .

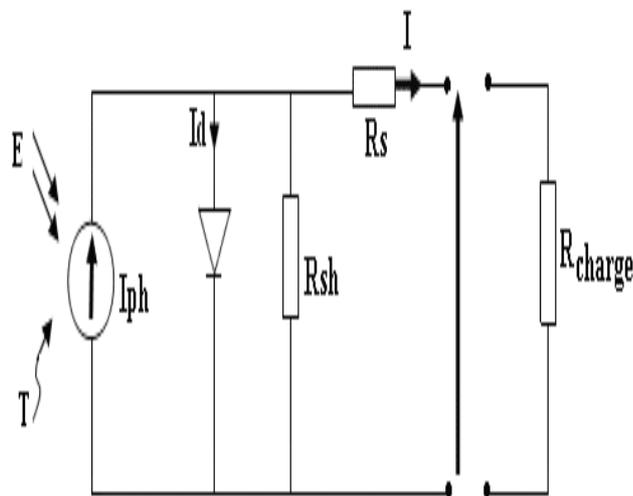


Fig. 3. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire se met sous la forme mathématique suivante:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(V + R_s I)}{U_T}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}}\right) \quad (1)$$

Le photo-courant I_{ph} est créé dans la structure par une partie du rayonnement absorbé:

$$I_{ph} = \left[I_{sc}(T_1, E_1) + K_i(T_c - T_1) \right] \frac{E}{E_1} \quad (2)$$

Le courant de saturation inverse de la diode I_s est donné par:

$$I_s = I_{rs}(T_1, E_1) \left(\frac{T_c}{T_1}\right)^3 \exp\left(\frac{E_g}{\frac{U_T}{T} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_c}\right)}\right) \quad (3)$$

avec :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}(T_1, E_1)}{\exp\left(\frac{qV_{co}}{N_s AKT_c}\right) - 1} \quad (4)$$

$$U_T = \frac{AKT_c}{q} \quad (5)$$

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max} , V_{max}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{sc} et tension comprise entre 0 et V_{co}). Donc la puissance fournie par la cellule est donnée par le produit ($V \times I$); c'est à dire:

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

Le rendement est donné par le rapport de la puissance électrique maximale générée à la puissance du rayonnement solaire incident:

$$\eta_c = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{P_{solaire}} \quad (7)$$

- q : charge de l'électron, 1.602×10^{-19} C.
- K : la constante de Boltzman, 1.381×10^{-23} J/K.
- A : facteur d'idéalité.
- U_T : tension thermique.
- V : tension à la borne de la diode.
- E_1 : insolation de référence de la cellule ($=1000 \text{ W/m}^2$).
- T_c : température de la cellule en kelvin.
- $K_i = 0.0017 \text{ A/}^\circ\text{C}$, le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule.
- I_{sc} : courant de court circuit de la cellule à 25°C et 1000 W/m^2 .
- I_{rs} : courant de saturation de la cellule à une température et un rayonnement solaire de référence.
- N_s : nombre des cellules en série du PV.
- R_s : résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).
- R_{sh} : résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant-tension au point I_{sc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$).

Les caractéristiques non linéaires I-V et P-V de la cellule solaire qui présente comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température, est montrée sur la figure suivante:

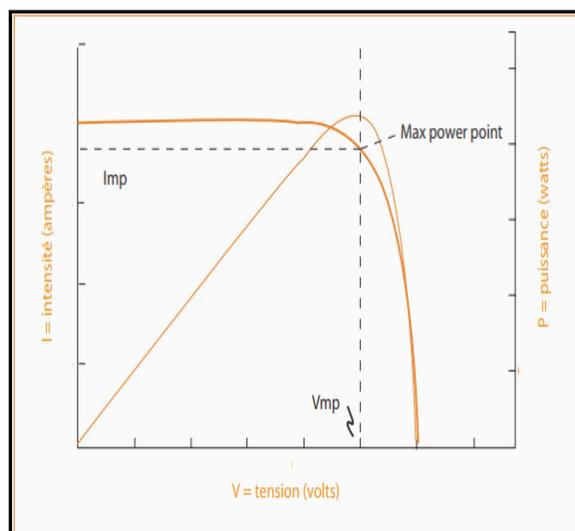


Fig. 4. Caractéristiques de la cellule solaire

Un module photovoltaïque où les cellules sont connectées en parallèle " N_p " est suffisant pour augmenter le courant du générateur. Pour obtenir une augmentation de la tension du générateur on associe " N_s " modules en série. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter le système photovoltaïque en rangées de panneaux séries et parallèles pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque [7-15].

TABLEAU I
 CARACTERISTIQUES DU PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE

Paramètres du panneau photovoltaïque	Valeurs
P_{max}	60 W
V_{co}	21,1 V
I_{sc}	3,8 A
V_{max}	17.1 V
I_{max}	3.5 A
Longueur	1080 mm
Largeur	290 mm
Epaisseur	54 mm
Poids	7 Kg
E_r	1000 W/m^2
T_r	25°C
R_s	0.132Ω
R_{sh}	25Ω
ff	0.7665
Nombre de cellule	36

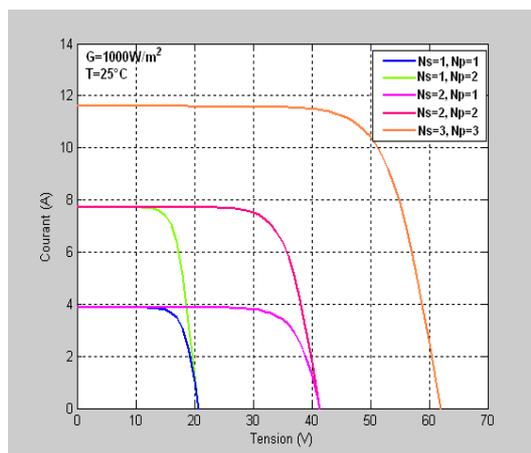


Fig. 5. Caractéristiques courant-tension d'un groupement PV

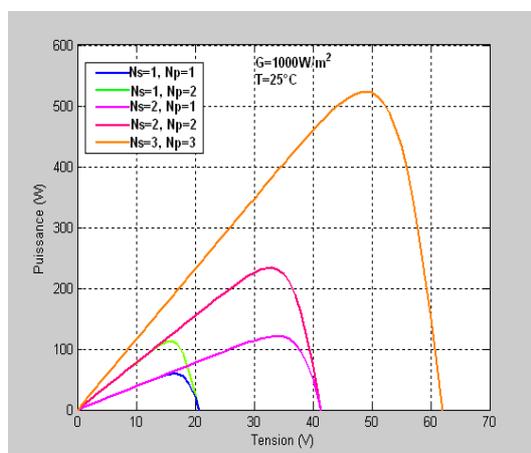


Fig. 6. Caractéristiques puissance-tension d'un groupement PV

B. Modélisation des Piles à Combustibles

Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé:

L'anode: (où se passe l'oxydation) est alimentée en combustible (H_2 , CH_3OH ,...), selon la réaction d'oxydation suivante:



La cathode: (où se passe la réduction) est alimentée en comburant (O_2 , air,...), selon la réaction de réduction suivante:



Catalyseur: pour que les deux demi-réactions soient possibles, il faut un catalyseur (c'est-à-dire un composé capable d'augmenter la vitesse de réaction, sans être consommé par lui-même.

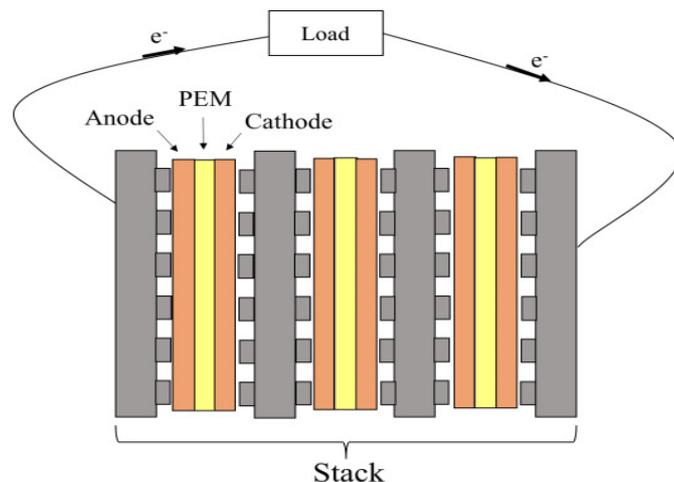


Fig. 7. Pile à combustible

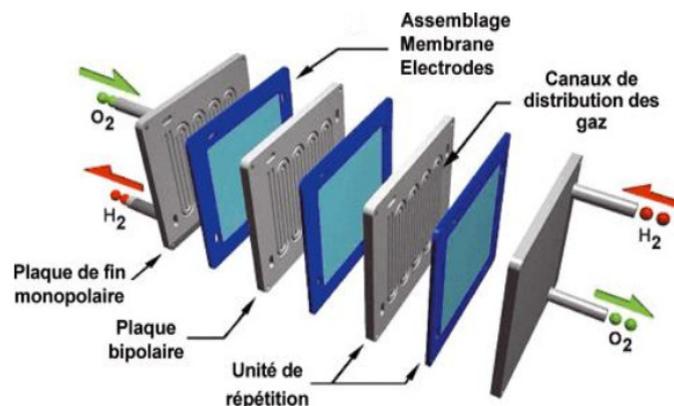


Fig. 8. Schéma éclaté du Stack d'une pile à combustible

Le potentiel réel global de la pile à combustible PEMFC, est donné par l'équation:

$$U_{PAC} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc} \quad (10)$$

La modélisation en statique d'une pile à combustible PEM est basée sur l'expression de la tension en fonction du courant débité. Partant de la tension idéale issue de l'équation (11) de Nernst où apparaissent les conditions de fonctionnement en température, pression et composition du gaz:

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 T^{-3} * (T - 298,15) + 4,31 * 10^{-5} * T * \left[\ln \left(\frac{P_{H_2}^*}{P_{O_2}^*} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(P_{O_2}^* \right) \right] \quad (11)$$

La relation entre les pertes d'activations et la densité de courant est exprimée dans l'équation suivante:

$$V_{act} = \xi_1 + \xi_2 T + \xi_3 T \ln(C_{O_2}^*) + \xi_4 T \ln(I_{PAC}) \quad (12)$$

L'expression de la polarisation ohmique s'exprime par la relation (13) comme suit:

$$V_{ohm} = \frac{I_{PAC}}{A} \left[\frac{1816 \left[1 + 0.03 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) + 0.062 \left(\frac{T}{303} \right)^2 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\lambda_{H_2O/ISO-3} - 0.6343 \left(\frac{I_{PAC}}{A} \right) \right] \exp \left[4.18 \left(\frac{T-303}{T} \right) \right]} + 1 + A R_c \right]$$

$$V_{conc} = -B \left(1 - \frac{J}{J_{Max}} \right) \quad (13)$$

Le rendement électrique η_{elec} d'une pile à combustible est défini comme suit:

$$\eta_{elec} = \frac{U_{PAC}}{1,48 V} \quad (\text{eau liquide}) \quad (14)$$

$$\eta_{elec} = \frac{U_{PAC}}{1,23 V} \quad (\text{vapeur d'eau}) \quad (15)$$

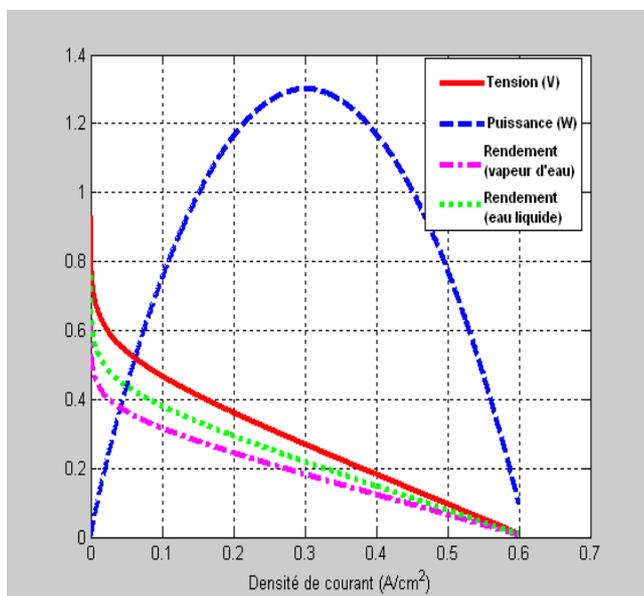


Fig. 9. Caractéristiques de la pile à combustible

Où 1,48V et 1,23V correspondent aux tensions qui devraient être obtenues si le système était efficace à 100%. Ainsi, plus la tension de la pile est élevée, le rendement est meilleur en électricité. Comme tout système, l'énergie non convertie en électricité est perdue sous forme de chaleur, à l'inverse, plus la tension de la pile est basse, plus la pile produit de la chaleur. Ceci pose de nombreux problèmes pour la conception des «Stacks» puisqu'il est nécessaire d'évacuer une grande quantité de chaleur dans un système que l'on souhaite le plus compact possible.

La puissance P_{PAC} délivrée par la pile, s'exprime comme le produit de la tension de pile U_{PAC} et du courant de pile I_{PAC} :

$$P_{PAC} = U_{PAC} * I_{PAC} \quad (16)$$

Le nombre de cellules dans un Stack d'une pile à combustible est déterminé par la valeur maximale de la tension requise et la tension opérationnelle du système. La tension totale d'un Stack est la somme élémentaire des potentiels des cellules qui lui compose [16-22]:

$$V_{stack} = \sum_{i=1}^{N_{cell}} V_i = \bar{V}_{cell} * N_{cel} \quad (17)$$

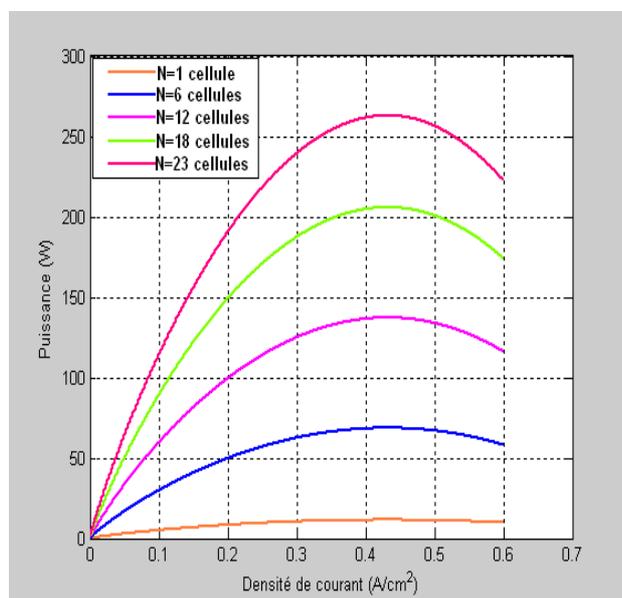


Fig. 10. Puissances d'un Stack

TABLEAU II
 CARACTERISTIQUES D'UN STACK

Paramètres	Valeurs
Vnominale	12 V
Inominale	41,5 A
Pnominale	500 W

C. Modélisation du Système Hybride (PV/PAC)

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes où les panneaux photovoltaïques sont combinés avec d'autres sources d'énergies, comme par exemple l'utilisation de la pile à combustible.

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière, ... etc.

La classification des études générales est systématisée sur la figure suivante.

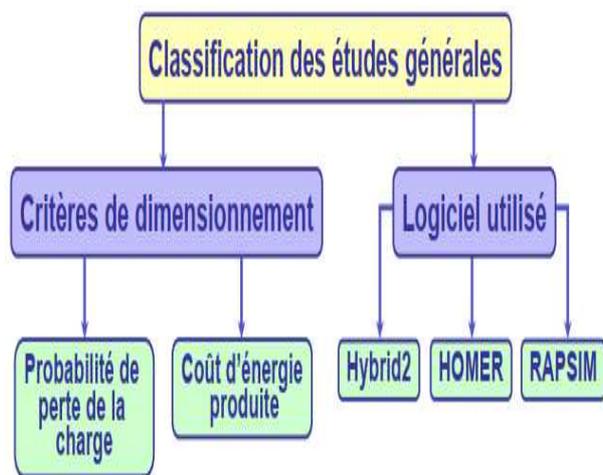


Fig. 11. Classification des études

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont [23]:

- **Hybrid2** : ce logiciel est destiné à l'étude de différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières – des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps;
- **HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables)** : avec ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose des modèles de générateurs conventionnels et des sources d'énergies renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride;

- **RAPSIM (Remote Area Power Supply Simulator)** : c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés.

Ce travail présente quelques résultats de la modélisation du système hybride (PV/PAC), réalisé avec le logiciel Homer. Le tableau III, représente la production du système étudié, la consommation de la charge, le manque et les surplus de l'énergie produite ainsi que les émissions du polluant. La figure 13 représente la production électrique mensuelle moyenne du système hybride (PV/PAC). La figure 14, donne le coût net des différents composants du système hybride étudié (le coût d'un panneau photovoltaïque, aussi celui de la pile à combustible, et enfin l'électrolyseur et le réservoir de l'hydrogène). Il est intéressant de remarquer que, en appliquant le même principe d'étude à un système sans PAC, le coût de l'énergie est multiplié par 2. Cela montre l'intérêt de coupler des générateurs auxiliaires aux systèmes photovoltaïques– batteries. Il faut signaler que l'utilisation de ce genre de logiciels est intéressante mais elle a des inconvénients puisqu'elle limite les modifications de l'utilisateur et empêche l'étude et l'analyse approfondie des systèmes hybrides (PV, éolienne, PAC, groupe diesel, ...etc) à cause du code protégé.

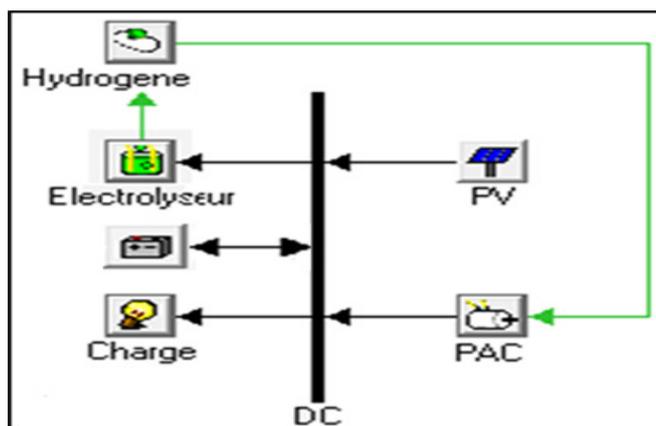


Fig. 12. Système hybride (PV/PAC) réalisé avec le logiciel Homer

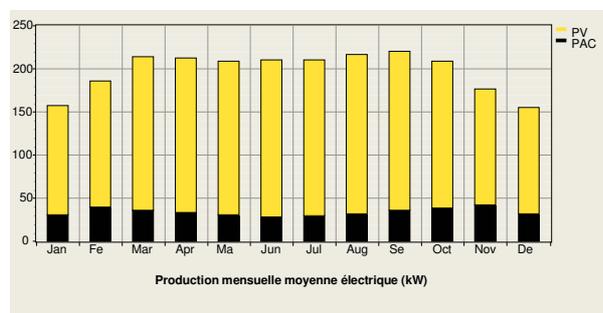


Fig. 13. Production électrique du système (PV/PAC)

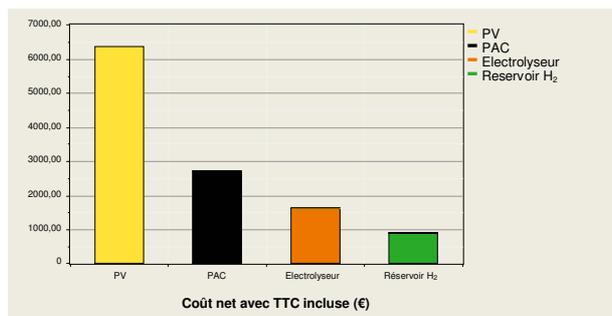


Fig. 14. Coût du système (PV/PAC)

TABLEAU III
 CARACTERISTIQUES ET RESULTATS DU SYSTEME (PV/PAC) ETUDIE

Système étudié		
Production annuelle moyenne		
PV	143 7,89 kWh	83%
PAC	298,98 kWh	17%
Totale	173 6,87 kWh	100%
Consommation annuelle moyenne		
Charge DC	462, 52 kWh	30%
Electrolyseur	829,76 kWh	54%
Batterie	246, 67 kWh	16%
Totale	153 8,95 kWh	100%
Manques et surplus de l'énergie sur une année		
Manque	24,37 kWh	1,4%
Surplus	197,92 kWh	11,4%
Emissions du polluant liées à la construction des installations par 1kWh		
Carbone dioxyde	18,3 g	
Carbone monoxyde	11,7 g	
Sulfure dioxyde	0 g	

III. CONCLUSION

Ce travail est basé sur la production décentralisée de l'énergie électrique à partir d'un système hybride de type photovoltaïque-piles à combustible (PV/PAC) pour alimenter une charge DC. Le système hybride de la production d'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. L'intérêt d'un tel couplage est d'avoir plus d'énergie et de minimiser la pollution atmosphérique due à l'émission de gaz à effet de serre dans le cas de l'utilisation des hydrocarbures pour la production de l'énergie électrique ou la production des

déchés difficiles à traiter dans le cas du nucléaire. Lorsqu'on utilise des sources d'énergies comme le photovoltaïque, l'éolien ou les piles à combustibles, elle doit nécessairement utiliser un système de stockage d'énergie, comme par exemple des batteries, afin d'alimenter la charge lorsque les sources ne produisent pas suffisamment d'énergie.

REFERENCES

- [1] D. S. Koussa et M. Belhame, "Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diesel) de production d'électricité sans interruption," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 11, N°1, 2008, pp. 137-151.
- [2] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, "Analyse critique du modèle de l'Atlas solaire de l'Algérie", *Rev. Energ. Ren.* Vol. 2, 1999, pp. 69-85
- [3] B. Mahmah, A. Mraoui, M. Belhame, H. Ben Moussa et A.N Cherigui., "La gestion thermique dans les piles à combustible PEMFC," *13èmes Journées Internationales de Thermique*, France, Août, 2007.
- [4] J. Lagorse, "Modélisation et optimisation d'alimentations électriques autonomes stationnaires multi-sources," *Conférence JCGE'08*, Lyon, France, Décembre, 2008.
- [5] S. Motahhir, A. El Ghzizal et A. Derouich, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM," *CIGIMS'2015*, EST de Fès, Maroc, 2015.
- [6] H. Yatimi, E. Aroudam et M. Louzazni, "Modélisation et Simulation du Module photovoltaïque sous MATLAB/SIMULINK," *MATEC Web of Conferences* 11, 03018, 2014, pp. 1-5.
- [7] M. Belatel, "Etude techno-économique d'un système hybride (PV/E) utilisé pour la protection de l'environnement en Algérie," *Conférence CNPIE'2011*, Skikda, Algérie, 2011.
- [8] M. Belatel, "Modélisation d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien utilisé pour la production d'énergie," *Conférence ICRE'2012*, Bejaia, Algérie, 2012.
- [9] S. Sheik Mohammed, "Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/Simulink," *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, Vol. 2, N° 5, 2011, pp. 350-355.
- [10] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli and A. Masmoudi, "MATLAB/Simulink based modelling of solar photovoltaic cell," *International Journal of Renewable Energy Reaserch*, Vol. 2, N° 2, 2012, pp. 213-218.
- [11] J.A. Ramos Hernanz et al., "Modelling of Photovoltaic Module," *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10)*, Granada, Spain, March, 2010.
- [12] F. M. González-Longatt, "Model of photovoltaic module in Matlab," *Conférence, II CIBELEC'05*, Spain, 2005.
- [13] K. Kachhiya and M. Lokhande, "MATLAB/Simulink model of solar PV module and MPPT algorithm," *National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology*, India, May, 2011.
- [14] M. Belatel, "Etude d'un système photovoltaïque hybridé avec un groupe diesel pour un développement durable," *5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER-2017)*, *Proceeding of Engineering and Technology -PET*, Vol. 30, pp.23-28.
- [15] P. Houée, *Une installation photovoltaïque en site isolé*, Ressources pour les STI2D, 2011.
- [16] M. Belatel , F.Z. Aissous et F. Ferhat, "Contribution à l'étude d'une pile à combustible de type PEMFC utilisée pour la production d'énergie électrique verte," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 15, N° 1, 2012, pp. 13-28.
- [17] M.L.S. Carnevali, *Modelling and control of PEM Fuel Cells*, Automatica Robotica 1 , Université Politècnica de Catalunya, 2017.
- [18] C. Darras. (2019) Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène: applications site isolé, micro-réseau et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H), [Online]. Available:: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00591013>.
- [19] F. Amrouche, B. Mahmah, M. Belhame et H. Benmoussa, "Modélisation d'une pile à combustible PEMFC alimentée directement en hydrogène-oxygène et validation expérimentale," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 8, 2005, pp. 109-121

- [20] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous, "Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte," *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 14 N°.1, 2011, pp. 145-162.
- [21] L. Palma and P. Enjeti, "A Modular Fuel cell, modular DC-DC converter concept for high performance and enhanced reliability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, N°.6, 2009, pp.1437-1443.
- [22] A. Gebregergis, D. Bhattacharyy and R. Rengaswemy, "Solid oxide Fuel Cell modeling", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, N°.1, January, 2009, pp. 139-148.
- [23] L. Stoyanov, "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables," Thèse de Doctorat en Energétique, Université de Corse Pasquale Paoli, France, 2011.

TABLEAU IV
 PRINCIPAUX PROJETS DANS LE MONDE, COUPLANT LE PHOTOVOLTAÏQUE ET LA PILE A COMBUSTIBLE [18]

Projets	Source Energie renouvelable		Batteries		Electrolyseur		Réservoir d'H ₂		PAC	
	Type	Puissance	Type	Capacité	Type	Puissance	Type	Capacité	Type	Puissance
SCHATZ (1989-1996)	PV	9,2 kW _c	Plomb-acide	5,28 kWh	Alcalin	6 kW	Réservoir de gaz sous 8 bars	60 Nm ³	PEM	1,5 kW
SWB (1989-1996)	PV	370 kW _c	-	-	Alcalin	100 kW	Réservoir de gaz sous 30 bars	5000 Nm ³	PAFC	80 kW
INTA (1989-1997)	PV	8,5 kW _c	-	-	Alcalin	5 kW	Stockage hydrure sous 10 bars	24 Nm ³	PAFC	10 kW
							Réservoir de gaz sous 200 bars	8,8 Nm ³	PEM	7,5 kW
Solar hydrogen pilot plant (1990-1992)	PV	1,3 kW _c	Plomb-acide	12 kWh	Alcalin	0,8 kW	Réservoir de gaz sous 25 bars	200 Nm ³	PAFC	0,5 kW
Solar house (1992-1995)	PV	4,2 kW _c	Plomb-acide	20 kWh	PEM	2 kW	Réservoir de gaz sous 28 bars	400 Nm ³	PEM	3,5 kW
FIRST (2000-2004)	PV	1,4 kW _c	Plomb-acide	20 kWh	PEM	1 kW	Stockage hydrure sous 30 bars	70 Nm ³	PEM	0,42 kW
CEC (2007--)	PV	5 kW _c	Plomb-acide	28 kWh	PEM	3,35 kW	Stockage hydrure sous 14 bars	5,4 Nm ³	PEM	2,4 kW

