

ISSN: 1737-9334
-PET-Vol.45



Proceedings of Engineering & Technology
-PET-

Special Issue on Renewable energy & Applications
Francophone issue

Editors:

Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)

Dr. Georges Descombes (France)

International Centre for Innovation & Development

-ICID-



ISSN: 1737-9334

-PET- Vol.45

Proceedings of Engineering & Technology -PET-

Special Issue on Renewable energy & Applications

Francophone issue

Editors:

Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)

Dr. Georges Descombes (France)

International Centre for Innovation & Development

-ICID-

Editeurs en chef

Dr. Ahmed Rhif (**Tunisia**)

Dr. Georges Descombes (**France**)

Comité de rédaction

Abdelfettah Barhdadi (**Maroc**)

Djamila Rekioua (**Algérie**)

Nachida K. Merzouk (**Algérie**)

Youcef Soufi (**Algérie**)

Sara Zatir (**Algérie**)

Brahim Berbaoui (**Algérie**)

Sylvie Faucheux (**France**)

Tahar Bahi (**Algérie**)

Aillerie Michel (**France**)

Arouna Darga (**France**)

Abdellah Mechaqrane (**Maroc**)

Brahim Berbaoui (**Algérie**)

Djamila Rekioua Ziani (**Algérie**)

Driss Youssfi (**Maroc**)

Hana Boudjedir (**Algérie**)

Hamadi Foudil (**Algérie**)

Houria Siguerdidjane (**France**)

Mohamed E.Djeghlal (**Algérie**)

Philippe Guibert (**France**)

Pierre-Olivier Logerais (**France**)

Rafika Boudries (**Algérie**)

Said Zouhdi (**France**)

Fathi Mohammed (**Algérie**)

Hassane Mahmoudi (**Maroc**)

Olivier Riou (**France**)

Samira ChaderKerdjou (**Algérie**)

Youssef Errami (**Maroc**)

Missoum abdelkrim (**Algérie**)

Abdelaziz Hamzaoui (**France**)

Abdelhamid I.Hassane (**Tchad**)

Adnan Yassine (**France**)

Bassouabde Islam (**Algérie**)

Beladram Mohamed (**Algérie**)

Belboukhari Naceur (**Algérie**)

Belhachemi Meriem (**Algérie**)

Bousserhane Smail (**Algérie**)

Cheikh Nawel (**Algérie**)

Cheriti Abdelkrim (**Algérie**)

Cheriti Abdelkrim (**Algérie**)

Dahou Zohra (**Algérie**)

Dennai Brahim (**Algérie**)

Dhini Rachid (**Algérie**)

Ernest Matagne (**Belgique**)

Fabien Delaleux (**France**)

Fawaz Massouh (**France**)

Fezioui Naima (**Algérie**)

Hamouinabde Imajid (**Algérie**)

Kadri Boufelja (**Algérie**)

Khalfaoui rachid (**Algérie**)

Khenfer Nabil (**Algérie**)

Khouloud Beddoud (**Algérie**)

Manar Slimane (**Maroc**)

Mohamed Benbouzid (**France**)

Mohamed Ben Braika (**Algérie**)

Mustapha Hatti (**Algérie**)

Olena lurevych (**France**)

Rahmani lakhdar (**Algérie**)

Sallam Mebrouk (**Algérie**)

Touati Boumedienne (**Algérie**)

Toufik Madani Layadi (**Algérie**)

Toufik Rekioua (**Algérie**)

Tounzi Abdelmounaïm (**France**)

Zohra Ameur (**Algérie**)

Sommaire

- Etude Caractéristique Des Hétérostructures De Types ZnO/Si Et ZnO/CuO/Si Déposées Par Pulvérisation Cathodique DC : Application Pour Les Cellules Solaires. Page 5
L. Chabane, N. Zebbar, S. Tata, M. Kechouane.
- Conception et Réalisation d'une électrovanne, Application dans les systèmes d'irrigation Intelligent. Page 8
Benbatouche.A, Kadri.B, Badraoui. A.
- L'exploitation du sable des dunes dans la fabrication des outils. Page 12
M. Zaoui, A. Tafraoui, A. Chaoufi, S. Tafraoui, M. Dahmani.
- L'adoption de nouvelles techniques agricoles : Cas de la technique d'irrigation localisée (Goutte à goutte) dans la Mitidja. Page 16
Samir Belaidi, Foued Chehat, Salima Salhi, Nouara Boulfoul.
- Influence de l'Evolution du Pourcentage de Chrome sur la Microstructure du Métal de Base dans les Aciers Synthétiques Nitrurés. Page 23
Naima Hamedi, Med ELamine Djeghlal, Laurent Barrallier, Sébastien Jégou, Myriam Dumont.
- Investigation expérimental sur un dispositif de production de froid à adsorption. Page 27
Mohamed Ali Djebiret, Maamar Ouali, Mahdi Mokrane, Ali Tetbirt, Ferhat Yahi, Mohand Berdja, Adel Benchabane.
- Evolution sous Contraintes Mécaniques des Caractéristiques Thermique et Electrique des Constituants Fondamentaux d'une Pile à Combustibles PEMFC. Page 34
M. Hamour, A. Ouïbrahim.
- Etude technique et économique d'un système solaire photovoltaïque/solaire thermique: Application à Bejaia (Algerie). Page 39
D. Rekioua, T. Mehdioui, K. Mansouri, S. Taguelmimt.
- Étude numérique de l'influence du nombre de prandlt sur la génération d'entropie dans une enseinte carrée chauffée par le bas. Page 45
Ferroudj Nawal, Kachi Sacia, Boudebous Saadoun.
- Sur la conversion du moteur Deutz F4L912 en version dual-fuel. Page 50
Mohamed Benbraïka, Arezki Smaili, Said Rechak, Azouaou Hammoudi, Yanis Chendouh.
- Étude sur les principes ancestraux d'intégration et recommandations pour une architecture bioclimatique adaptée au sud de l'Algérie. Page 54
Djamel Mestoul.
- Influence du Dopage du Dioxyde de Titane Sur la Dégradation Des Substances Pharmaceutiques. Page 61
Nadia Chekir, Djilali Tassalit, Ouassila Benhabiles, Nachida Kasbadji Merzouk, Nour elimen Bendjebbas, Hayat Ghebghoub.

Séparation d'énergie dans un tube vortex: Modélisation tridimensionnelle. <i>Ines Mokni, Philippe Bournot, Hatem Mhiri.</i>	Page 68
Valorisation de Déchets Plastiques à base de Polyamide par Recyclage. <i>F. Djeddi, M. Mohellebi.</i>	Page 74
Traitement des eaux de rejet de l'industrie du textile par couplage de procédés d'adsorption et de la photocatalyse. <i>Djilali Tassalit, Khadidja Ganibardia, Nadia Chekir, Ouassila Benhabilesa, Nachida Kasbadji Merzouk, Rachid Issaadi.</i>	Page 80
Etude et Optimisation des Facteurs de Dégradation des Polluants Pharmaceutiques. <i>Djillali Tassalit, Nachida Kasbadji Merzouk, Nadia Chekir, Ouassila Benhabiles, Manel Bradai, Hakim Kissarli.</i>	Page 87
Eléments d'évaluation de la capacité d'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution électrique basse tension. <i>Khelif Messaoud, M'raoui Abdelhamid, Hassaine Linda.</i>	Page 92
Conception, élaboration des matériaux céramiques transparents dopés de terres rares optimisées pour amélioration du rendement dans des dispositifs photovoltaïques. <i>C. Bensalem, E. Boulma, M. Diaf, S. Khiari.</i>	Page 98
Energies Renouvelables, Energies Non Renouvelables et Croissance Economiques en Tunisie. Cas d'Electricité. <i>Karmi Houcine, Ben Zina Naceur.</i>	Page 101
Etude et caractérisation d'une tôle d'acier émaillée. <i>S. Mendil, S. Amirouche, H. Messaoudi, M. Hadjazi, S. Azem.</i>	Page 107
Calcul d'un Système de Calorifugeage lors de Transport des Fluides à Différentes Températures. <i>El-Hadi Djamel, Labdani Sofiane.</i>	Page 114
Classification des especes vegetales par famille. <i>Trey Zacrada Françoise Odile, Konan Brou Marcellin, E.Olajubu.</i>	Page 120
L'étude des pertes de tensions à l'interface des électrodes d'une Cellule Solaire Sensibilisée à Colorant (CSSC). <i>Atouani Toufik, Dennai Benmoussa, Azedine.B, Halou.F.</i>	Page 125
Diffusion avisée après une collecte efficace de données par Intervalle de Confiance dans WSN basé sur l'IoT. <i>Bedr-Eddine BENAÏSSA, Fedoua LAHFA.</i>	Page 133
Etude comparative entre les systèmes de couplage des cellules photovoltaïques multijonctions. <i>DIDA.T, Dennai.B, Bekhada.A.</i>	Page 143
Propriétés Optique de TiO ₂ et Application de la Méthode de Swanepoel pour la Détermination de l'Épaisseur Optique et de l'Indice de Réfraction. <i>K. Bedoud, R. Graine, H. Merabet.</i>	Page 148
Modification de Polyéthylène Haute Densité par Greffage Radicalaire de L'anhydride Maléique. <i>Tabet habiba, benmesli samia.</i>	Page 152

Etude Caractéristique Des Hétérostructures De Types ZnO/Si Et ZnO/CuO/Si Déposées Par Pulvérisation Cathodique DC : Application Pour Les Cellules Solaires

L. Chabane¹, N. Zebbar¹, S. Tata¹ M. Kechouane¹

¹Laboratoire de Physique des Matériaux, Equipe: Couches Minces et Semi-conducteurs
Département Matériaux et Composants, Faculté de Physique, USTHB
BP 32 El Alia, 16111 Bab-Ezzouar, Alger, Algérie

lchabane@usthb.dz

Résumé— Dans ce travail nous avons déposé des films minces de ZnO sur des substrats de Si et de CuO/Si par pulvérisation cathodique dc, à 100°C, sous atmosphère contrôlée d'Ar et O₂ et à différents débits d'Ar (0.5 - 2.5 sccm). Les résultats de caractérisations des hétérojonctions ZnO/p-Si ont montré que pour des faibles débits d'Ar (1.5 sccm) les hétérojonctions présentaient un effet photovoltaïque non négligeable ($V_{OC} = 0.45$ V et $I_{CC} = 1.6$ mA/cm²). L'introduction d'une couche de CuO, de caractéristiques bien définies, induit une amélioration de l'effet photovoltaïque des hétérojonctions ZnO/p-Si pour des débits d'Ar plus faibles (0.5 - 1 sccm).

Mots clés— films mince de ZnO, hétérojonctions, pulvérisation cathodique dc, débit d'Ar, cellule solaire.

I. INTRODUCTION

Durant ces dernières décennies, la technologie et l'industrie des cellules solaires ont franchi un énorme pas de développement, en basculant de la technologie à base de Si, de Ge ou de GaAs vers une technologie à base de matériaux de moindre coût de production. Parmi les matériaux les plus fréquemment utilisés, les sulfures [1] et les oxydes métalliques (opaques et transparents (TCO)) [2, 3, 4] qui bénéficient d'une grande attention des équipes de recherche dans le monde scientifique.

Dans la littérature, plusieurs travaux portant sur l'étude des hétérojonctions à base de TCO, particulièrement le ZnO, destinées aux applications photovoltaïques ont été publiés [5, 6, 7]. Cependant le problème que peut rencontrer ce type de dispositifs, en utilisant le ZnO comme couche active, est le faible rendement. A cet effet plusieurs alternatives ont été proposées, comme l'introduction de couche buffer [8] afin d'améliorer la réponse du dispositif sous éclairage.

Suite à des travaux antérieurs [9, 10], nous étudions dans le présent travail, l'influence du débit d'Ar sur les propriétés des hétérostructures de type ZnO/p-Si et ZnO/CuO/p-Si déposées par pulvérisation cathodique dc et destinées à des applications photovoltaïques.

II. DETAILS EXPERIMENTAUX

Des films minces de ZnO ont été déposés par pulvérisation cathodique dc, en utilisant une cible de Zn (de pureté 99.99%), sur des substrats de Corning, de p-Si et de CuO/p-Si.

Le nettoyage des substrats a été effectué suivant un protocole classique : Le silicium a été, dans un premier temps, lavé à l'acétone pour supprimer les traces de graisse se trouvant éventuellement à la surface, ensuite trempé dans l'acide fluorhydrique (HF) pour décaper la couche d'oxyde natif SiO₂, enfin trempé dans le méthanol pour supprimer tout résidu de la surface. Il est important de noter qu'après chaque étape de nettoyage, un rinçage à l'eau distillée est indispensable pour éviter la contamination rapide par les solutions de nettoyage.

Pour les substrats de verre et de CuO/p-Si, nous avons suivi la même procédure en évitant bien sûr, le trempage dans l'acide HF.

Les dépôts se sont fait sous atmosphère contrôlée d'Ar et d'O₂, à 100°C pendant 1h de temps et selon un protocole de dépôt par couches successives. Nous avons fait varier le débit d'Ar entre 0.5 et 2.5 sccm.

Les films élaborés ont été caractérisées par la diffraction des rayons X, la spectrophotométrie UV-visible et des mesures de courant-tension. D'autre part, nous avons caractérisé les hétérojonctions par des mesures courant-tension-température sous obscurité et sous lumière.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats de caractérisations des films et hétérostructures élaborés.

A. Propriétés des films de ZnO

Nous récapitulons dans le Tableau 1 l'ensemble des paramètres caractéristiques des films minces de ZnO déposés sur verre corning.

Remarquons que dans les conditions de dépôt utilisées, l'épaisseur e des films ne dépasse pas l'ordre de 200 nm. En fonction du débit d'Ar la structure cristalline (taille des grains D) et le gap optique sont légèrement influencés. Cependant la résistivité électrique augmente considérablement avec la diminution du débit. L'énergie d'activation augmente également.

TABLEAU I
PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES FILMS DE ZNO DEPOSES SUR VERRE: (E) EPAISSEUR, (D) TAILLE DES GRAINS, (EG) BANDE INTERDITE, (ρ) RESITIVITE ET (EA) ENERGIE D'ACTIVATION.

Débit (sccm)	e (nm)	D (nm)	Eg (eV)	ρ ($\Omega.m$)	E_a (eV)
2.5	200	25	3.3	3	0.21
2.0	134	20	3.2	2	0.24
1.5	97	18	3.19	50	0.29
1.0	77	15	3.19	100	0.30
0.5	60	10	3.18	$6 \cdot 10^2$	0.39

B. Propriétés des hétérostructures ZnO/Si et ZnO/CuO/Si

Les caractéristiques courant-tension-température, sous obscurité, des hétérojonctions élaborées ont montré un comportement redresseur pour la plus part des échantillons (de type ZnO/Si (ZSi) et ZnO/CuO/Si (ZCSi)). Les paramètres caractéristiques des hétérojonctions sont résumés dans le TABLEAU 2.

Les résultats obtenus montrent que pour des débits d'Ar relativement élevés (**2 - 2,5 sccm**), les deux types d'hétérojonctions se comportent de manière similaire, ayant le même ordre de grandeurs des différents paramètres (n , η , V_s ...etc.). On note un meilleur redressement pour un débit de **2 sccm**. Dans ce domaine, le comportement électrique des

hétérojonctions est contrôlé par la couche de ZnO, cette dernière a une épaisseur très supérieure à celle de CuO (**50 nm**) dont l'influence demeure négligeable.

Pour des débits d'Ar plus faibles (0,5 - 1,5 sccm), les hétérojonctions de type ZnO/CuO/p-Si présentent un meilleur redressement comparé aux hétérojonctions ZnO/p-Si, essentiellement pour un débit très faible de 0.5 sccm. Pour cette valeur de débit, où les deux épaisseurs de ZnO et de CuO sont du même ordre de grandeur (60 et 50 nm respectivement), la contribution de la couche de CuO n'est pas négligeable. On remarque un redressement de 250 pour l'hétérojonction ZnO/CuO/p-Si contre 3.5 pour l'hétérojonction ZnO/p-Si.

La caractérisation des hétérojonctions sous éclairage, à la lumière blanche, a révélé un effet photovoltaïque pour quelques-unes d'entre elles. Le TABLEAU III résume les résultats obtenus.

TABLEAU III
PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES HETEROSTRUCTURES ZNO/SI (ZSI) ET ZNO/CUO/SI (ZCSI) SOUS ECLAIREMENT.

Débit (sccm)	Courant de Court-circuit I_{CC} (mA/cm ²)		Tension de Circuit ouvert V_{OC} (V)	
	ZSi	ZCSi	ZSi	ZCSi
1.5	1.6	1.8	0.45	0.5
1.0	0.9	4	0.2	0.48
0.5	0.2	6	0.05	0.5

Ces résultats indiquent que les hétérojonctions de type ZnO/CuO/Si présentent un effet photovoltaïque plus important, comparé à celui obtenu pour les hétérojonctions de type ZnO/p-Si. Remarquons que la meilleure réponse est obtenue pour l'hétérostructure ZnO/CuO/Si déposée à 0.5 sccm. La particularité de cette dernière réside dans la faible épaisseur de la couche de ZnO (60 nm), ce qui augmente la probabilité que les porteurs de charges photo-générés atteignent l'électrode supérieur.

TABLEAU III
PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES HETEROSTRUCTURES ZNO/SI (ZSI) ET ZNO/CUO/SI (ZCSI)

Débit (sccm)	Facteur d'idéalité n		Facteur de redressement η		Tension seuil V_s (V)		Courant de saturation I_s (A)		Energie d'activation de I_s (eV)	
	ZSi	ZCSi	ZSi	ZCSi	ZSi	ZCSi	ZSi	ZCSi	ZSi	ZCSi
2.5	4.7	4	1.5	10	2.9	3.5	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0.34	0.29
2.0	4	3.5	$8 \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$	3.0	3.2	$8 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	0.32	0.35
1.5	4	3	88	150	5.02	3	$7 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	0.30	0.33
1.0	3.5	2.9	123	200	4.30	2.7	$9 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	0.44	0.50
0.5	3.1	2.7	3.5	250	4.25	2.3	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	0.56	0.52

IV. CONCLUSIONS

Dans cette étude, nous avons déposé des films minces de ZnO par pulvérisation cathodique dc, à plusieurs débits d'Ar. Nos résultats ont montré que l'introduction d'une couche de CuO entre le film de ZnO et le substrat de silicium induit une amélioration du comportement redresseur et la réponse sous éclairage des hétérojunctions pour des faibles débits de gaz. Ceci permet de réduire le coût énergétique de fabrication.

REFERENCES

- [1] C. McQuarrie, D. A. McQuarrie, P. A. Rock , Chimie générale, ed. Revue de boeck université, Bruxelles, (1992) 113..
- [2] S. Andreescu , M. Ornatska, J. S. Erlichman, A. Estevez, J. C. Leiter, Biomedical Applications of Metal Oxide Nanoparticles, DOI 10.1007/978-1-4614-0379-1_3. (2012).
- [3] J. Guo, X. Chen, Solar Hydrogen Generation: Transition Metal Oxides in Water Photoelectrolysis, ed. The McGraw Hill, New York 2012.
- [4] M. Akimoto, T. Toyoda, T. Okuno, S. Hayase, Q. Shen, Thin Solid Films 590 (2015) 90–97.
- [5] K. Ellmer, A. Klein, B. Rech, Transparent Conductive Zinc Oxide: Basics and Applications in Thin Film solar cells, ed. Springer Series on Material Science 104.
- [6] V. M. de Almeida, A. Mesquita, A.O. de Zevallos, N.C. Mamani, P.P. Neves, X. Gratens, V. A. Chitta, W.B. Ferraz, A.C. Doriguetto, A.C.S. Sabioni, H.B. de Carvalho, Journal of Alloys and Compounds, 655 (2016) 406-414.
- [7] M. H. Lee, Y.-C. Peng, H.-C. Wu, Journal of Alloys and Compounds 616 (2014) 122–127..
- [8] K. Borgohain, S. Mahamuni, J. Mater. Res. 17 (2002) 1220–1223..
- [9] L. Chabane, N. Zebbar, M. Lamri Zeggar, M.S. Aida, M. Kechouane, M. Trari, Materials Science in Semiconductor Processing 40 (2015) 840–847.
- [10] L. Chabane, N. Zebbar, M. Trari, M. Kechouane, Thin Solid Films 636 (2017) 419-424.,

Conception et Réalisation d'une électrovanne, Application dans les systèmes d'irrigation intelligent

BENBATOUCHE A.^{#1}, KADRI B.^{*2}, BADRAOUI A.^{#3}

[#]Laboratoire Traitement de l'Information et Télécommunications

¹hamid.bat.91@gmail.com

[#]Laboratoire de Mécanique, Modélisation et Expérimentation

³badraouiahmed@hotmail.fr

^{*}Laboratoire Réseaux Intelligents et Energies Renouvelables

P.Box : 417 route de Kenadsa, Université Tahri Mohamed Bechar, 08000, Algérie

²kadri_bf@yahoo.fr

Abstract— Le travail présenté dans cet article a pour objectif de réaliser une électrovanne à faible coût et intelligente, il est possible de la commander à distance via une liaison de type GSM. Cette électrovanne peut être associée avec d'autres pour constituer un réseau d'irrigation automatisé contrôlable à distance. L'intérêt de cette réalisation réside dans la réduction considérable du coût de l'électrovanne et de la consommation de l'énergie électrique du fait que l'électrovanne proposée ne consomme de l'énergie qu'à l'instant d'ouverture ou de fermeture contrairement aux électrovannes commercialisées. Pour une éventuelle économie d'énergie il est possible de les alimenter par des panneaux solaires

Keywords— électrovanne, systèmes d'irrigation intelligents, commandes à distance.

I. INTRODUCTION

L'un des plus grands problèmes auxquels le monde est confronté à nos jours sont la pénurie d'eau et l'agriculture, ce domaine que l'être humain ne peut subsister sans produire ce qu'il a besoin pour se nourrir. [1]

En agriculture, l'irrigation est un processus essentiel qui influence la production agricole. En général, deux techniques d'irrigations sont utilisées une traditionnelle où les agriculteurs se rendent périodiquement dans leurs champs pour irriguer eux-mêmes, une technique fastidieuse et onéreuse épuisant plus de temps et de l'énergie (cas de multiples champs agricoles répartis dans différentes zones géographiques), la seconde automatisée facilitant beaucoup le travail des agriculteurs.[2] Un système d'irrigation automatisé basé sur des capteurs constitue une solution prometteuse pour les agriculteurs lorsque la présence de l'agriculteur dans les champs n'est pas obligatoire. Dans cette catégorie l'agriculteur a la possibilité de piloter à distance le système d'irrigation de son exploitation agricole quelque soit sa position géographique et le temps au moyen de son téléphone mobile et du solaire suivant une distribution intelligente de l'eau (besoins, quantité, temps, type spéculation...). La Télé-Irrigation permet également de collecter et diffuser en temps réel et à distance les données météorologiques et hydrologiques notamment la température, le taux d'humidité

du sol, la pluviométrie, la radiation solaire, la vitesse du vent... Ce dispositif permet à un agriculteur de s'enquérir de l'état du besoin en eau de son exploitation et les conditions climatiques qui y prévalait quelque soit sa position dans le monde. Ce dispositif permet également de disposer de la traçabilité des données climatiques d'une zone et sur plusieurs années grâce à son système de stockage des données. Ce procédé permet à l'exploitant un gain de temps et d'énergie, une augmentation de la superficie irrigable, un accroissement de la production et du revenu et une gestion maîtrisée d'eau d'irrigation. [3]

Dans cet objectif nous avons développé une électrovanne à coût réduit à partir d'une vanne standard, associée avec d'autres électrovannes pour constituer un réseau d'irrigation nous avons développé aussi un système de télégestion à distance via GSM. Un simple envoi de message permet de commander le système d'irrigation selon les besoins de l'agriculteur, il est possible de consulter à distance l'état de notre système d'irrigation.

II. CONCEPTION DU SYSTEME D'IRRIGATION INTELLIGENT

II.1. Conception de l'électrovanne

Dans cette partie nous allons décrire comment nous avons conçu notre propre électrovanne à partir d'une vanne standard en PVC (figure 1). L'objectif fixé était de réaliser une vanne motorisée à coût réduit accessible à un simple agriculteur afin qu'il puisse monter son réseau d'irrigation avec un coût modéré.



Fig. 1 Vanne standard en PVC de diamètre 63mm

Pour commander l'ouverture et la fermeture de la vanne standard électriquement nous avons choisi d'asservir le levier par un vérin électrique (figure 2). Via un bras métallique conçu de telle façon à assurer la fermeture et l'ouverture de la vanne sans l'endommagée. La détection de la limite de fermeture ou d'ouverture est assurée par deux capteurs de fin de course.



Fig. 2 Vérin électrique

C'est une sorte de bouton poussoir qui s'actionne grâce à la force exercée sur un petit levier. Il en existe de plusieurs formes. En voici quelques uns



Fig. 3 Capteur fin de course

La conception de l'électrovanne proposée est représentée à la figure 4.

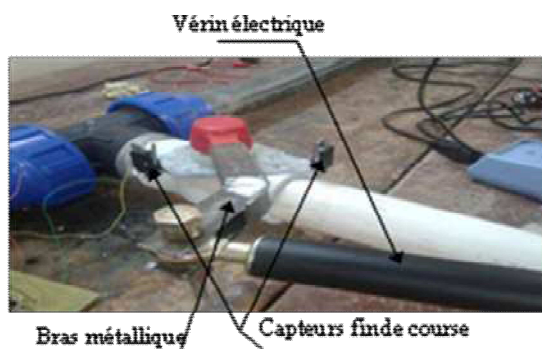


Fig. 4 Conception de l'électrovanne

II.2. Arduino microcontrôleur

Le contrôle du système d'irrigation est réalisé grâce à l'emploi de la carte Arduino UNO (figure 5), cette carte est la plus couramment utilisée et de faible coût donc elle constitue un bon choix pour le développement de notre système.

L'Arduino Uno est basé sur un ATmega328. Il a 14 broches numériques d'entrée/sortie, 6 entrées analogiques, une horloge 16Mhz, un jack d'alimentation et une connexion USB. Il contient tout le nécessaire au microcontrôleur, il suffit de le connecter via USB ou de l'alimenter pour le faire fonctionner.

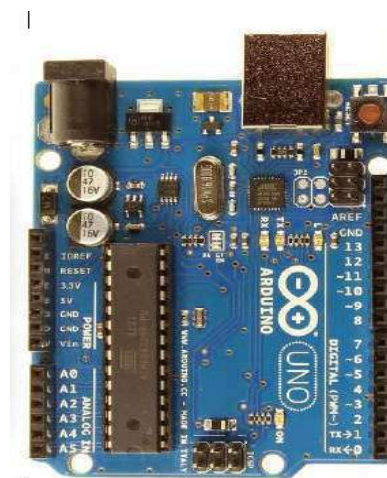


Fig. 5 Carte Arduino Uno

II.3. GSM Shield

Pour assurer la gestion à distance du système d'irrigation il est indispensable de doter notre système par un module GSM, nous avons choisi un module GSM/PRS de type SIM900A.

Le célèbre modem de communication SIM900A, de SIMCOM, permet d'intégrer la fonction de communication sans fil, via les fréquences 900/1800 MHz à travers les bandes GSM ou GPRS. Le modem est alimenté avec une tension d'interface sélectionnable, ce qui permet de connecter 5V et 3.3V sans nécessité de conversion de niveau. La vitesse de transmission est configurable 9600-115200 bits/s par commande selon le protocole AT.

Ce Modem GPRS/ GSM est équipé d'une pile TCP / IP interne pour permettre de communiquer avec Internet via GPRS. Il est adapté pour les SMS, la voix ainsi que les demandes de transfert de données dans l'interface M2M (Machine to Machine). La figure 6 montre le module de communication Sim900a. [4]



Fig. 6 Module GSM/GPRS SIM900A.

L'échange de données entre le module GSM et la carte arduino s'effectue via l'interface série aux nommes RS232, le module GSM est configurée grâce aux commandes textuelles appelées commandes AT. [5]

III. SCHEMA ELECTRIQUE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le système d'irrigation que nous avons conçu à titre d'exemple est constitué de trois électrovannes commandées à distances via le réseau GSM, la figure 7 dévoile son schéma électrique.

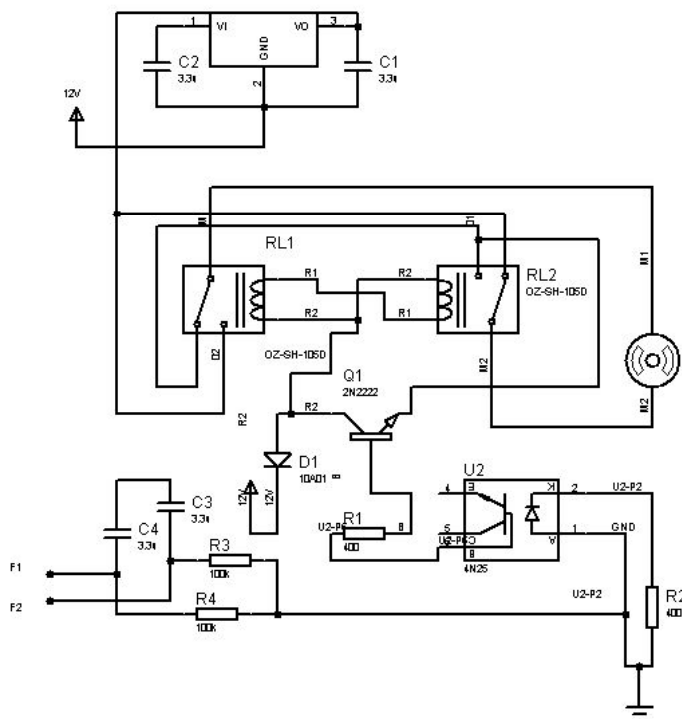


Fig. 7 Schéma électrique de la carte de commande

La commande d'ouverture ou de fermeture des électrovannes est réalisée par l'inversion de l'alimentation aux bornes du vérin électrique moyennant la commutation de deux relais (RL1 et RL2) montés en opposition. Si l'un des relais est commuté sur +12V l'autre il est à 0V et inversement. La commutation des relais est assurée par le transistor Q1. L'optocoupleur U2 assure l'isolation galvanique entre la commande numérique et la partie puissance. La détection des limites d'ouverture ou de fermeture est obtenue par la lecture des signaux issus des différents capteurs de fin de course (F1 et F2). Le système d'irrigation réalisé est assemblé à la figure 8.

Un simple message en mode textuel permet de commander le cycle d'irrigation voulue, à n'importe quel moment l'agriculteur peut interroger l'état de son système d'irrigation par l'envoi d'un message contenant le code de vérification. A la réception de ce message l'arduino lit l'état des différents capteurs de fin de course et renvoie la réponse via un SMS.



Fig. 8 Réalisation d'un système d'irrigation intelligent.

Comme nous l'avons signalé auparavant notre système d'irrigation est télécommandé à distance via le réseau GSM, il suffit d'envoyer un simple code textuel pour commander le cycle d'irrigation voulu par la commande d'ouverture ou de fermeture des différentes électrovannes. Il est possible aussi de scruter l'état du réseau d'irrigation, l'organigramme de la figure 9 résume les différentes tâches pour accomplir la télégestion du réseau d'irrigation par l'envoi de message textuel.

IV. CONCLUSION

Nous venons de présenter dans cet article la conception et la réalisation d'un réseau d'irrigation intelligent à coût réduit basée sur le développement d'une électrovane de faible coût à partir d'une vanne standard. Nous avons développé aussi une carte électronique permettant de commander, à distance via le réseau GSM, les différentes électrovannes. L'intérêt de cette réalisation réside dans la réduction considérable en termes d'énergie consommée lors de l'ouverture ou la fermeture des électrovannes, en effet la consommation d'énergie n'est décelée que lors de la fermeture ou l'ouverture des électrovannes qui n'est pas le cas dans les systèmes d'irrigations conventionnels.

REFERENCES

- [1] P. Patil, B.L.Desai, Intelligent Irrigation Control System by Employing Wireless Sensor Networks ,In International Journal of Computer Applications, vol.79, no.11, pp.0975-8887, Octobre 2013.
- [2] W.Y. Chung, F. Jocelyn, [et al.], Wireless Sensor Network Based Soil Moisture Monitoring System Design, Conference on Computer Science and Information Systems pp. 79R82, 2013.
- [3] Zhiyong Lai ; Yongli Dai , 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, 8-10 Dec. 2012, Harbin, China
- [4] Rajeshwari Madli, Santhosh Hebbar, Vishwanath Heddoori, G. V. Prasad, Intelligent Irrigation Control System Using Wireless Sensors and Android Application, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:10, No:8, 2016, pp 1464-1470.
- [5] Na Wang and Jinming Liu, The Research of Intelligent Irrigation Control System of Rice in Cold Region, International Journal of Smart Home Vol. 9, No. 9 (2015), pp. 129-138

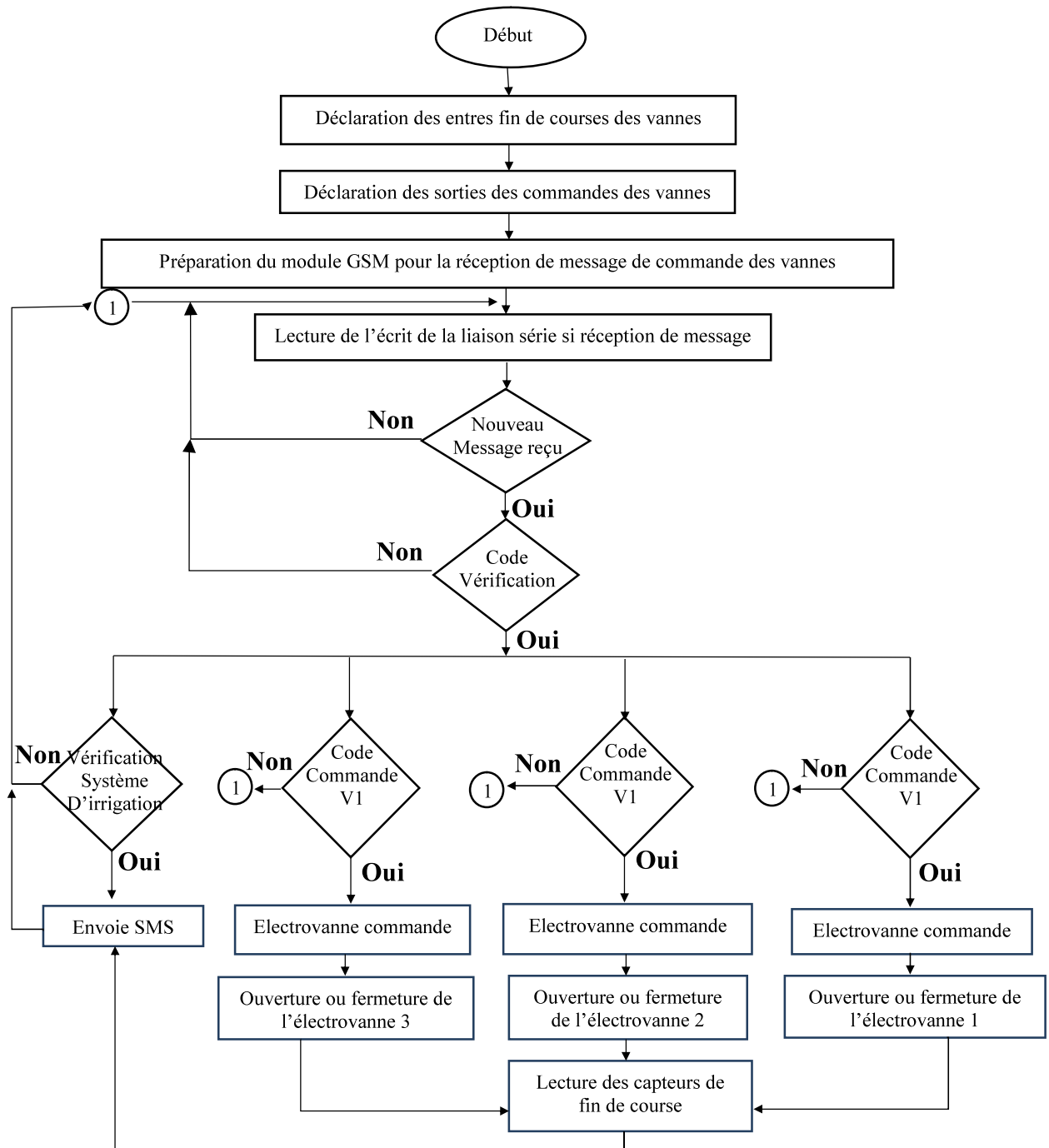


Fig. 9 Organigramme de télégestion du système d'irrigation

L'exploitation du sable des dunes dans la fabrication des outils

M. ZAOUÏ, A. TAFRAOUI, A. CHAOUFI, S. TAFRAOUI, M. DAHMANI

Département Génie Mécanique

Laboratoire de Fiabilité du Génie Mécanique

Université de TAHRI Mohamed

BP 417 route de Kenadsa 08000 Bechar Algeria

Email: chaoufi_a@yahoo.fr

ahmedtafraoui@yahoo.fr

miloud_zaoui@yahoo.fr

tafraouisalima@yahoo.fr

dahmani.mohamed-sktm@sktm.dz@yahoo.fr

Résumé - Devant la complexité de la fabrication (usinabilité) et l'analyse des paramètres de conception des outils d'emboutissage qui influencent le temps, le coût et la qualité de réalisation, nous a poussé à la recherche d'un matériau économique qui substitue les outils d'emboutissage en acier ou en fonte tels que les outils en béton BUHP et BFUHP. Plusieurs formulations de ces bétons ont été testées.

Des séries d'essais mécaniques ont montrées que ces outils possèdent des caractéristiques mécaniques améliorées, principalement leur état de surface lisse et brillante.

Des essais sur une ligne quasi-industrielle ont donnés des résultats encourageants et confirment que les outils en béton BFUHP ont une tendance importante pour la réalisation des petites séries (≤ 100 pièces)

Mots clés : Emboutissage, béton à hautes performances, état de surface, dureté.

I. INTRODUCTION

Les structures à parois minces sont utilisées dans diverses applications industrielles. Les procédés de la mise en forme de ces structures dépendent du matériau utilisé et de la géométrie du produit recherché. Dans le cas des matériaux métalliques où les efforts nécessaires à la mise en forme sont importants, les produits à parois minces sont fabriqués par l'emboutissage à partir de feuilles de tôle. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie automobile pour la production des pièces de carrosserie. La mise au point des procédés de fabrication est généralement basée sur des séries d'essais qui sont longues et coûteuses. De ce fait, les industriels ont toujours cherché à minimiser les coûts de ces essais en jouant sur plusieurs paramètres liés soit à la tôle ou à l'outillage.

Dans le cadre de notre travail, nous nous sommes intéressés à la substitution des outils d'emboutissage en acier ou en fonte avec des outils fabriqués par des matériaux économiques tel que les bétons.

Les travaux récents effectués en matière de formulation et de fabrication des bétons ont permis la mise au point de béton à ultra haute performance fibré appelé BFUHP. Les recherches sont aboutis à des solutions techniques qui ont données des

résultats encourageants telles que les outils prototypes en béton hydraulique recouvert au moins partiellement d'une couche métallique [1],[2] les outils d'emboutissage fabriqués par un empilement de strates métalliques, assemblés par diverses techniques[8] et la conception des outils prototypes d'emboutissage en béton de poudre réactive (BPR) [3], qui présente des propriétés mécaniques et de durabilité remarquables [4],[5].

L'utilisation de ces bétons dans le domaine mécanique permettrait de réduire considérablement les coûts de fabrications comme l'emboutissage.

Alors la conception d'un outil d'emboutissage en béton BUHP permettrait de réduire considérablement les coûts de fabrication et d'ouvrirait dans le futur de nouvelles perspectives aux fabricants automobiles qui pourront renouveler plus souvent leur gamme et par conséquent, s'adapter plus rapidement à la demande du marché.

Ce type de béton a une très bonne capacité de remplissage, et conjuguée à la structure amorphe de ces constituants, ce qui l'aide à prendre des formes complexes des empreintes des pièces. Les performances mécaniques du béton BFUHP réalisé par TAFRAOUI et LIBAILI [3] à partir du sable de dune de l'erg occidentale du sud-ouest de l'Algérie et en raison de ses caractéristiques et propriétés exceptionnelles joue un très grand rôle dans la

conception et la réalisation d'outils d'emboutissage en béton BFUHP.[3],[6]

Ces outils ont été testés sur presse hydraulique dans une société privée et ont donnés des résultats très encourageants.

II. EXPERIMENTATION

II.1 Conception d'un outil d'emboutissage en béton. Les essais entamés dans cette partie montrent que les BFUHP sont des matériaux faciles à mouler et bien adaptés à la préfabrication. On peut les utiliser pour produire des formes de complexité variée et obtenir une excellente reproduction des détails.

Ce sont des matériaux très résistants en compression, les BFUHP permettraient de diminuer le poids des pièces habituellement fabriquées en acier et diminueraient les coûts liés à l'usinage des pièces métalliques. On est arrivé à concevoir et réaliser des moules de différents matériaux, le plus performant c'est la silicone où on a remarqué qu'il est très facile à démouler.



Figure 1. Poinçon et matrice en acier



Figure 2 Moule en silicone



Figure 3. Outil en béton BFUHP

II.2 Caractérisation mécanique du BFUHP

a) Résistance à la compression

Les résultats des résistances à la compression sont présentés dans la figure 4.

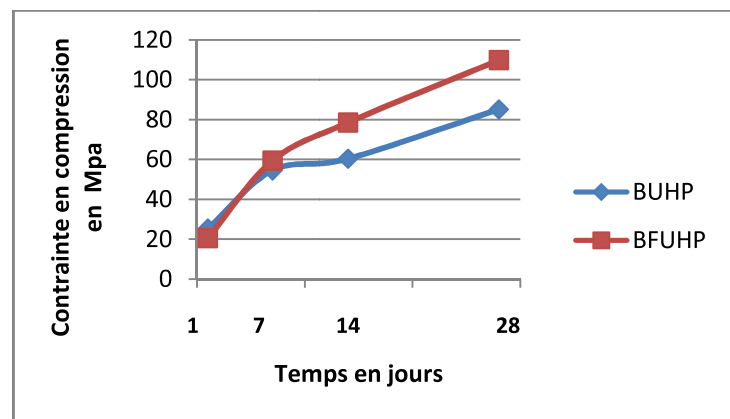


Figure 4. Contrainte de Compression du BUHP et BFUHP en fonction du temps

b) Résistance à la flexion

La figure Fig. 5 présente une progression régulière des résistances de flexion des bétons fibrés selon les échéances (1, 7, 14 et 28 Jours).

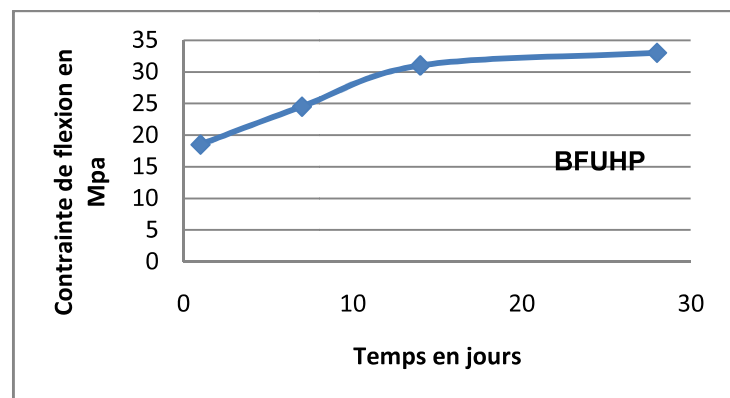


Figure 5. Evolution de la contrainte de flexion en fonction du temps

c) Etat de surface des outils en BFUHP

A l'aide d'un Rugosimètre (Fig 6.), qui est un appareil de contrôle de la rugosité et mesure de l'état de surface des pièces mécaniques.



Figure 6 Rugosimètre



Figure 7 Rugosité de la face travaillante de l'outil en béton (Ra = 0.49 µm)

d) Coefficient de frottement

L'acquisition en continue des forces dans le vérin horizontal (FH) et dans le vérin (FV) lors des cycles de frottement permet de déterminer l'évolution du coefficient de frottement μ en fonction du déplacement de la tôle.

$$\mu = \frac{-F_V}{2 * F_H}$$

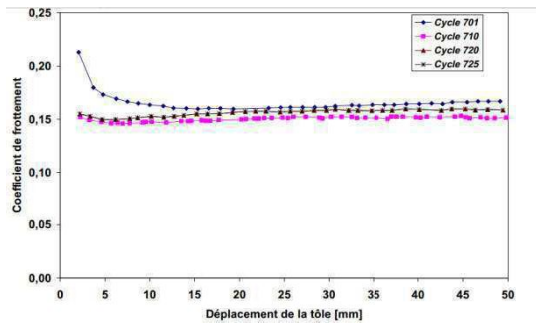


Figure.8. Evolution du coefficient de frottement

III. ESSAI D'EMBOUTISSAGE

III.1 Description du modèle

On a proposé de réaliser un montant d'une carrosserie d'un humidificateur Fig.9, et voir le résultat obtenu, pour qu'on puisse la comparée à celle obtenu par un outil en acier sur la presse d'emboutissage 400 tonnes de la société. Fig.10.



Figure 9. Montant d'une carrosserie d'un humidificateur



Figure 10. Presse hydraulique

Après réglage et adaptation des différents paramètres du procédé, les résultats obtenus en utilisant l'outil en béton BFUHP sont en courageux et montrent que ces outils donnent les mêmes empreintes que les outils en acier ou en fonte. Fig.11. Mais leurs conception et leurs réalisation sont moins couteux que celles fabriqués en fonte puisqu'on élimine toute la phase d'usinage ce qui influe d'une manière directe sur le prix des pièces réalisées et donne un gain en temps et en argent important.

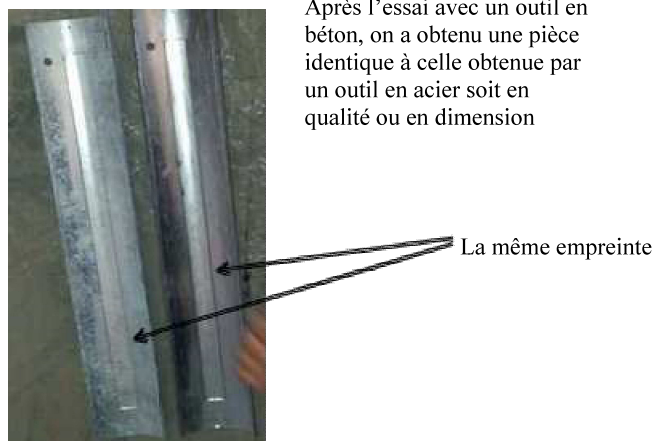


Figure 11. Pièce obtenue

VI. CONCLUSION

Cette étude a prouvé que la conception et la réalisation des outils d'emboutissage en béton BFUHP ont des propriétés mécaniques assez encourageantes et qui présente une qualité extérieure parfaite, aucune bulle d'air, après un traitement thermique par étuvage à 150 °C les outils en béton ont une dureté et un comportement à l'usure élevé. Cette étude a montré que ces outils en béton ont simplifiés le processus, diminués les délais de fabrication car ces solutions passent par l'élimination de l'usinage des matériaux métalliques [2] et par conséquent un gain économique très important. Ce travail a été validé par les travaux de TAFRAOUI [3] et SCHWARTZENTRUBER. [1].

Quelques références bibliographiques

- [1] SCHWARTZENTRUBER. A, Conception d'outils d'emboutissage en béton pour la mise en forme de tôles minces, Thèse de doctorat, février, 2000
- [2] BURLAT.M, Analyse mécanique et tribologique de l'emboutissage application aux outils fabriqués par combinaison des différents matériaux, 1998.
- [3] TAFRAOUI. A, LABAILI. S, Conception des outils d'emboutissage des tôles minces en béton de poudre réactive, Journal of Engineering and Applied Sciences, ISSN:1816-949X, 2006.
- [4] MALIER.Y, Les bétons à hautes performances, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 1992.
- [5] RICHARD. P, CHEYREZY. M, Les bétons de poudre réactive, Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, No. 532, mars-avril, 1995, p. 85-102

- [6] TAFRAOUI .A, Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental Algérie. LMDC INSA Toulouse, 2009.
- [7] OUDJENE. M, Modélisation et optimisation du comportement mécanique des outils d'emboutissage stratifiés précontrainte par vissage, 2005.

L'adoption de nouvelles techniques agricoles : Cas de la technique d'irrigation localisée (Goutte à goutte) dans la Mitidja.

Samir BELAIDI ¹, Foued CHEHAT², Salima SALHI ¹, and Nouara BOULFOUL ¹,

¹École nationale supérieure agronomique d'Alger & Centre de Recherche en Economie Appliquée pour le Développement (CREAD)

²École nationale supérieure agronomique d'Alger (ENSA).

Email: ¹belsamir05@yahoo.fr, ²fchehat02@yahoo.fr, ³salima_salhi@yahoo.fr, ⁴nouaraina@yahoo.fr

Étudier les déterminants de l'adoption des techniques d'irrigation représente un intérêt majeur afin de concevoir des politiques publiques pertinentes, développer des programmes de soutien adaptés et mettre en place des démarches de conseil ciblées pour accompagner les agriculteurs dans le changement. Depuis les années 2000, les pouvoirs publics visent à encourager la mise en place des techniques d'irrigation économes en eau. Le présent papier cherche à expliquer les comportements des agriculteurs en matière d'adoption de nouvelles techniques d'irrigation. La modélisation de l'adoption de la technique d'irrigation localisée est retenue comme le cadre méthodologique du travail, elle a permis de faire émerger les variables influençant le comportement des agriculteurs quant à la prise de décision d'adoption de la technique d'irrigation. Grâce à l'exploitation d'une base de données originale de 123 agriculteurs algériens réalisée dans le périmètre irrigué de la Mitidja Ouest tranche I, nous identifions les déterminants de la décision d'adopter la technique d'irrigation localisée. Les résultats obtenus mettent en évidence le rôle déterminant du coût de l'investissement privé, la profondeur des forages d'irrigation, la subvention à l'irrigation localisée par l'Etat, alors que la variable comme la surface agricole utile est un facteur qui n'intervient pas dans le processus de choix de ce type d'irrigation.

Index Terms—Innovation, agriculture irriguée, périmètre Mitidja Ouest tranche I, adoption technique , modèle logit.

I. INTRODUCTION

La problématique de la préservation et l'utilisation rationnelle de la ressource "Eau" constitue le cœur de la stratégie de développement agricole durable. Actuellement, l'objectif d'atteindre deux millions d'hectares de terre irriguées est largement évoqué par les pouvoirs publics qui attendent de voir la production augmenter de manière plus proportionnelle que la croissance démographique. Dans la théorie économique, l'eau comme la terre représentent deux facteurs de production indispensables pour garantir la pérennité de l'activité agricole et sa croissance économique. Par ailleurs, la spécificité de la ressource "eau" se trouve dans sa rareté qui à moyen et long terme peut être à l'origine d'un décroissement de la production.

L'exploitation rationnelle de la ressource en eau au niveau des parcelles agricoles peut être assurée par l'adoption « du goutte à goutte » comme système d'irrigation économe en "Eau". Ce système est généralement choisi pour les raisons suivantes: 1) Il permet de minimiser le gaspillage de cette ressource (Polak et al. (1997); Shah et al. (2002); Narayanamoorthy (2003)), 2) Il favorise la mise en œuvre d'une stratégie qui vise à accroître les revenus et à réduire par voie de conséquence la pauvreté des populations rurales, 3) Il rend possible la sécurité alimentaire des ménages ruraux (Bilgi (1999); Upadhyay (2003, 2004)) et 4) comme un moyen d'étendre le peu d'eau disponible sur une plus grande superficie cultivée, en particulier pendant les années de sécheresse

La politique agricole, à travers ses plans de développement en Algérie a lancé en l'an 2000, un programme en vue de réduire les pertes et d'économiser l'eau dans le secteur agricole qui passe pour être le plus consommateur de cette ressource. Plusieurs solutions sont préconisées à savoir:

(i) l'augmentation du tarif de l'eau. Car en effet, il est

nécessaire de se poser la question de savoir si le tarif actuel (2.50 DA par m³) est de nature à conduire les agriculteurs à moins gaspiller cette ressource ? (ii) l'adoption d'un programme de subvention incitatif allant de 30 à 65% du coût de l'investissement pour encourager les agriculteurs à adopter des systèmes d'irrigation économes en 'Eau'. Il est attendu que les aides à l'investissement permettent l'extension en surface et la reconversion des systèmes d'irrigation traditionnels vers les systèmes dits modernes, comme le goutte à goutte, par un grand nombre d'agriculteurs. L'irrigation localisée permet d'économiser environ 75 % de l'eau utilisée par l'irrigation traditionnelle. L'irrigation par aspersion permet une économie d'environ 50 à 70 %. Ces deux techniques permettent d'économiser du travail et d'avoir de meilleurs rendements. Malgré ces avantages, l'essentiel des superficies irriguées en Algérie le sont avec la technique traditionnelle.

Par ailleurs, l'évaluation préliminaire du plan d'octroi des subventions à l'acquisition des systèmes d'irrigation économes en eau a montré qu'en dépit des aides et les moyens mis à la disposition des agriculteurs, le niveau d'adoption reste faible en rapport avec les objectifs attendus. A titre d'exemple, en 2018, les superficies équipées en goutte à goutte ne représentent que moins de 25 % de la surface agricole irriguée totale soit (1.3 million ha). L'adoption de ce système d'irrigation par les agriculteurs est-elle seulement déterminée par toutes ces mesures prises pour encourager sa généralisation ? Cette question mérite d'être posée car l'effet de ces mesures se trouve être inversement proportionnel à l'étendue actuelle de ce système dans l'agriculture algérienne.

Pour répondre à ce questionnement, MastakiNamegabe J.L (2006), stipule que d'une "manière générale, l'adoption des innovations agricoles découle d'un processus complexe caractérisé par une interdépendance de plusieurs facteurs liés non seulement à la disponibilité de l'innovation, son accessibilité

ité et son potentiel économique mais aussi aux caractéristiques propres aux exploitants ainsi que leur environnement socio-économique, technique et institutionnel". En réalité, l'adoption d'un système économe en eau relève, également, de certains facteurs structurels et socioéconomiques des agriculteurs. A cet effet, il est intéressant dans notre étude de cerner les facteurs susceptibles d'expliquer la décision d'adopter ou non un système d'irrigation économe en eau par les agriculteurs de la Mitidja Ouest tranche 1?

II. REVUE DE LA LITTÉRATURE ET DÉVELOPPEMENT DES HYPOTHÈSES

Une vaste littérature est consacrée à la détermination des facteurs incitatifs dans le choix d'adoption d'une innovation en agriculture (Feder et al., 1985; Doss, 2006; Matuschke and Qaim, 2009) In [Derra Salif \(2014\)](#). Un certain nombre d'auteurs ont classé les facteurs explicatifs selon la structure suivante : a) le capital humain appréhendé par des variables socio-personnelles à savoir : l'âge, le sexe, le niveau scolaire, l'expérience professionnelle et la formation agricole, b) les facteurs structurels comme la taille des exploitations et le revenu des ménages, c) le capital social (Lapar and Pandey, 1999; Lichtenberg, 2001; Kabunga et al., 2012) In [Derra Salif \(2014\)](#). D'autres auteurs se sont intéressés aux facteurs économiques qui peuvent freiner ou encourager l'acquisition d'une nouvelle technologie [Griliches \(1957\)](#). Mansfield [Mansfield \(1968\)](#) a montré que plus les investissements requis pour l'adoption d'une innovation sont importants, plus son taux d'adoption est lent et plus son taux de diffusion est faible. Sutherland [Sutherland \(1959\)](#) dans son étude a relevé une corrélation négative entre le coût de l'investissement et le taux d'adoption. Contrairement au coût de l'investissement, la variable subvention a un impact positif dans la prise de décision quant à l'adoption d'une nouvelle technologie en système d'irrigation [Dinar and Yaron \(1992\)](#).

La profondeur du forage d'irrigation, cette variable est d'ordre économique et technique qui traduit implicitement "le prix de l'eau du forage" et "le mode d'accès à l'eau" pourrait être des facteurs significatifs d'adoption d'une innovation. Le contexte économique, notamment le prix de l'eau d'irrigation, semble être un facteur déterminant pour expliquer les décisions économiques et les choix individuels d'adoption technologique (Caswell&Zilberman, 1985 ; Caswell&al., 1990 ; Khanna et Zilberman, 1997 ; Khanna et al., 2002)In [Richefort \(2008\)](#) ainsi que le taux d'adoption agrégée des nouvelles technologies d'irrigation plus économes en eau [Dinar and Yaron \(1992\)](#). Negri et Brooks [Negri and Brooks \(1990\)](#) et [Green et al. \(1996\)](#) ont montré qu'un coût élevé de l'eau accroît la probabilité d'adoption des technologies d'irrigation efficiente. Green et Sunding [Green and Sunding \(1997\)](#), ont observé d'une part que l'adoption de l'irrigation localisée dans la production des agrumes est sensible aux variations du prix de l'eau et d'autre part que le profit de l'agriculteur dépend de l'impact de l'augmentation du prix de la ressource sur l'efficacité de l'irrigation des systèmes adoptés. Moreno et Sunding [Moreno and Sunding \(2005\)](#) ont déduit que les incitations financières, particulièrement, les augmentations du prix

de l'eau, peuvent avoir un grand impact sur le comportement d'adoption. Selon (Imache,2008) [Imache \(2008\)](#), les coûts liés aux pompes individuels dans cette nappe varient entre 3 et 7 DA/m³, le coût moyen est de l'ordre de 4 DA/m³.

Le prix du mètre cube d'eau du réseau public pratiqué par l'ONID dans la Mitidja-Ouest, est subventionné. Il est officiellement de 2,5 DA/m³. En fait, le rabattement de la nappe dans la région d'étude contraint de plus en plus l'activité agricole ainsi que le coût de prélèvement relativement cher par rapport à l'eau publique, cette situation amène les agriculteurs à maximiser la superficie irriguée, chose possible avec la technique d'irrigation localisée. Les agriculteurs qui ont des forages et qui s'approvisionnent à partir de la nappe phréatique de la Mitidja auront-ils tendance à abandonner le gravitaire au profit de la technique d'irrigation localisée ?

Il est aussi intéressant de traiter la variable "taille de l'exploitation" qui est largement discutée et mise en évidence pour mettre en exergue la volonté individuelle dans l'adoption technologique Zilberman, 1983 ; Feder et al., 1985 ; Jaffe et Stavins, 1991 ; Kemp, 1997 ; Tzouvelekas et al. 1999),In([Richefort \(2008\)](#)). L'impact de la taille est, différemment, appréciée car tout dépend du contexte et du type d'innovation à acquérir. Dans certains cas, la taille n'est aucune influence dans la prise de décision ((Grieshop et al. 1988, Ridgley and Brush, 1992, Waller et al. (1998) Mugisa-Mutetikka et al., (2000), Bonabana- Wabbi (2002) and Samiee et al.,2009) In([Mwangi and Kariuki \(2015\)](#))). Dans d'autres situations, la taille peut avoir un impact négatif (Yaron, Dinar and Voet, 1992) [20] comme elle peut influencer positivement l'adoption d'une technologie agricole (Kasenge, 1998; Gabre-Madhin and Haggblade, 2001 Ahmed, 2004; Uaieneet al., 2009; Mignouna et al., 2011) In ([Mwangi and Kariuki \(2015\)](#))).

Un autre aspect est important à prendre en considération, Selon Roussy et al., [Roussy et al. \(2015\)](#), « La richesse de l'exploitation agricole peut être approchée par sa taille, à travers la surface agricole utile (SAU), la taille de l'exploitation est un indicateur de richesse de l'agriculteur et il est intuitif que l'effet de la SAU sur l'adoption soit le même que celui de la richesse ».

Enfin, des études récentes ont mis l'accent sur les effets de l'accès aux réseaux sociaux sur la perception d'une nouvelle technologie par l'agriculteur et leurs conséquences sur le processus d'adoption (Winters et al., 2004; Kabunga et al., 2012; Maertens and Barrett, 2013) In ([Derra Salif \(2014\)](#))).

Pour le cas de l'Algérie, les principaux facteurs de l'adoption de la technique d'irrigation localisée sont d'ordre structurels et socio-économiques: accès à la terre, à l'eau et au capital, disponibilité et accès aux subventions, coût de l'investissement, l'âge de l'agriculteur et son niveau de formation. S'y ajoutent des facteurs spécifiques : types de cultures pratiquées, accès à l'encadrement et aux services de vulgarisation([Salhi and Bedrani \(2007\)](#), [Salhi et al. \(2012\)](#),[Belaidi \(2013\)](#))). Dans la continuité de ces travaux, notre réflexion se fonde sur l'idée qu'au-delà de l'âge et du niveau d'instruction des agriculteurs, seules les variables économiques sont susceptibles d'influencer positivement ou négativement la prise de décision dans l'adoption d'une nouvelle technique dans le secteur agricole. Dans cette perspective, l'étude s'intéresse

principalement aux variables économiques dans la construction du modèle.

III. HYPOTHÈSES DU MODÈLE

- H1 :Plus l'appréciation du coût de l'investissement par les agriculteurs est élevé, plus le risque de non adoption augmente.
- H2: Dans cette hypothèse, on stipule que le taux de la subvention incite positivement l'adoption de la technique d'irrigation localisée.
- H3 :Plus la profondeur en mètre linéaire (m) est élevée plus le prix du m3 de l'eau d'irrigation du forage est élevé, plus les agriculteurs sont incités à investir dans la technique d'irrigation localisée.
- H4 :Plus l'exploitation agricole est de grande taille, plus elle dégage une richesse, plus l'exploitant est solvable, plus la probabilité d'adoption de la technique d'irrigation localisée est élevée.

A. La variable dépendante et les variables indépendantes

Le tableau 1 présente un récapitulatif de l'ensemble des variables introduites dans le modèle avec leur signe attendu. La variable dépendante est binaire (adoptant de la technique d'irrigation localisée= 1; non adoptant= 0), et les variables indépendantes sont un mélange de variables binaires (muettes) et de variables continues.

IV. METHODE

Cette section présente la démarche méthodologique utilisée pour mener cette étude. Elle présente de manière générale la région d'étude, décrit les méthodes de collectes des données, d'échantillonnage, d'estimation et de traitement et les techniques d'analyses.

A. Méthode d'échantillonnage, collecte des données et présentation de la zone d'étude

A partir d'une base de sondage regroupant les 300 chefs d'exploitations agricoles, qui exercent une activité agricole dans le périmètre irriguée de la Mitidja Ouest tranche 1, un échantillon représentatif de 123 agriculteurs a été construit de manière aléatoire simple, par le logiciel Minitab18.1 sous la commande Sample 300 C1C2 . Par contre la taille de l'échantillon est calculée à partir de la formule de Krejcie & Morgan(1970) Krejcie and Morgan (1970), une représentativité est estimée avec un interval de confiance de 85% et une précision de $\pm 5\%$.

$$n = \frac{X^2 * N * P * (1 - P)}{ME^2 * (N - 1) + X^2 * P * (1 - P)} \quad (1)$$

L'enquête socio-économique est conduite durant la campagne agricole 2016-2017 dans le périmètre de la zone d'étude, mis en service en 1988. Il est situé dans la wilaya de Blida à 55 km au Sud-Ouest d'Alger. Il est caractérisé par un climat chaud et sec en été (Juin à Septembre), froid et humide en hiver (Novembre à Février) avec une pluviométrie inter annuelle moyenne de 667mm. Il couvre une superficie

TABLE 1: Description des variables spécifiées dans le modèle logistique binaire empirique (N = 123).

Variables ou hypothèses de réponse	Acronyme	Nature de la variable	Description	Variable dépendante & Type de mesure	L'effet attendu
Adoption de la technique d'irrigation localisée	ADOP(Y)		L'adoption de la technique d'irrigation localisée. Elle prend la valeur 1 si la technique est adoptée, 0 si non.		
Variables explicatives					
H1: Coût d'investissement	INVESTI(X ₁)	Economique	L'appréciation du coût de l'investissement par les agriculteurs de la technique d'irrigation (coût de l'investissement élevé =1, 0 = non)		Négatif
H2 : Subvention à l'irrigation localisée	SUBVIRRI(X ₂)	Economique	Si l'agriculteur a obtenu (une subvention =1, 0 = non)		Positif
H3: Profondeur du forage	PROFOND(X ₃)	Economique	Mode d'accès à l'eau d'irrigation par un forage, elle est mesurée en mètre linéaire (m)		Positif
H4 : Surface agricole utile	SAU(X ₄)	Economique et structurelle	Taille de l'exploitation (mesurée en hectares)		Positif

totale de 8600 ha dont 7 972 ha irrigables réparties en trois secteurs (Messahel and Benhafid (2007)), secteur Sud : 2 297 ha mis en exploitation en 1988 et secteurs Est (2 741 ha) et Ouest (2889 ha) mis en exploitation en 1992.

B. Modèle logit binaire

Dans cette étude, on entendra par adoption aussi bien la décision dichotomique d'adoption (adoption/rejet) que l'intensité d'adoption (choix continu de surface engagée). Le modèle logit a été utilisé dans cette étude car il est plus facile et plus simple à interpréter et a été largement appliqué dans les études d'adoption (Sheikh et al. (2003); Polson and Spencer (1991)). Le modèle logit est généralement spécifié comme suit (Amemiya (1985); Cameron and Trivedi (2005)).

$Y = f(X, e)$ Avec, $Y =$ variable dépendante ,
 $X =$ matrice des variables susceptibles d'expliquer la variation de Y ,

$e =$ erreur logistique de la distribution.

L'estimation de notre modèle logit est basée sur la méthode de maximum de vraisemblance. Soit P_i la probabilité qu'associe le logit à l'unité d'enquête :

$$P_i = F(Y_i) = \frac{1}{1 + e^{-Y_i}}$$

$$\text{Logit}(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_n X_{in} + \varepsilon_i \quad (2)$$

Y_i est un vecteur qui représente les caractéristiques de l'unité d'enquête, de son environnement et de l'objet de son choix ;

Les β_i représentent les coefficients des variables explicatives ;

Les X_{in} représentent les variables explicatives.

Le modèle empirique peut s'écrire de la manière suivante : $\text{Logit}(Y) = \beta_0 + \beta_1 \text{INVESTIST} + \beta_2 \text{SUBVIRRI} + \beta_3 \text{PROFOND} + \beta_4 \text{SAU} + \varepsilon_i$

Avec $\text{INVESTIS} =$ l'appréciation du coût élevé de l'investissement par les agriculteurs de la technique d'irrigation localisée,

$\text{SUBVIRRI} =$ la subvention de l'Etat pour la technique d'irrigation localisée,

$\text{PROFOND} =$ Profondeur du forage, $\text{SAU} =$ Surface agricole utile. X est la variable expliquée. Les β_i représentent les coefficients des variables explicatives et ε_i sont les termes d'erreur.

Si les β_i sont positifs ou négatifs et significatifs alors l'hypothèse émise est vérifiée. Au cas contraire, elle ne l'est pas.

V. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau 2 nous fournit la qualité de prédiction du modèle pour la variable de décision « Adopter ou non la technique d'irrigation localisée ». La prédiction consiste à mesurer l'aptitude du modèle à reproduire les valeurs observées d' Y sur l'échantillon, qui a servi à l'estimation des coefficients à une probabilité seuil de 50% ($Pr=0.5$). Plus les probabilités prédites sont conformes à celles observées, on stipule que le niveau de prédiction du modèle est appréciable. Les résultats mettent en avant que le modèle prédit correctement la décision

« d'adopter la technique d'irrigation localisée » dans 83,72% des cas et il prédit correctement la décision de « ne pas adopter la technique d'irrigation localisée » dans 91,25% des cas. Enfin, le modèle prédit correctement la décision des agriculteurs dans 88,62%.

TABLE II: Prédicibilité du modèle Logit

Observé	Dep=1	Dep=0	Total
Pr (Dep =1) $\geq 0,5$	36	7	43
Pr (Dep =1) $\leq 0,5$	7	73	80
Total	43	80	123
Prédiction des valeurs positives			83.72%
Prédiction des valeurs négatives			91.25%
Prédiction globale du modèle			88.62%

Le Tableau III présente les résultats de l'estimation du modèle logit(Y) qui explique la probabilité qu'un agriculteur soit adoptant de la technique d'irrigation localisée ou non. Globalement, le modèle est statistiquement valide. En effet, la validité du modèle estimé est analysée à l'aide de la statistique de Wald $\chi^2(5) = 96,79$ testant l'égalité à 0 de tous les coefficients du modèle, il a montré que les coefficients retenus dans le modèle étaient significativement différents de zéro au seuil de 1% par conséquent, l'hypothèse de nullité des coefficients est rejetée, le test Wald χ^2 a permis aussi de tester la liaison entre chacune des variables explicatives et la variable adoption de la technique d'irrigation localisée. Pour juger la bonne adéquation des modèles, nous avons utilisé R^2 McFadden qui est de 0,60, le R^2 est satisfaisant, la valeur élevée du R^2 est un signe d'une bonne adéquation, c'est un indicateur de la performance du modèle. Autres tests permettant la validité générale du modèle: le critère d'Akaike (AIC= 72,42) et le critère d'information bayésien BIC (BIC = 86,48). Ces deux critères sont utiles pour comparer des modèles différents portant sur les mêmes données. On préférera le modèle pour lequel ces statistiques ont la valeur la plus faible (Droesbeke et al. (2005)). Dans notre cas, ces statistiques sont inférieures entre les résultats du modèle Logit et ceux du modèle Probit et donc, nous retenons le modèle Logit pour l'étude. Ensuite, nous avons testé l'indépendance des variables explicatives entre elles (cf. Tableau V). Ceci nous a conduit à une réduction du nombre de variables et nous a permis d'éviter la multi-collinéarité. On peut donc conclure que les variables incluses dans le modèle contribuent de façon significative à l'explication de l'adoption de la technique d'irrigation localisée par les agriculteurs. L'analyse des résultats du modèle économétrique Logit(Y) présentés dans (cf. Tableau III), montre que parmi les variables significatives au seuil de 1%, on note l'appréciation du coût de l'investissement par les agriculteurs, la profondeur du forage. Au seuil de 5% la subvention par l'Etat de la technique d'irrigation localisée.

Le tableau IV indique, pour chaque variable explicative l'impact marginal d'une augmentation de la variable sur la probabilité de l'adoption de la technique d'irrigation localisée toute chose égale par ailleurs. La valeur numérique des coefficients du modèle logit (Y) n'ayant pas d'interprétation directe, la seule information réellement utilisable est le signe des paramètres qui indique si la variable associée influence la probabilité à la hausse ou à la baisse (Tene et al. (2013)).

TABLE III: Prédicibilité du modèle Logit

Logit(Y)	Coefficients	P>Z
SAU (X_{i1})	-0.0110252	0665
PROFOND(X_{i2})	0.0865346	0.000*
INVESTIST (X_{i3})	-2.0036740	0.004*
SUBVIRRI(X_{i4})	2.4619880	0.026**
L(B)	-31.21226	
L(0)	-31.21226	
Wald chi2(5)	96.79	
Prob > chi2	0.0000	
McFadden R-square	0.6079	
Critère d'information d'Akaike AIC	72.42452	
Critère d'information bayésien BIC	86.48544	
Critère d'information bayésien BIC	-31.212258	
Obs avec Dep=0	30	
Obs avec Dep=1	83	
Nbre d'obs.	123	

*significativité à $P < 1\%$,

**significativité à $p < 5\%$

L'effet des variables explicatives sur la probabilité d'adopter la technique d'irrigation localisée est appréciée à travers le calcul des effets marginaux (cf. TableauIV).

TABLE IV: Effets marginaux du modèle Logit

Variables(X_{in})	dy/dx	P>z
SAU(X_{i1})	-0.0008791	0.664
PROFOND(X_{i2})	0.0069000	0.000
INVESTI(X_{i3})	-0.1597665	0.000
SUBVIRRI(X_{i4})	0.1963110	0.014

Pour tester l'existence de la multi-colinéarité, les variables explicatives continues et discrètes ont été vérifiées en utilisant un facteur d'inflation de la variance (VIF) qui permet de détecter la multi-colinéarité des variables explicatives. Nous avons procédé au calcul de la statistique VIF et son inverse (1/VIF). Cette dernière(1/VIF) statistique doit être supérieure à 0,1 pour que nous puissions conclure à l'absence des problèmes de multi-colinéarité. Il semble y avoir une absence de multi-colinéarité entre les variables (cf. TableauV). Sur cette base, toutes les variables explicatives ont été incluses dans l'analyse finale.

TABLE V: Facteur d'inflation de la variance (VIF)

VARIABLES	VIF	1/VIF
PROFOND	1.25	0.798286
SUBVIRRI	1.19	0.838477
INVESTI	1.15	0.869524
SAU	1.08	0.926617
MOYENNE VIF	1.17	

Source: Elaboration par l'auteur de l'enquête sur le terrain (2017)

A. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES, ANALYSE ET DISCUSSION

1) Hypothèse relative au coût de l'investissement

D'après les résultats de la régression logistique binaire (cf. Tableau 3), la variable appréciation du coût de l'investissement est fortement significative ($P < 1\%$) mais avec un signe négatif($C = -2.0036740$; $P\text{-valeur} = 0.004$) , c'est-à-dire que la

présence de cette variable diminue l'adoption de la technique d'irrigation localisée .En d'autres termes, plus le coût de l'investissement est élevé plus la probabilité d'adoption de l'irrigation localisée par les agriculteurs est faible, elle décroît en effet l'adoption de 16 %(cf. TableauIV). Dans ce contexte, l'incitation financière devrait prendre en considération le coût de l'investissement élevé de la technique d'irrigation localisée subi par les agriculteurs

2) Hypothèse relative à la subvention

Les résultats de la régression logistique binaire (cf. TableauIII) indiquent que la variable subvention est significative au seuil de 5% et positivement corrélée à l'adoption de la technique d'irrigation localisée($C = 2.4619880$; $P\text{-valeur} = 0.026$), autrement dit, plus l'accès à la subvention de la technique d'irrigation localisée est important, plus la probabilité de l'adoption de cette technique est élevée. La subvention de l'Etat pour la technique d'irrigation localisée croît en effet l'adoption de 19,64 %(cf. TableauIV). En somme, ces résultats confirment notre hypothèse relative à l'impact positif de la subvention sur l'adoption de la technique d'irrigation localisée.

3) Hypothèse relative à la profondeur du forage.

L'accès à l'eau d'irrigation par un forage est l'une des caractéristique du périmètre irrigué de la Mitidja Ouest tranche I, d'autres modes d'accès sont enregistrés dans la région d'étude mais les différents types de modes d'accès coexistent dans la majorité des exploitations (L'irrigation par les forages et le barrage public) . La variable "profondeur du forage" traduisant implicitement l'accès aux eaux souterraine de la nappe de la Mitidja et le coût d'extraction de l'eau d'irrigation . Les résultats de la régression logistique (cf. TableauIII) montrent que cette variable présente un signe positif et fortement significative ($C = 0.0865346$; $P\text{-valeur} = 0.000$). En d'autres termes, plus la profondeur du forage est élevée, par conséquent les coûts d'extraction de l'eau d'irrigation sont élevés , plus la probabilité d'adoption de l'irrigation localisée par les agriculteurs est grande. Elle augmente en effet l'adoption de la technique d'irrigation localisée de 0,7%(cf. TableauIV).

4) Hypothèse relative à la surface agricole utile (SAU)

Selon les résultats de la régression logistique binaire (cf. TableauIII), la taille de l'exploitation ne constitue pas un facteur significatif pour la prise de décision en matière d'adoption de la technique d'irrigation localisée($C = -0.0110252$; $P\text{-valeur} = 0.665$). Ce résultat pourrait s'expliquer par le fait que les systèmes de cultures sont hétérogène dans la région d'étude.

VI. CONCLUSION

Le modèle logit a été sélectionné pour expliquer la décision d'adoption de la technique d'irrigation localisée par les agriculteurs dans le périmètre irrigué de la Mitidja Ouest tranche I. Les résultats obtenus à partir du modèle logit (Y) montrent l'importance des variables économiques dans l'explication de la décision d'adoption. Sur l'ensemble des variables explicatives testées, trois(3) ont expliqué de manière significative l'adoption de la technique d'irrigation localisée. Elles sont réparties comme suit : économique [le coût de

l'investissement (-), profondeur du forage (+), subvention par l'Etat à la technique d'irrigation localisée (+)]. Ce travail, au-delà des résultats qu'il a permis d'obtenir, demande à être affiné en explorant d'autres aspects et d'autres paramètres non abordés et qui sembleraient jouer un rôle important. Il s'agirait essentiellement du revenu agricole, la prise de conscience de la pénurie de la ressources, la main d'œuvre agricole, le type de sol, la pluviométrie, l'infrastructure hydraulique, la rentabilité économique de l'irrigation localisée, le coût des intrants agricoles, l'aversion au risque, le mode de faire valoir, rapport surface par actif, objectif de productivité. Ce travail comporte certaines limites qui offrent de nombreuses perspectives de recherche. Le modèle des choix rationnels ne permet pas de comprendre le rôle de la dynamique des institutions sur les comportements individuels. Ceci a donné lieu notamment au développement de la théorie évolutionniste du changement technique, qui permet d'expliquer la façon dont les institutions économiques façonnent et conditionnent les décisions économiques et les choix techniques. Outre, l'influence des facteurs étudiés dans notre cas d'étude, d'autres facteurs institutionnels liés aux conditions d'éligibilité des subventions et des crédits bancaires pourraient influencer le comportement des agriculteurs à adopter l'irrigation localisée en particulier la difficulté d'accès aux subventions de l'Etat, conditionnées pour les exploitations agricoles collectives par l'organisation et l'entente des attributaires (ce qui fait souvent défaut dans les exploitations agricoles collectives divisées) car leurs signatures à l'unanimité sont obligatoires pour l'octroi des subventions et crédits.

REFERENCES

- Takeshi Amemiya. *Advanced econometrics*. Harvard university press, 1985.
- Samir Belaidi. Les déterminants de choix de l'irrigation localisée par les exploitants de la mitidja. *les cahiers du cread*, 103:157–184, 2013.
- Meena Bilgi. Socio-economic study of the ide-promoted micro irrigation systems in aurangabad and bijapur. *International Development Enterprises, New Delhi*, 1999.
- A Colin Cameron and Pravin K Trivedi. *Microeconometrics: methods and applications*. 2005.
- 2014 Derra Salif. *Déterminants de l'innovation technologique sur la biomasse agricole : cas du Jatropha Curcas au Burkina Faso Montpellier*. PhD thesis, EDEG, 224 p. Thèse de doctorat en Economie : Montpellier SupAgro., 2014.
- Ariel Dinar and Dan Yaron. Adoption and abandonment of irrigation technologies. *Agricultural Economics*, 6(4):315–332, 1992.
- Jean-Jacques Dreesbeke, Michel Lejeune, and Gilbert Saporta. *Modèles statistiques pour données qualitatives*. Editions Technip, 2005.
- Gareth Green, David Sunding, David Zilberman, and Doug Parker. Explaining irrigation technology choices: a microparameter approach. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(4):1064–1072, 1996.
- Gareth P Green and David L Sunding. Land allocation, soil quality, and the demand for irrigation technology. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, pages 367–375, 1997.
- Zvi Griliches. Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change. *Econometrica, Journal of the Econometric Society*, pages 501–522, 1957.
- Amar Imache. *Construction de la demande en eau agricole au niveau régional en intégrant le comportement des agriculteurs. Application aux exploitations agricoles collectives de la Mitidja-Ouest (Algérie)*. PhD thesis, INAPG (AgroParis-Tech), 2008.
- Mastaki Namegabe J.L. *Le rôle des goulots d'étranglement de la commercialisation dans l'adoption des innovations agricoles chez les producteurs vivriers du Sud-Kivu (Est de la R.D.Congo)*. PhD thesis, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, Belgique, 2006.
- Robert V Krejcie and Daryle W Morgan. Determining sample size for research activities. *Educational and psychological measurement*, 30(3):607–610, 1970.
- Edwin Mansfield. *Industrial research and technological innovation; an econometric analysis*. 1968.
- Mekki Messahel and Mohamed Said Benhafid. Gestion du périmètre d'irrigation de la mitidja ouest tranche 1 (algérie). *CI HEAM*, page 59, 2007.
- Georgina Moreno and David L Sunding. Joint estimation of technology adoption and land allocation with implications for the design of conservation policy. *American Journal of Agricultural Economics*, 87(4):1009–1019, 2005.
- Margaret Mwangi and Samuel Kariuki. Factors determining adoption of new agricultural technology by smallholder farmers in developing countries. *Journal of Economics and sustainable development*, 6(5), 2015.
- A Narayanamoorthy. Averting water crisis by drip method of irrigation: A study of two water-intensive crops. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 58(3):427, 2003.
- Donald H Negri and Douglas H Brooks. Determinants of irrigation technology choice. *Western Journal of Agricultural Economics*, pages 213–223, 1990.
- Paul Polak, Bob Nanes, and Deepak Adhikari. A low cost drip irrigation system for small farmers in developing countries 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 33(1):119–124, 1997.
- Rudolph A Polson and Dunstan SC Spencer. The technology adoption process in subsistence agriculture: The case of cassava in southwestern nigeria. *Agricultural systems*, 36(1):65–78, 1991.
- Lionel Richefort. *Processus de sélection des technologies d'irrigation par les agriculteurs: entre interactions sociales et choix rationnels*. PhD thesis, Université de la Réunion, 2008.
- Caroline Roussy, Aude Ridier, Karim Chaïb, et al. Adoption d'innovations par les agriculteurs: rôle des perceptions et des préférences. *Journées de Recherches en Sciences Sociales (JRSS), Grenoble, France (2014-12-11-2014-12-12)*. Available: <http://prodinra.inra.fr/record/279521>, 2015.
- Salima Salhi and Slimane Bedrani. Détermination de l'adoption de l'irrigation localisée (goutte-à-goutte) par les agriculteurs: cas du périmètre hamiz. 2007.
- Salima Salhi, Amar Imache, Jean-Philippe Tonneau, and

- Mohamed-Yassine Ferfera. Les déterminants de l'adoption du système d'irrigation par goutte-à-goutte par les agriculteurs algériens de la plaine de la mitidja. *Cahiers Agricultures*, 21(6):417–426, 2012.
- Tushaar Shah, Jack Keller, et al. Micro-irrigation and the poor: A marketing challenge in smallholder irrigation development. pages 165–184, 2002.
- AD Sheikh, T Rehman, and CM Yates. Logit models for identifying the factors that influence the uptake of new 'no-tillage' technologies by farmers in the rice–wheat and the cotton–wheat farming systems of pakistan's punjab. *Agricultural Systems*, 75(1):79–95, 2003.
- Alister Sutherland. The diffusion of an innovation in cotton spinning. *The Journal of Industrial Economics*, pages 118–135, 1959.
- Mabah Tene, Gwladys Laure, Ludovic Temple, and Michel Havard. Les déterminants de l'adoption d'innovations techniques sur maïs à l'ouest cameroun, une contribution à la sécurisation alimentaire. 2013.
- Bhawana Upadhyay. Drip irrigation: An appropriate technology for women. *Appropriate Technology*, 30(4):31, 2003.
- Bhawane Upadhyay. Gender aspects of smallholder irrigation technology: Insights from nepal. *Journal of applied irrigation Science*, 39(2):315–327, 2004.

Influence de l'Evolution du Pourcentage de Chrome sur la Microstructure du Métal de Base dans les Aciers Synthétiques Nitrurés.

Naima Hamedi ^{a1}, Med ELamine Djeghlal ^a, Laurent Barrallier ^b, Sébastien Jégou ^b, Myriam Dumont ^c

^a Département de Métallurgie, laboratoire LS, Ecole Nationale Polytechnique
Avenue Hassene Badi Alger, Algérie

^b Arts et Métiers ParisTech., laboratoire MSMP,
2 cours des Arts et Métiers, Aix-en-Provence, 13617, France

^c Aix-Marseille Université, IM2NP-UMR 7334,
Campus de Saint-Jérôme, Avenue Escadrille Normandie Niemen, Marseille, 13397, France

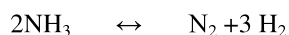
¹naima.hamedi@yahoo.fr

Résumé — La Nitruration par voie gazeuse est un Traitement Thermo-chimique, utilisé dans les Industries Automobile et Aéronautique, afin d'améliorer la résistance à la fatigue ainsi que les propriétés Tribologiques et Anti-corrosion des pièces traitées. Ce Traitement est basé sur la diffusion d'Azote impliquant la précipitation de Nitrures nanométriques, ce qui implique une évolution complexe de la Microstructure dans le temps et en profondeur, la composition chimique des précipités nanométriques reste controversée, la composition du matériau de base (Métal de Base) et les traitements ultérieurs au traitement de nitruration modifient l'état de la microstructure du matériau après le traitement de nitruration, il s'avère ainsi, très important d'identifier la microstructure du métal de base ou de l'état initial avant le traitement de Nitruration. Dans ce cadre, des caractérisations de la Microstructure de l'état initial avant le Traitement de Nitruration, sont effectuées dans l'Acier synthétique contenant 2.93% m.Cr et l'Acier synthétique contenant 0.988% m.Cr

Mots Clés— Traitement Thermo-chimique, Nitruration, Durcissement, Chrome, Caractérisations.

I. INTRODUCTION

La nitruration gazeuse consiste à utiliser de l'ammoniac NH_3 comme gaz nitrurant. Ce gaz, au contact de la surface des aciers, libère de l'azote atomique par craquage à l'interface gaz solide, la réaction physico-chimique (décomposition catalytique) qui se produit est :



L'azote produit, est absorbé en surface, diffuse dans le matériau et s'accompagne de la précipitation de nitrures issus de la combinaison des éléments d'alliages ayant une affinité avec l'azote, Figure 1. [1]

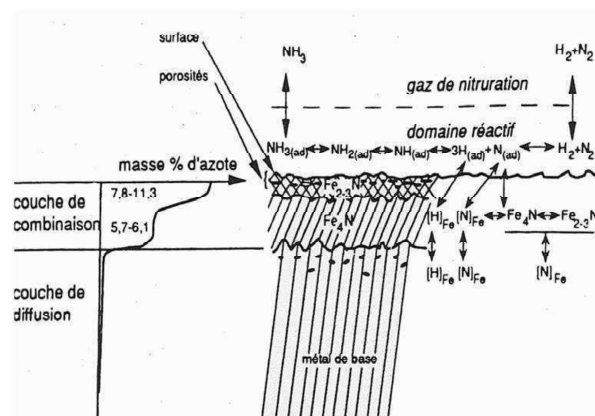


Fig 1 Evolution de la dissociation en surface du matériau [1]

Ce traitement thermo-chimique engendre une couche nitrurée qui est composée généralement d'une couche de combinaison (comprise entre 10 et 30 μm) et d'une couche de diffusion (de l'ordre de 1mm).

Les relations entre la concentration en Azote et la dureté dans cette couche dépendent fortement de la composition de l'acier de base et de la microstructure. En effet, différents mécanismes de durcissement interviennent, qui dépendent du temps de Nitruration et de la température du procédé [1].

Les alliages binaires et ternaires nitrurés ont fait l'objet de beaucoup de travaux [2, 3, 4, 5], qui ont mis en évidence l'influence du chrome sur l'augmentation de la concentration en azote et le durcissement sous la surface, qui est dû à la précipitation de nitrures de chrome semi-cohérents CrN (CFC).

II. PROCEDURE EXPERIMENTALE.

Nous avons rassemblé les principaux résultats concernant la morphologie, la composition chimique et la structure cristallographique des carbures formés dans les alliages étudiés. Les observations ont été réalisées à l'aide d'une Microscopie Electronique à Transmission : MET(en complément de la technique de diffraction Electronique, de l'analyse EDX), et de la diffraction des rayons X : DRX.

Des calculs Thermodynamiques ont été réalisés en utilisant le logiciel Thermo-Calc en complément de différentes caractérisations réalisées.

Les matériaux étudiés sont des alliages (Fe - 0,4%C - 1 et 3%Cr) - appelés respectivement 52 et 62, pour plus de clarté dans le texte dont la composition chimique principale sur le tableau 1, sont fournis par Aubert et Duval.

Les aciers ont subi des traitements thermiques préalables de trempe et revenus à 590 °C, de manière à leur conférer une structure ferritique avec précipitation de fins carbures.

Les échantillons ont été nitrurés à 550°C pendant 100 heures.

TABLEAU I
 COMPOSITION CHIMIQUES DES ECHANTILLONS NITRURES FOURNIS PAR
 AUBERT ET DUVAL

Alliages nitrurés	Composition chimique en Eléments			
	% m. C	% m. Cr	% m. Al	% m. Fe
Fe-1%Cr-0.4%C- 0.2%Al 42	0,375	0,988	0,193	Reste
Fe-3%Cr-0.4%C 52	0,354	2,93	0,0072	Reste
Fe-1%Cr-0.4%C 62	0.368	0,966	0,0057	Reste

Les précipités : des carbures ont été examinés à l'aide de Microscopes Electroniques à Transmission, un Jeol 2010F muni d'un canon à émission de champ, pour l'imagerie de haute résolution et la nano-analyse chimique par la technique (Energy Dispersive X-ray). Les observations au MET ont été réalisées sur répliques en carbone soit sur lames minces :

Les répliques d'extraction au carbone ont été collectées sur des grilles en cuivre, après un dépôt de film en carbone sur la surface du matériau polie et attaquée chimiquement au Nital (1,4%NHO₃ + éthanol). Ces répliques représentent l'unique moyen d'analyser les particules nanométriques, chacune séparément : composition chimique par EDX; taille, morphologie et cristallographie par MET.

Les lames minces ont été préparées par découpe d'un disque de 3 mm de diamètre (par électroérosion), puis polissage de ces disques jusqu'à atteindre une épaisseur

comprise entre 20 et 50µm puis amincies ioniquement. L'observation des lames minces a permis d'établir les relations d'orientation entre la matrice ferritique et les précipités, avec leur lieu de germination.

Il ne faut pas omettre de souligner que les répliques d'extraction peuvent conduire à la perte de la distribution et de l'orientation des précipités.

Les calculs thermodynamiques de phase ont été effectués à l'aide du logiciel Thermo-Calc.

Les paramètres d'entrée sont les données expérimentales et le logiciel sélectionne les phases à l'équilibre thermodynamique et leurs concentrations.

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les résultats des différentes caractérisations et calculs résumés.

A. Résultats au MET

L'observation au MET de la microstructure initiale sur lames minces de l'acier 52 à 3%Cr a permis d'identifier les carbures M₇C₃.

Ces carbures présentent une forme allongée de longueur d'environ 100 nm et une largeur d'environ 55 nm, contiennent en moyenne : 55at.%C 10at.%Cr 35at.% Fe

L'observation au MET de la microstructure initiale sur Répliques extractives de l'acier 62 à 1%Cr a permis d'identifier deux Types de carbures, Figure 2 : M₇C₃ et M₃C de formes allongées (longueur comprise entre 550 nm et 400 nm et une largeur comprise entre 300 et 20 nm). Les analyses EDX réalisées sur des particules ont montré qu'ils sont mixtes et riches en fer et en chrome : en moyenne 90at.%Fe 10at.%Cr.

L'aluminium, non carburigène ne précipite pas sous forme de carbures et se trouve donc intégralement en solution solide, contrairement aux autres éléments.

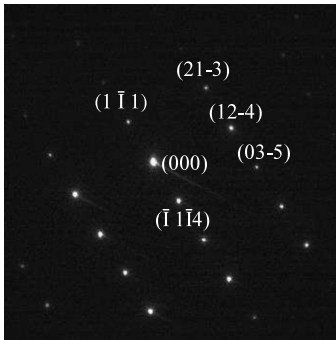
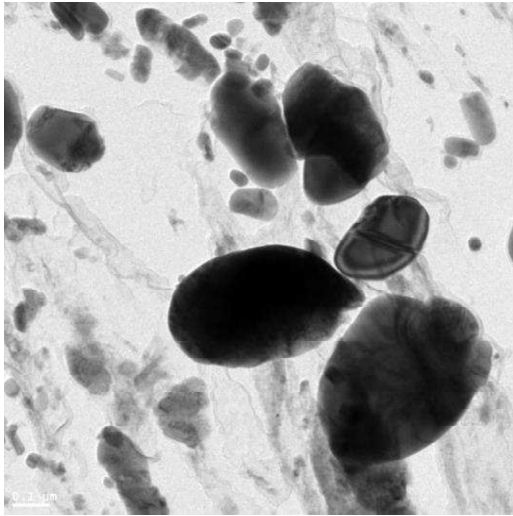


Fig. 2 Micrographie MET sur l'acier à 1%Cr – Cliché de diffraction sur répliques extractives du carbure de type Cr₇C₃, orthorhombique, axe de zone [253] de paramètre de maille a=0.4526 nm, b=0.70149 nm, c=1.2142 nm

B. Calculs Thermodynamiques sur Thermo-Calc

Le calcul thermodynamique permet de prédire la présence des carbures M₇C₃ et M₃C dans la matrice ferritique de l'acier 62 à 1%Cr et la présence unique du carbure M₇C₃ dans l'acier 52 à 3%Cr. Tableau II

TABLEAU II
LA REPARTITION DES PHASES ET LEURS COMPOSITION DANS
L'ACIER 52 ET 62 -CALCUL THERMO-CALC

		Fe-1%Cr-0.4%C 62			Fe-3%Cr-0.4%C 52	
% Phases i		Bcc %	M ₇ C ₃ %	M ₃ C %	Bcc %	M ₇ C ₃ %
%mol.		93.3353	0.1741	6.4906	94.6091	5.3909
%m		94.6308	0.1307	5.2385	95.9973	4.0027
% m Phase.i	Fe	99.7816	47.0057	79.6934	99.4895	30.0181
	Cr	0.2096	44.2781	13.5501	0.5020	61.1602
	C	0.0028	8.7161	6.7566	0.0009	8.8217
	Al	0.0060	0.0000	0.0000	0.0075	0.0000

C. Résultats de la DRX

Des analyses de phases du matériau à cœur (du Métal de Base) par diffraction des rayons X corrélient la nature des phases présentes, avec notamment un carbure majoritaire de type M₇C₃ dans le cas de la nuance 52 à 3%Cr et les carbures M₇C₃ et M₃C dans le cas de la nuance 62 à 1%Cr Figure 3.

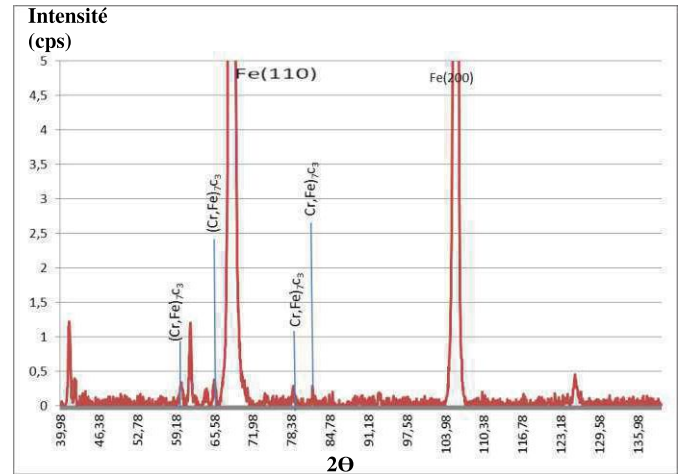


Fig. 3 Spectres de phases par diffraction des rayons X du Métal de Base de l'acier synthétique à 3%. Seuls les pics de diffraction utiles à la comparaison ont été indiqués.

D. Durcissement et Profil de Dureté.

La première conséquence de la nitruration est l'augmentation non négligeable de la dureté superficielle d'une pièce Figure 4.

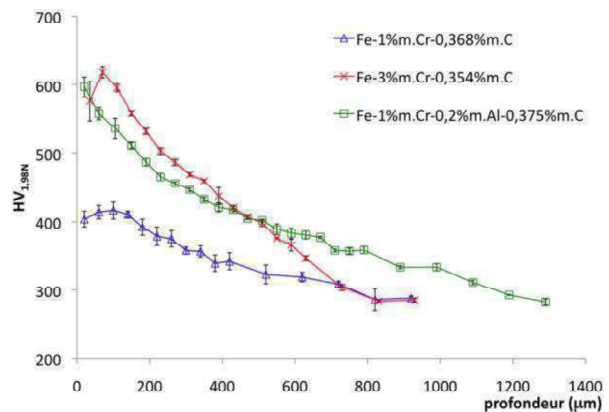


Fig. 4 Filiations de dureté en fonction de la composition en éléments d'alliage après un traitement de nitruration de 100 h à 550°C.[6]

L'étude menée par Ginter sur l'influence des paramètres : procédé et matériau sur le durcissement est prise comme référence [1]. De manière générale, l'évolution du durcissement est directement reliée à la fraction de nitrures d'éléments d'alliage, et par conséquent à l'évolution de la teneur en azote.

IV. CONCLUSIONS

En fonction de la composition du matériau de base et des traitements avant nitruration, la présence de carbone modifie l'état initial du matériau. La présence du carbone avant et pendant le traitement de nitruration est, très importante puisqu'il va entrer en compétition avec les atomes d'azote et modifier ainsi la thermodynamique et les cinétiques du traitement.

Ces alliages subissent différents traitements thermiques avant nitruration (trempé et revenu) afin de leur conférer des caractéristiques mécaniques à cœur suffisantes suivant les applications envisagées (résistance en fatigue, ténacité dans le cas des pièces fortement sollicitées). L'état métallurgique initial se caractérise par une précipitation fine et dispersée de carbures d'éléments d'alliage de type M_7C_3 pour la nuance à 3%Cr et les carbures M_7C_3 et M_3C pour la nuance à 1%Cr.

Ils précipitent d'une part aux joints de grains sous forme allongée mais aussi aléatoirement dans les grains sous forme globulaire. Ils peuvent être décrits comme des ellipsoïdes de révolution de longueur inférieure au micromètre avec un diamètre d'une centaine de nanomètres [1, 7, 8].

Les éléments d'alliage sont donc présents sous deux formes : en solution solide de substitution dans la matrice ferritique, et en substitution au sein des carbures de revenu. Il est à noter qu'en présence d'aluminium, celui-ci sera

entièrement en solution solide de substitution puisqu'il s'agit d'un élément non carburigène.

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Aubert & Duval (Groupe Eramet).

REFERENCES

- [1] C. Ginter, "Influence des éléments d'alliage sur les mécanismes de nano-précipitation et sur les mécanismes de durcissement d'alliages modèles (Fe-Cr et Fe-Cr-C) et d'aciers industriels nitrurés" Thèse Institut National Polytechnique de Lorraine, 2006.
- [2] D.H. Jack, K.H. Jack, *Materials Science and Engineering 11, Carbides and Nitrides in Steel*, pp. 1-27, 1973.
- [3] P.M. Hekker, E.J. Mittemeijer, H.C.F. Rozendaal, *The influence of Nitriding on the Microstructure and Stress State of Iron and Steel*, pp. 51-61, 1985.
- [4] B.J. Lightfoot, D.H. Jack, *Kinetics of nitriding with and without white-layer formation*, *Heat Treatment '73*, London, pp. 59-65, 1973.
- [5] Y.M. Lakhtin, Y.D. Kogan, *Nitriding of Steel*, Mashinostroenie, Moscou, 1976.
- [6] S.Jegou, "Influence des éléments d'alliage sur la genèse des contraintes résiduelles d'aciers nitrurés". Thèse de doctorat : Ecole Nationale des Arts et Métiers Centre d'Aix-en-Provence, France, 2009.
- [7] J.N. Locquet, "Caractérisations métallurgiques et mécaniques de couches nitrurées Relation microstructure - comportement", Thèse Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Aix en Provence, 1998.
- [8] M. Sennour, "Apport de la microscopie électronique en transmission et de la spectroscopie EELS à la caractérisation de nitrures (AlN, CrN) dans le fer et l'alliage Fe-Cr", Thèse Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

Investigation expérimental sur un dispositif de production de froid à adsorption

Mohamed Ali DJEBIRET^{#,*1}, Maamar OUALI^{#2}, Mahdi MOKRANE^{#3}, Ali TETBIRT^{#4}, Ferhat YAHI^{#5}, Mohand BERDJA^{#6}, Adel BENCHABANE^{#7}.

[#]Unité de Développement des Équipements Solaires, UDES/Centre de Développement des Énergies Renouvelables, CDER, Bou Ismail, 42415, W. Tipaza, Algeria.

* Laboratoire de Génie Énergétique et Matériaux, LGEM. Université de Biskra, B.P. 145, R.P. 07000, Biskra, Algeria.

¹djebiret@gmail.com

²ouali_maamar@yahoo.fr

³mok.mehdi@gmail.com

⁴tetbirtali@yahoo.fr

⁵berdjamohand@gmail.com

⁶yahiferhat@gmail.com

⁷adel.benchabane@gmail.com

Résumé— Ce travail présente une étude expérimentale réalisée sur un dispositif de réfrigération solaire à adsorption en utilisant le charbon activé AC-35 / méthanol comme couple de travail. Le dispositif étudié est conçu, réalisé et testé au niveau du laboratoire du froid et climatisation par énergie électrique d'origine renouvelable, FCEEOR, de l'Unité de Développement des Équipements Solaire, UDES. Les tests d'adsorption et de désorption, réalisés sur le dispositif expérimental, ont été effectués à l'intérieur du laboratoire en utilisant une lampe halogène. Cette dernière est installée perpendiculairement à la surface du générateur tubulaire du dispositif expérimental, pour des niveaux d'irradiations de 800, 1020 W/m². Les résultats expérimentaux obtenus pour la température maximale de régénération été 81 °C, 111 °C, la température maximale de condensation variait entre 35 °C et 37 °C, avec une température minimale obtenue au niveau d'évaporateur été -0.5 °C. Comme une deuxième étape un code de calcul est développé, en utilisant le modèle mathématique de Dubinin-Astakhov, pour l'évaluation du COP thermodynamique du cycle d'adsorption. Le code a permis l'évaluation des performances notamment l'efficacité du dispositif expérimental.

Mots clés— Dispositif, Adsorption, Charbon actif / Méthanol, Irradiation, COP_{th}, COP_s

I. INTRODUCTION

La réfrigération solaire à adsorption est l'une des technologies les plus prometteuses. Principalement en raison de sa simplicité, de ses faibles impacts environnementaux et de ses faibles besoins d'entretien. Cette technologie a fait l'objet d'un intérêt scientifique considérable au cours des dernières décennies. Il existe actuellement un grand nombre de publications à son sujet. La plupart d'entre eux décrivent la conception et les tests sur ses systèmes, que se soit des études expérimentales ou numériques. De nombreux prototypes de systèmes de réfrigération à adsorption solaire fonctionnant avec le cycle de base ont déjà été testés, avec succès dans

différentes régions du monde. Ils ont été exploités dans des conditions environnementales très différentes.

Les premiers enregistrements d'application de la paire de charbon actif-méthanol dans les systèmes de réfrigération à adsorption s'est produit en France. Au début des années 1980, Delgado et al [1] ont développés une étude numérique sur un système de capteurs solaires de 4 m², atteignant une production de glace d'environ 25 kg par jour, avec un COP de 0.15.

En 1996, Mhiri et El Golli [2] ont décrit l'étude d'un réfrigérateur solaire à adsorption. Ce dernier, travail avec le couple charbon actif-méthanol, afin de construire un système industriel. Le dispositif fonctionnait par l'intermittence, et avait une zone de captation de 4 m² sur la paroi du récipient d'adsorbant. Le COP solaire maximal variait de 0.14 à 0.19, pour un flux de rayonnement solaire entre 5 et 17 MJ / m², respectivement. En produisant 12.2 kg de glace quotidiennement à -5 °C.

En 2003, Li et al [3] ont présenté les résultats de simulation d'un réfrigérateur solaire. Dans lequel la zéolite est placée à l'intérieur des tubes sous vide du collecteur solaire. L'adsorbant peut atteindre 200 °C, et la performance globale du système atteignant des valeurs théoriques de COP solaire supérieures à 0.25.

Hildbrand et al ont développé et testé un système de réfrigérateur à adsorption solaire avec un poids de 78.8 kg de silicagel-eau [4]. Le système de réfrigérateur à adsorption fonctionnait dans les conditions météorologiques d'Yverdon-Bains, en Suisse. Les résultats expérimentaux ont montré que la température minimale de l'évaporateur atteignait 0 °C et que la COP solaire variait de 0.10 à 0.22.

Lemmini and Errougani ont construit et testé un système de réfrigération à adsorption solaire utilisant du charbon actif AC-35 et du méthanol comme couple de travail. Les résultats des tests sur le site de Rabat au Maroc ont montré que le COP solaire variait entre 0.04 et 0.08 [5].

En outre, pour améliorer l'efficacité des dispositifs de production de froid solaire à adsorption, plusieurs études ont porté sur l'optimisation de la conception du capteur solaire. Zhao et al [6] ont conçu et étudié un système de refroidissement solaire à adsorption utilisant un lit d'adsorbant tubulaire avec le couple charbon actif-méthanol. Les résultats expérimentaux ont montré que pour des valeurs de rayonnement solaire variant de 15.3 à 17.1 MJ, la conception du collecteur solaire peut fournir une température de 110 °C. Le système atteint un COP maximum d'environ 0.11.

Lu et al [7] ont conçu un nouveau refroidisseur à adsorption solaire avec une masse de 65 kg de gel de silice. Le système de réfrigérateur à adsorption a fonctionné dans les conditions météorologiques de Dezhou-Chine. Les résultats expérimentaux ont montré que la capacité de refroidissement et le COP solaire moyenne étaient respectivement de 17.6 kW et de 0.16.

El Fadar [8] a étudié théoriquement l'influence d'un lit adsorbant à ailettes sur la performance d'un système de refroidissement solaire à adsorption. Le modèle théorique a été validé avec des données expérimentales. L'analyse des résultats a indiqué que les performances du système dépendaient du nombre d'ailettes. Ses derniers, ont augmentées les performances du système lorsque leur nombre a augmenté.

Ji et al [9] ont conçu et testé un nouveau système de réfrigération solaire à adsorption. Ce système utilise une paire de travail charbon actif-méthanol. La nouvelle dans ce système été la conception pour le lit adsorbant tubulaire, afin d'améliorer le transfert de chaleur et de masse dans le lit. Les résultats expérimentaux ont indiqué que la température minimale de l'évaporation atteignait 0 °C, et que le COP solaire variait de 0.039 à 0.12.

Dans cet article, un dispositif expérimental de production de froid à adsorption utilisant un générateur tubulaire avec de charbon active AC-35/ Méthanol a été conçu, construit. Il a été testé dans des conditions opérationnelles au niveau du laboratoire de l'équipe de froid et climatisation par énergie électrique d'origine renouvelable, au sein de l'unité de développement des équipements solaires UDES à Bou-Ismaïl, Tipaza, Algérie. Le but de cette étude est de caractériser le fonctionnement de cet appareil, en calculant le coefficient de performance de ce dispositif.

II. ÉTUDE EXPERIMENTALE

A. Description du dispositif expérimental

Le dispositif de production de froid se compose de trois éléments indispensables sont l'évaporateur, le condenseur et le générateur. L'installation a été entièrement fabriquée au laboratoire du froid et climatisation par énergie électrique d'origine renouvelable FCEEOR au sein de l'Unité de Développement des Équipements Solaire UDES, Bou-Ismaïl, Tipaza.

(i) L'adsorbant- collecteur : constitue de six cylindres coaxiaux en cuivre avec un diamètre extérieur $d_{ext}= 0,04$ m, un diamètre intérieur $d_{int}= 0,014$ m et une longueur $l= 0,25$ m. Ces tubes sont reliés à un tube-collecteur de diamètre $d_{col}= 0,022$ m. Ainsi, la surface de captation, ou d'adsorption, du système est de $S_{capt}= 0,19$ m². La masse totale du charbon actif utilisée dans les tubes de l'adsorbant est de $m= 0,7$ kg (tableau 1). Une peinture noire est appliquée sur les surfaces des tubes adsorbants. Le système est confiné dans une boîte parfaitement isolée avec une surface vitrée afin de garantir un maximum d'effet de serre à l'intérieur. Des volets de ventilation sont installés sur la face avant et arrière de la boîte de L'adsorbant- collecteur pour faciliter la convection durant la phase de refroidissement (figure 2).

(ii) Le condenseur à air est réalisé en cuivre avec une forme hélicoïdale pour assurer la condensation de la vapeur du méthanol. Il fonctionne en convection naturelle avec une surface d'échange de $S_{cond}= 0,15$ m² (figure 2a).

(iii) L'évaporateur est constitué d'un tube en cuivre de diamètre $d_{evp}= 0,03$ m, d'une longueur $l_{evp}= 0,12$ m et d'une surface d'évaporation $S_{evp}= 1,41 \times 10^{-4}$ m². L'évaporateur est placé dans une enceinte isolée thermiquement. La phase d'évaporation du méthanol permet la production du froid à l'intérieur de cette dernière (figure 2a). Dans la présente installation, l'évaporateur joue aussi le rôle d'un réservoir accumulant le méthanol à évaporer.

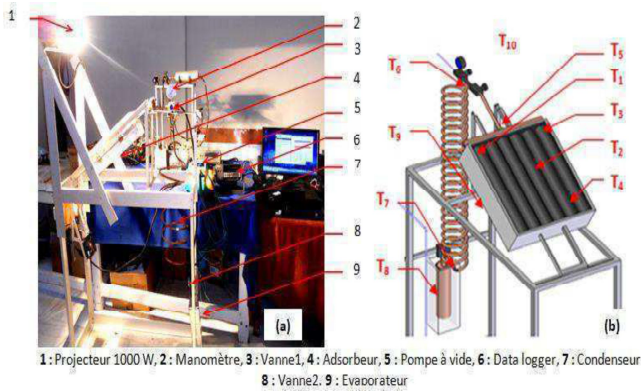
Deux vannes manuelles contrôlent les différentes phases du système. Elles sont placées respectivement entre l'adsorbant-collecteur et le condenseur et entre le condenseur et l'évaporateur (figure 2a).

TABLEAU 1.
CARACTERISTIQUE TECHNIQUE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

Propriété	Valeur
Masse de la partie métallique de l'adsorbant, kg	3,72
Masse de l'adsorbant (charbon actif), kg	0,7
Surface de captation, m ²	0,19
Surface de condensation, m ²	0,15
Surface d'évaporation, m ²	$1,41 \times 10^{-4}$

B. Protocol expérimental

Dans le but de caractériser le fonctionnement du réfrigérateur solaire à adsorption, nous avons testé le système à l'intérieur du laboratoire en exploitant une lampe halogène installée verticalement à la surface de l'adsorbant. La variation de la distance entre la lampe et l'adsorbant a permis d'avoir plusieurs valeurs d'irradiation. La distribution des températures dans le lit adsorbant et les températures spécifiques du cycle sont relevées par dix thermocouples de type K reliés à un data logger (figure 2b). L'acquisition des résultats a duré environ 6 heures.



III. ÉTUDE NUMÉRIQUE

A. Description du modèle numérique

Afin d'évaluer le fonctionnement du dispositif expérimental, en calculant le coefficient de performance solaire. Ce dernier est le rapport entre la quantité de froid produite au niveau de l'évaporateur et la quantité de chaleur reçue par l'irradiation incidente sur la surface du générateur tubulaire [10].

$$COP_s = \frac{Q_{ev}}{Q_t} \quad (1)$$

Le Coefficient de performance thermique thermodynamique traduit l'efficacité du dispositif. Il n'a aucun sens physique, mais il est utile pour définir le fonctionnement d'un tel dispositif de production de froid solaire à adsorption [10, 11].

$$COP_{th} = \frac{Q_{ev}}{Q_g} \quad (2)$$

✓ Expression de froid produit à l'évaporateur Q_{ev}

La quantité de froid produite à l'évaporateur Q_{ev} est donnée par l'équation (3) :

$$Q_{ev} = m_a \Delta m \left[L(T_e) - \int_{T_e}^{T_c} C_{p_l}(T) dT \right] \quad (3)$$

Δm la masse cyclée de l'adsorbant, elle est calculée par la différence de masse de l'adsorbant entre les deux transformations isostérique équation (4) :

$$\Delta m = m_{\max} - m_{\min} = m(T_a, P_e) - m(T_g, P_c) \quad (4)$$

Le modèle de Dubinin - Astakhov défini par l'équation (5) :

$$m(T, P) = W_0 \rho_l(T) \exp \left[-D \left(T \ln \frac{P_s(T)}{P} \right)^n \right] \quad (5)$$

Les paramètres (W_0 , D , n) de l'équation (5) du modèle de Dubinin-Astakhov pour le couple charbon actif AC - 35/méthanol sont déterminés expérimentalement par [12], et ($P_s(T)$, $\rho_l(T)$) sont estimés par [13]:

W_0 : le volume maximal adsorbable qu'est égale 0.425 l/kg.
 D : constante caractérise le couple adsorbant/adsorbant sa valeur $5.02 \cdot 10^{-7}$.
 n : reflète l'hétérogénéité du solide égale 2.15.

- T_1 intérieur du tube côté gauche
- T_2 intérieur du tube au milieu
- T_3 intérieur du tube côté droit
- T_4 intérieur du capteur dans l'air (entre la vitre et les tubes de cuivre)
- T_5 sortie du capteur
- T_6 entrée du condenseur
- T_7 sortie du condenseur (entré de l'évaporateur)
- T_8 intérieur de l'évaporateur
- T_9 au-dessous du capteur
- T_{10} intérieur du laboratoire (Ambiante)

✓ Expression d'énergie solaire quotidienne recueillie sur la surface de captation Q_t

L'énergie solaire quotidienne recueillie sur la surface de captation définie par l'équation (6) :

$$Q_t = S G \Delta t \quad (6)$$

✓ Expression de chaleur cédée pour le dispositif Q_g

Q_g est défini par la somme des chaleurs sensible des éléments du système plus la quantité de chaleur de désorption.

$$Q_g = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{des} \quad (7)$$

Chaleur sensible de l'adsorbant

$$Q_1 = m_a \int_{T_a}^{T_g} C_{p_{AC-35}} dT = m_a C_{p_{AC-35}} (T_g - T_a) \quad (8)$$

m_a , $C_{p_{AC-35}}$ sont la masse de l'adsorbant solide contenue dans l'adsorbent et la chaleur spécifique de l'adsorbant.

Chaleur sensible des parties métalliques

$$Q_2 = m_{\text{métal}} \int_{T_a}^{T_g} C_{p_{\text{métal}}} dT = m_{\text{métal}} C_{p_{\text{métal}}} (T_g - T_a) \quad (9)$$

$m_{\text{métal}}$, $C_{p_{\text{métal}}}$ représente la masse et la chaleur spécifique des parties métalliques de l'adsorbent.

Chaleur sensible de l'adsorbant

$$Q_3 = m_a m_{\max} \int_{T_a}^{T_{des}} C_{p_l}(T) dT + m_a \int_{T_a}^{T_g} m(T) C_{p_l}(T) dT \quad (10)$$

$m(T)$, $C_{p_l}(T)$ la masse de l'adsorbant qui est en fonction de la température calculée avec le modèle de Dubinin-Astakhov et les valeurs de la chaleur spécifique de l'adsorbant donné par [14].

T_{des} définie comme la température à partir de laquelle le phénomène de désorption commence, elle correspond à l'apparition de la première goutte liquide dans le condenseur [15]. Elle est déterminée par le modèle de Dubinin-Astakhov pour la phase isostère (A - B) suivant l'équation (9) :

$$m(T_a, P_e) - m(T_{des}, P_c) = 0 \quad (11)$$

Chaleur de désorption

$$Q_{des} = \Delta m m_a \Delta H \quad (12)$$

ΔH est la chaleur latente de désorption, elle est généralement égale à 1.2 de la chaleur latente de vaporisation de liquide [16].

B. Validation du modèle numérique

D'abord, nous avons validé notre modèle numérique par les résultats de Passos et al 1986. Les auteurs ont étudié un prototype expérimental, pour avoir des résultats sur l'adsorption du méthanol sur les trois échantillons de charbon actif commercial (LH, AC-35, et PKST). Les résultats comparés du COP sont montrés sur les figures 2, 3. Les erreurs relatives moyennes entre les résultats comparés dans les figures 4, 5 sont 2.89 %, et 3% respectivement.

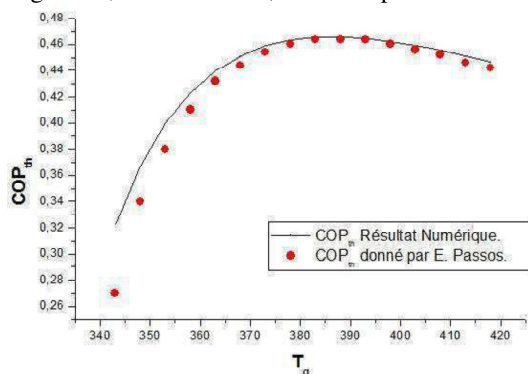


Fig. 2 Les valeurs du COP_{th} par rapport à la variation de la température de régénération T_g. (T_a=25 °C, T_c=30 °C, T_e=-5 °C)

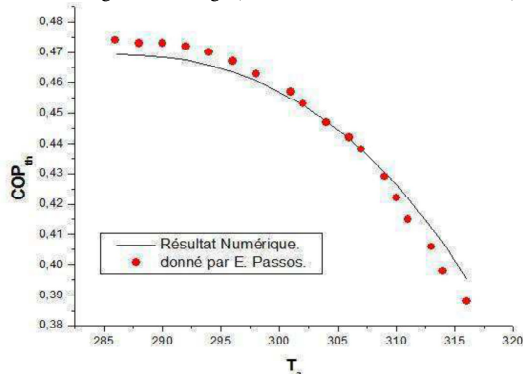


Fig. 3 Les valeurs du COP_{th} par rapport à la variation de la température d'adsorption T_a. (T_g=105 °C, T_c=30 °C, T_e=-5 °C)

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Variation de température dans le générateur tubulaire

Pour le dispositif de production de froid à adsorption, les distributions de température du générateur tubulaire, telles trouvées dans les résultats expérimentaux, sont représentées sur la figure 4 et la figure 5 pour les deux irradiations 800 et 1020 W/m² respectivement.

Les températures maximales obtenues par les thermocouples T_{AC-35} et T_{tube} étaient 108 °C, 111 °C et 78 °C, 81 °C pour les irradiations 1020 W/m² et 800W/m² respectivement, pendant la phase de chauffage qui a duré pratiquement 3h10 minutes. Les résultats montrent qu'il existe une différence de température entre la paroi de tube et le charbon active pour la même irradiation. Cette différence de température est à cause de la perte de chaleur entre les deux milieux. Ainsi la différence de température obtenue à cause de la différence d'irradiation appliquée sur la surface du générateur tubulaire, pendant la phase de chauffage.

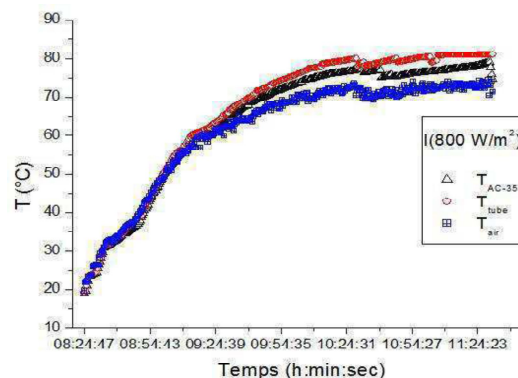


Fig. 4 Distribution de la température dans le générateur tubulaire pour l'irradiation 800 W/m².

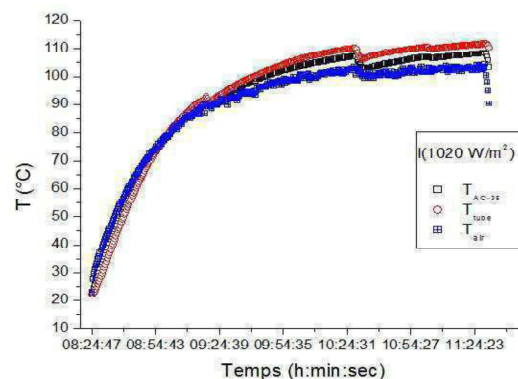


Fig. 5 Distribution de la température dans le générateur tubulaire pour l'irradiation 1020 W/m².

L'air piégé dans le générateur entre la vitre et les tubes, ces valeurs maximales de températures T_{air} acquis 104 °C, 74 °C correspondant à l'irradiation, 1020 et 800 W/m², respectivement, grâce à l'étanchéité et la bonne isolation du générateur tubulaire pour minimisé les pertes de chaleur.

B. Variation de pression dans le générateur

La pression augmente de la valeur minimale 5 mbar et 15 mbar à la valeur maximale 105 mbar et 100 mbar correspondent à l'irradiation 1020 W/m² et 800 W/m² respectivement, comme le montre la figure 6 la variation temporelle de la pression dans le générateur. La pression a commencé à diminuer après la phase de chauffage à la valeur minimale due à une diminution de la température dans le générateur tubulaire.

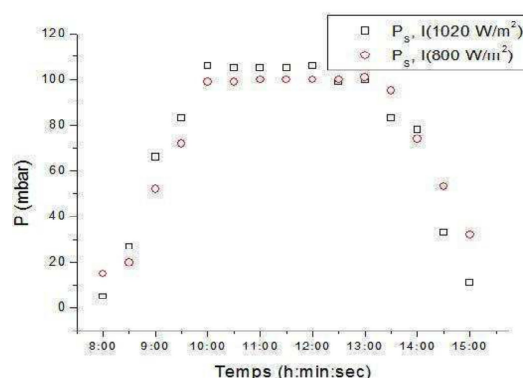


Fig. 6 Variation temporelle de la pression dans le générateur tubulaire.

Cette différence dans les résultats expérimentaux obtenus peut être expliquée par différentes données opérationnelles du laboratoire (la température ambiante pendant les jours d'essai) telles que l'intensité de la lampe et la température maximale du générateur tubulaire obtenue pendant la période de chauffage - désorption.

C. Variation de température dans le condenseur

Dans cette phase, la vanne placée entre le condenseur et le générateur a été ouverte. Le processus de désorption a commencé et la vapeur de saturation du méthanol s'est déplacée vers le condenseur. La condensation du méthanol été faite par une convection naturelle. La figure 7 montre le développement de la température de condensation dans le condenseur pour l'irradiation 1020 W/m² et 800 W/m².

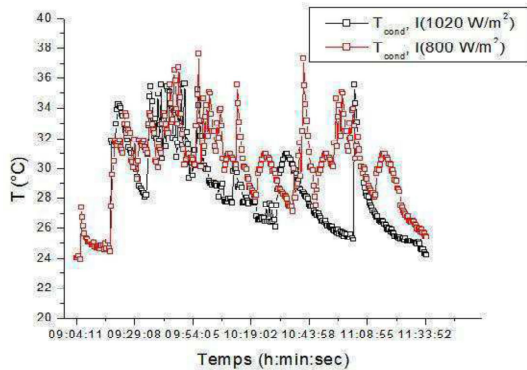


Fig. 7 Développement de la température de condensation dans le condenseur pour l'irradiation 1020 W/m² et 800 W/m².

La température de condensation a augmenté en raison de l'augmentation de la température de la vapeur du méthanol. La température de condensation la plus élevée atteinte par le condenseur était de 35 °C, 37 °C pour un test d'irradiation 1020 W/m² et 800 W/m². Cette différence de la température de condensation s'explique par la variation des données opérationnels (température ambiante) et le transfert de chaleur dans le condenseur (convection naturelle).

D. Variation de température dans l'évaporateur

Dans cette phase, le froid est produit par l'évaporation du méthanol à une pression basse. La grande capacité du charbon actif lui permet d'adsorber de grandes quantités de vapeur. La figure 8 présente le changement de la température d'évaporation pendant le temps dans l'évaporateur. On peut voir que la température dans l'évaporateur commence à diminuer de 22 °C, 21 °C jusqu'elle arrive à une valeur minimal -0.50 °C, 1 °C, pour des valeurs d'irradiation de 1020 W/m² et 800 W/m², respectivement.

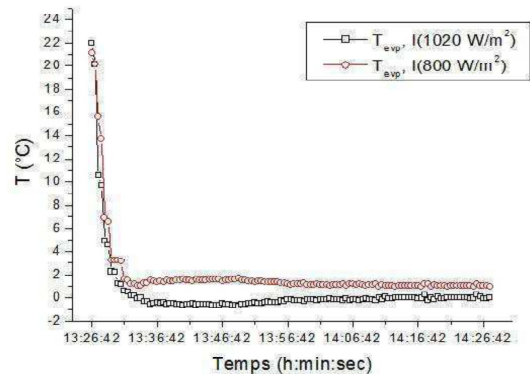


Fig. 8 Changement de la température d'évaporation pendant le temps dans l'évaporateur.

E. Performance du dispositif expérimental

Pour calculer le COP_{th} et COP_s à l'aide des données obtenues expérimentalement qui se présente aux températures, irradiations acquises et après avoir connaître les valeurs numériques des paramètres de calcul : la masse de la partie métallique du générateur mmétal=3.72 kg, la masse du charbon actif AC-35 Ma=0.7 kg, la chaleur spécifique de l'adsorbent (AC-35) C_{P(AC-35)}=920 kJ/kg. K, et la chaleur spécifique du métal qui est le cuivre C_{P métal}=380 kJ/kg. K, nous avons effectués une application numérique à partir du modèle mathématique et l'organigramme précédant validé.

Le tableau 2 présente les températures de régénération obtenue dans la phase chauffage-désorption et le COP_{th}, COP_s calculé.

TABLEAU 2.
 TEMPERATURE DE REGENERATION AVEC LE COP_s ET LE COP_{th} CALCULE.

Résultats	Valeurs	
Irradiation (W/m ²)	800	1020
T _g (°C)	80	110
COP _{th}	0.4328	0.4683
COP _s	0.074	0.09

D'après le tableau 2 on remarque que les valeurs du COP_{th} sont dans les normes de cycle thermodynamique à adsorption. On n'a pas dépassé la température de régénération 110 °C car elle est une variable qu'il faut l'optimiser aussi d'après des études ont été réalisées citons les résultats de Passos et al, et ceux de Sumathy and Zhongfu [17, 18]. Ils ont conclu d'une façon générale que les valeurs de température de régénération soient plus basses pour obtenir un COP_{th} maximal pour un cycle thermodynamique à adsorption. Elle est limitée par 120 °C où le méthanol se décompose à partir de cette température et le processus d'adsorption sera bloquer.

D'après une recherche bibliographique sur les prototypes réalisés et les études numériques faites sur la production du froid solaire par adsorption. Le dispositif expérimental réalisé a un coefficient de performance solaire COP_s dans une certaine mesure acceptable avec les conditions opérationnelle (températures de fonctionnement), en comparaison avec les études réalisées.

TABLEAU 3.

COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL
AVEC D'AUTRES TRAVAUX.

Référence	Buchtera et al. (2003)	Leite et Dagueuet (2000)	Sumathy and Zhongfu (1999)	Présent travail
Couple de travail	Charbon actif-Méthanol	Charbon actif-Méthanol	Charbon actif-Méthanol	Charbon actif-Méthanol
COP _s	0,08 – 0,13	0,24	0,1 – 0,12	0,054 – 0,09
T _a (°C)	-	20,6 - 27,3	6 - 13	25
T _g (°C)	-	105	70 - 78	80 - 110
T _e (°C)	-	-0,9	-6	1
T _c (°C)	-	33	-	35
Surface de captation (m ²)	2	-	0,92	0,19

V. CONCLUSION

Dans cet article, on présente les résultats d'une étude expérimentale réalisée sur le dispositif d'une machine frigorifique à adsorption utilisant le couple charbon actif AC-35/méthanol. Cette dernière est réalisée et testée au niveau du laboratoire du froid et climatisation par énergie électrique d'origine renouvelable, FCEEOR, de l'Unité de Développement des Equipements Solaire, UDES, Tipaza affiliée au Centre de Développement des Énergies Renouvelables, CDER (Algérie).

Les températures de fonctionnement du réfrigérateur à adsorption ont été mesurées pour chacune des deux irradiations appliquées (800, 1020 W/m²). Les mesures expérimentales ont été présentées et discutées. Afin d'évaluer les performances du dispositif réalisé, par calcul de son COP_s et COP_{th}, un code de calcul est développé en utilisant le modèle mathématique de Dubinin-Astakhov. Après la validation du code de calcul, il a été conclu que le dispositif réalisé a prouvé un COP_s acceptable.

Par ailleurs, les distributions des températures mesurées pendant les différentes phases du cycle ont montré que la température de régénération n'a pas dépassé les 110°C en restant en dessous de 150°C où le méthanol commence à se décomposer. Ainsi, on a pu attendre des températures de l'ordre de -1°C dans l'enceinte contenant l'évaporateur du prototype réalisé en restant sur des valeurs du COP_{th} dans les normes de cycle idéal à adsorption.

Référence

[1] R. Delgado, A. Choisier, P. Grenier, I. Ismail, F. Meunier, and M. Pons, "Étude du cycle intermittent charbon actif-méthanol en vue de la réalisation d'une machine à fabriquer de la glace fonctionnant à l'énergie

solaire.," International Institute of Refrigeration; Jerusalem, Israel 1982.

- [2] F. Mhiri and S. El Golli, "Étude d'un réfrigérateur solaire à adsorption solide avec le couple charbon actif-méthanol," *Revue Générale de Thermique*, vol. 35, pp. 269-277, 1996.
- [3] C. H. Li, R. Z. Wang, and Y. J. Dai, "Simulation and economic analysis of a solar-powered adsorption refrigerator using an evacuated tube for thermal insulation," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 249-269, 2003.
- [4] C. Hildbrand, P. Dind, M. Pons, and F. Buchter, "A new solar powered adsorption refrigerator with high performance," *Solar Energy*, vol. 77, pp. 311-318, 2004.
- [5] F. Lemmini and A. Errougani, "Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator," *Renewable Energy*, vol. 30, pp. 1989-2003, 2005.
- [6] Z. Huizhong, M. Zhang, Z. Liu, Y. Liu, and X. Ma, "Mechanical and experimental study on freeze proof solar powered adsorption cooling tube using active carbon/methanol working pair," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2434-2438, 2008.
- [7] Z. Lu, R. Wang, and Z. Xia, "Experimental analysis of an adsorption air conditioning with micro-porous silica gel water," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, pp. 1015-1020, 2013.
- [8] A. El Fadar, "Thermal behavior and performance assessment of a solar adsorption cooling system with finned adsorber," *Energy*, vol. 83, pp. 674-684, 2015.
- [9] X. Ji, M. Li, J. Fan, P. Zhang, B. Luo, and L. Wang, "Structure optimization and performance experiments of a solar-powered finned-tube adsorption refrigeration system," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1293-1300, 2014.
- [10] M. A. Djebiret, B. Abbad, A. Benchabane, M. Ouali, F. Yahi, M. Berdja, and A. Rouag, "Experimental study of solar adsorption refrigeration device," *Journal of applied engineering science & technology*, vol. 4, pp. 135-142, 2018.
- [11] M. A. Djebiret, M. Ouali, M. Mokrane, N. Hatraf, and N. Kasbadji Merzouk, "Etude Paramétrique d'un Cycle a simple effet d'une Machine Frigorifique d'Adsorption," *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*, vol. 4, pp. 212-215, 2015.
- [12] M. Pons and P. Grenier, "A phenomenological adsorption equilibrium law extracted from experimental and theoretical considerations applied to the activated carbon-methanol pair," *Pergamon Journals*, vol. 24, pp. 615-625, 1986.
- [13] M. Diny, "Étude du fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption modélisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine." in *Mécanique énergétique*. Nancy 1: Université Henri Poincare. 1996, pp. 177.

- [14] A. Bejan and D. Kraus, Heat transfer handbook. New York, 2003.
- [15] W. Chekirou, "Étude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption." Constantine: Université Mentouri, 2008, pp. 197.
- [16] F. Meunier, "Solid sorption heat powered cycles for cooling and heat pumping applications," Applied Thermal Engineering, vol. 18, pp. 715-729, 1998.
- [17] E. Passos, F. Meunier, and J. C. Gianola, "Thermodynamic performance improvement of an intermittent solar-powered refrigeration cycle using adsorption of methanol on activated carbon.," Heat Recovery Systems, vol. 6, pp. 259-264, 1986.
- [18] K. Sumathy and L. Zhongfu, "Experiments with solar-powered adsorption ice-maker," Renewable Energy, vol. 16, pp. 704-707, 1999.

Evolution sous Contraintes Mécaniques des Caractéristiques Thermique et Electrique des Constituants Fondamentaux d'une Pile à Combustibles PEMFC.

M. Hamour¹, A. Ouibrahim¹

¹Laboratoire d'Energétique Mécanique et Matériaux - LEMM,

Université Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou, Algérie.

Abstract. The current energy issues lead us to consider and exploit all sources and all possible energy carriers. Confidence in a civilization based solely on oil has shown its limits, both in economic terms (prices and availability of raw material) and ecological (release of greenhouse gases) and geopolitical conflicts over reserve strategic).

Pollution, global warming and the depletion of fossil fuels have become global concerns for the future. Fuel cells are emerging as the technology of alternative power generation clean and high yields. They provide the conversion of chemical energy of gas consumed in power.

However, despite the attractiveness of this technology, many technological obstacles still and slow technology penetration of fuel cells in general and the fuel cell proton exchange membrane (PEMFC), particularly in the market of the energy.

In this sense , our contribution is concerned by the physical-chemical, thermal and electrical experimental properties of the cell including the diffusion layer GDL, which contribute to the knowledge of thermomechanical stresses developing in the stack, which are very important to optimize the thermal management and water.

Key words: PEMFC – Gas Diffusion Layer- Thermal conductivity- Electrical conductivity– Energy.

1- Introduction

Les problématiques énergétiques actuelles nous imposent à considérer et à exploiter toutes les sources et tous les vecteurs d'énergie possibles.

A ce jour, la production d'énergie a été principalement assurée par les énergies fossiles comme le pétrole, le gaz ou le charbon issu de la fossilisation de végétaux accumulés dans le sous-sol au fil des ères géologiques. En plus de n'être pas renouvelables, ces combustibles fossiles savent provoquer de nombreux et graves problèmes environnementaux et climatiques [1]. Ainsi, le réchauffement de la planète, sa pollution et l'épuisement de ces ressources fossiles deviennent des préoccupations mondiales pour les années à venir [2].

La pile à combustible peut constituer à cet égard, parmi tant d'autre, une énergie renouvelable, durable et respectueuse de l'environnement. Cette pile est un convertisseur d'énergie performant en termes de rendement, qui transforme l'énergie chimique de l'hydrogène en énergie électrique d'une part et en chaleur d'autre part [2,3]. Cependant, son coût est toujours trop élevé pour qu'elles deviennent des produits commerciaux viables [4-6]. Parmi les problèmes qui limitent la compréhension et l'optimisation du fonctionnement des PEMFC, on peut mentionner la gestion de l'eau et de la chaleur dans le cœur de ces piles [7-10].

Dans ce contexte, parmi les constituants fondamentaux au cœur de ces piles, nous nous sommes ainsi intéressés dans

cette étude à la couche de diffusion de gaz (Gas Diffusion Layer, GDL) et aux plaques bipolaires en graphite.

Dans une première contribution, l'effet des contraintes thermomécaniques sur les constituants clé du cœur de ces piles a été étudié pour constater leur influence sur la conductivité thermique [11-15] et électrique de la GDL et sur la mousse en acier inoxydable [16] dans le but de remplacer ces plaques bipolaires en graphites existantes par de la mousse en acier inoxydable SSF (Stainless Steel Foam AISI 316) afin d'améliorer les performances de ces PEMFC.

Ainsi, des expériences systématiques ont été entreprises sur ces deux matériaux pour mettre en évidence certains effets et en particulier, l'influence de la variation de la pression sur l'évolution des différentes propriétés thermique et électrique, qui, jusqu'à présent, semble ne pas avoir fait l'objet d'études systématiques.

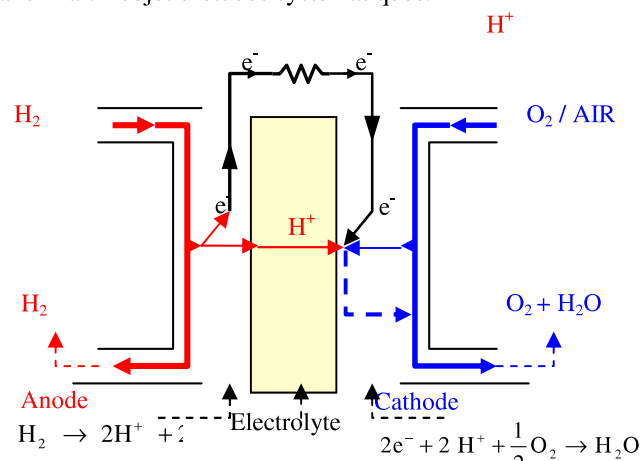


Figure 1: Schéma du fonctionnement d'une pile à membrane (PEMFC)

2 Expérimental

2.1- Conductivité thermique

Un fil en tantale, de 99,9% de pureté, d'environ 26 mm de longueur et de 25 µm de diamètre a été utilisé comme élément de mesure [15]. Le fil en tantale est soudé à ses deux extrémités à des broches de même matériau de 125 µm de diamètre. L'ensemble (fil avec broches) est fixé sur un cadre en Kapton pour former un capteur (Fig. 2).

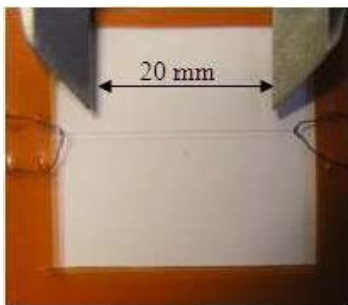


Figure 2: Fil chaud en tantale

Les différents éléments sont reliés à un micro-ordinateur par l'intermédiaire d'une interface GPIB et une programmation sous LabVIEW® (National Instruments) (fig 3), spécifiquement décrite pour la détermination de la conductivité thermique λ , commande les instruments et enregistre les données expérimentales [14-16]. Tous les appareils sont pilotés par un ordinateur et permettent de suivre l'évolution de la résistance électrique du fil en temps réel.

L'ensemble du système de mesure électrique, représenté sur la figure 3, est décrit en détail dans [14, 15]

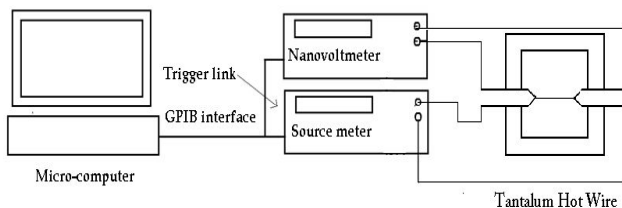


Figure 3 : Schéma du système de mesure

Le tissu de carbone représenté sur la figure 4 constitue la couche de diffusion (GDL) dont on cherche ici à déterminer la conductivité thermique

Un dispositif de chargement mécanique a été élaboré [14,18] afin de mettre sous compression les couches de la GDL.

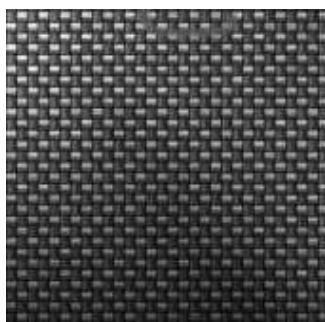


Figure 4 : Tissu de carbone(GDL)

La mousse SSF AISI 316 dont on cherche ici à déterminer aussi sa conductivité électrique est

représentée sur la figure 5 constitue les plaques bipolaires du cœur d'une pile à combustible.

Un dispositif de chargement mécanique a été élaboré [16] afin de mettre sous compression les constituants du cœur d'une pile à combustibles.

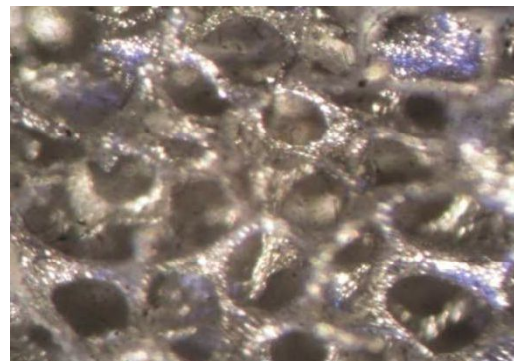


Figure 5 : Mousse SSF AISI 316

2. 2 – Conductivité électrique

Pour la détermination de la conductivité électrique de la GDL et de la mousse SSF AISI 316, un banc d'essai a été utilisé. Il est composé essentiellement du dispositif contenant ces quatre points, d'un générateur de courant constant de grande précision et de très bonne stabilité. Un nanovoltmètre connecté aux mêmes bornes du fil a été ajouté au circuit de mesure afin d'assurer une meilleure précision.

Le dispositif de compression mécanique utilisé est représenté par la figure 6. Ce dispositif est décrit en détails dans [16,17]

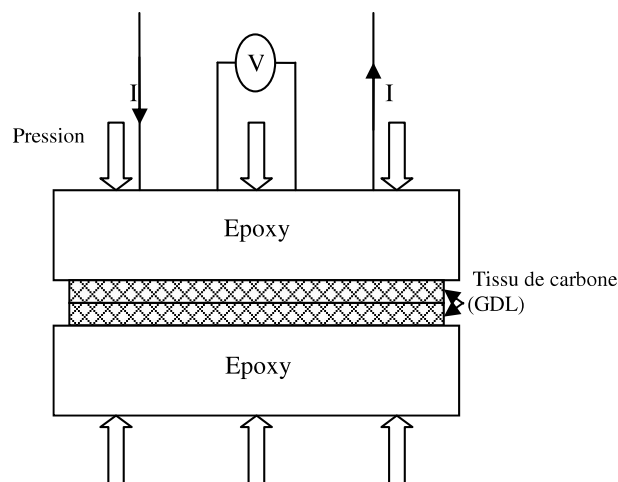


Figure 6: Mécanisme de compression mécanique

Pour toutes les expériences menées, et pour chaque pression appliquée, le courant électrique (délivré par le compteur source Keithley 2400) est fixé, il est d'une intensité de 300 mA.

L'application de ce courant électrique donne lieu à la création d'une différence de potentiel. L'automatisation de la procédure expérimentale de l'acquisition des données permet d'enregistrer la réponse en termes de la différence de potentiel V qui permettra ensuite d'évaluer la conductivité électrique [19-21]. Les électrodes sont disposées en lignes et espacées d'une distance de 12mm l'une de l'autre (fig. 7).

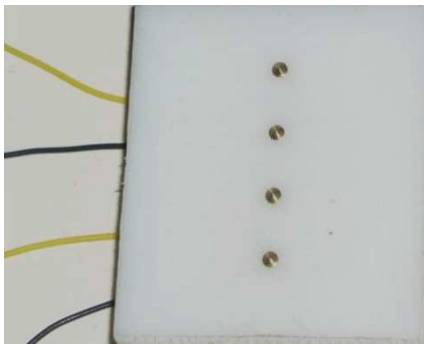


Figure 7: Dispositif de mesure à quatre points

Les différentes couches du tissu de carbone GDL sont prises en sandwich entre deux plaques planes en époxy non conductrices qui ont pour rôle la compression des couches de la GDL. Pour faciliter l'accès du système de mesure, les quatre pointes traversent la plaque supérieure de l'époxy puis elles sont implantées sur la surface de la GDL.

Le contact est assuré entre ces pointes et le matériau dont on veut déterminer sa conductivité électrique grâce à une pression délivrée par une presse mécanique. Un temps de compression d'une durée 2mn environ a été sélectionné pour chaque test.

3. Résultats Expérimentaux

Influence de la compression mécanique sur les deux conductivités thermique et électrique du tissu de carbone et de la mousse SSF AISI 316

A. Conductivité thermique

3.1-Conductivité thermique de la GDL

3.1.1- Faibles Pressions

On insère le capteur entre les couches du tissu de carbone d'une superficie de 25 cm², puis on place l'ensemble à l'intérieur du dispositif de chargement. Dans un premier temps, les tests ont été effectués à faibles pressions en appliquant d'une façon progressive et par étape des petites masses allant de 79 jusqu'à 12 500g sur le dispositif de chargement contenant les trois couches du tissu de carbone

(épaisseur = 0.285 mm). Les mêmes essais ont été répétés dans les mêmes conditions en augmentant cette fois ci le nombre de couches en passant de trois à cinq puis à sept. Ces tests consistent à mesurer l'évolution de la conductivité thermique du tissu de carbone en fonction de la pression appliquée, conduisant ainsi aux résultats de la figure 8.

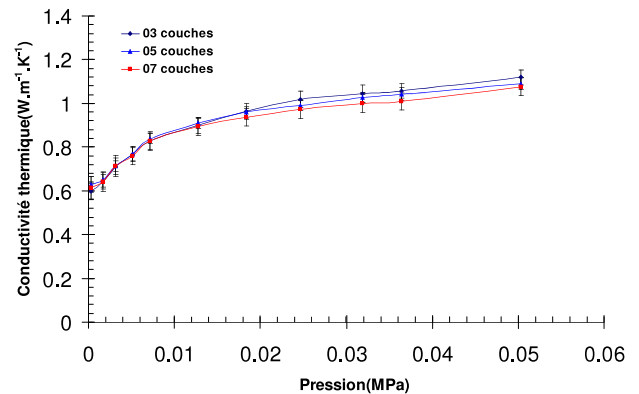


Figure. 8: Variation de la conductivité thermique en fonction de la pression pour les différentes couches du tissu de carbone à faibles pressions

3.1.2- Fortes Pressions

Afin d'obtenir des pressions élevées, correspondantes à celles obtenues par le serrage des boulons de la pile, une presse mécanique a été utilisée. Les mêmes expériences ont été répétées dans les mêmes conditions que précédemment en faisant varier la pression de zéro jusqu'à 8 méga Pascal (MPa) pour aboutir ainsi aux résultats explicités par la figure 9.

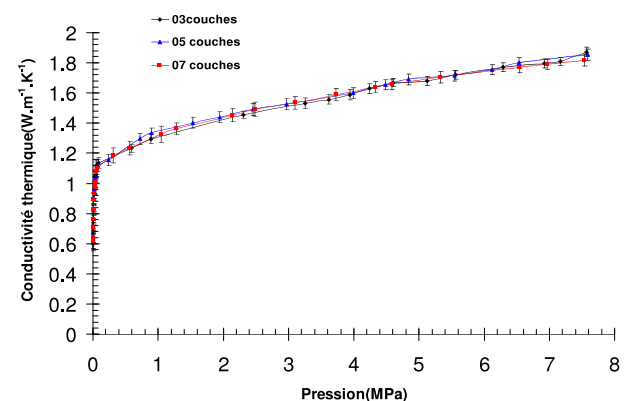


Figure. 9: Variation de la conductivité thermique en fonction de la pression pour les différentes couches du tissu de carbone à fortes pressions

3. 2. Conductivité électrique

3. 2.1- Conductivité électrique de la GDL

Le travail consiste en l'étude de l'influence de la pression mécanique sur la conductivité électrique du tissu de carbone GDL placé entre deux plaques en époxy non conductrices.

Des pressions variant de 0 jusqu'à 7 MPa ont été appliqués progressivement par étape à l'aide d'une presse mécanique sur le dispositif contenant la GDL. Dans un premier temps, les essais ont été effectués sur deux couches de la GDL. Les mêmes essais ont été refaits dans les mêmes conditions que précédemment en augmentant cette fois-ci le nombre de couche en passant de deux à quatre couches. L'emploi des différents nombres de couches permet de confirmer l'hypothèse du "milieu infini semi" et l'estimation de l'importance de la résistance de contact dans nos expériences. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 10.

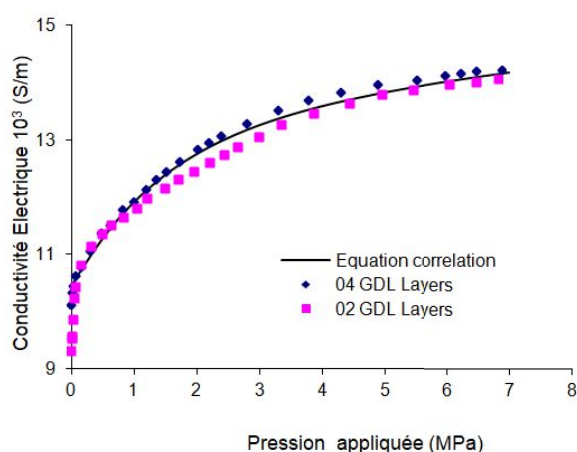


Figure. 10: comparaison de la variation de la conductivité électrique en fonction de la pression pour les différentes couches du tissu de carbone

3. 2.2- Conductivité électrique de la SSF AISI 316

Les mêmes expériences ont été répétées dans les mêmes conditions que précédemment en remplaçant la GDL par deux plaques en mousse SSF AISI 316 pour aboutir ainsi aux résultats explicités par la figure 11.

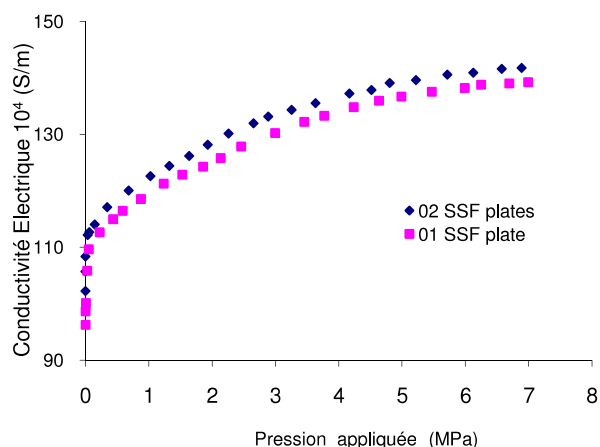


Figure.11 : Comparaison de la variation de la conductivité électrique en fonction de la pression pour les différentes couches de la mousse SSF AISI 316

4. Interprétation des résultats expérimentaux

Les deux conductivités thermique et électrique du tissu de carbone GDL et de la mousse SSF AISI 316 sous différents chargements mécaniques ont été testées. Pour chaque compression, plusieurs essais ont été menés, dans les mêmes conditions de fonctionnement pour vérifier la reproductibilité de ces résultats.

Tous les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'évolution de ces deux conductivités De la GDL et de la SSF AISI 316 est une fonction monotone croissante de la pression appliquée (figures 9 à 11). Par ailleurs, on notera sur ces mêmes courbes que le nombre de couches n'a aucune influence sur l'amplitude de ces deux conductivités et qu'en fait quelque soit le nombre de couches choisi, on obtient pratiquement une courbe unique, comme si les courbes concernées par chacune des épaisseurs de couches collapsent entre elles.

Pour des faibles compressions, l'augmentation de ces deux conductivités est remarquable. Ce résultat peut s'expliquer par la diminution du volume des pores du tissu de carbone pendant la compression. Le tissu de la GDL se comprime de plus en plus, le volume des pores diminue, l'air est évacué et le contact entre les fibres s'améliore, c'est ce qui conduit à une augmentation de la conductivité thermique et électrique.

5. Conclusion

Les expériences menées montrent l'indépendance des deux conductivités thermique et électrique mesurées du nombre de couches de la GDL et de la mousse SSF 316 et, par conséquent, justifie la robustesse des méthodes développées.

Les relations expérimentales constitutives peuvent être analysées dans deux régions. Dans la première région, pour de faibles compressions, nous avons une forte tendance à l'augmentation des deux conductivités thermiques et électrique en raison du matériau compacté. Dans la deuxième région pour des pressions suffisamment élevées, l'évolution est moins marquée, on commence à observer une certaine saturation dans l'augmentation des deux conductivités thermique et électrique qui correspond à une structure entièrement compactée.

L'emploi de plusieurs couches de ces matériaux, GDL et mousse SSF AISI 316 permet de confirmer l'hypothèse d'un milieu semi infini et d'estimer l'importance des résistances de contact dans nos expériences.

Références

- [1] <http://www.energies-renouvelables.org/>
- [2] GIEC. Climate change 2007. *http : //www.ipcc.ch, 2007*
- [3] Didierjean S, Lottin O., Lapicque. F , Ramousse j. Boillot M., Maillet D., La pile à combustible : un élément de diversification énergétique. Forces et faiblesses de la pile à membrane échangeuse de protons, Bulletin de la société Française de physique 2003, no. 141, pp. 6-9.
- [4] W. Vielstich, A. Lamm, H.A. Gasteiger (eds.), *Handbook of Fuel Cell Fundamentals, Technology and Application* (Wiley, Chichester, UK, 2003)
- [5] Tero Hottinen, Olli Himanen, Suvi Karvonen, Iwao Nitta, Journal of Power Sources 171, pp 113–121(2007)
- [6] Chaitanya J. Bapat, Stefan T. Thynell, J. of Power Sources 179 (2008) 240–251
- [7] Julien Ramousse Transferts couplés masse-charge- chaleur dans une cellule de pile à combustible à membrane polymère, 2005 Nancy
- [8] J. Kleemann, F. Finsterwalder, W. Tillmetz ; Journal of Power Sources 190 (2009) 92–102
- [9] Daniil Bograchev , Mikael Gueguen , Jean-Claude Grandidier , Serguei Martemianov, Journal of Power Sources 180 (2008) 393–401
- [10] Ahmet Kusoglu , Anette M. Karlssona, Michael H. Santare , Simon Cleghorn , William B. Johnson J. of Power Sources 161 (2006) 987–996
- [12] Jiabin Ge, Andrew Higier, Hongtan Liu, J. of Power Sources 159 (2006) 922–927
- [13] Iwao Nitta, Tero Hottinen, Olli Himanen, Mikko Mikkola, J. of Power Sources 171 (2007) 26–36
- [14] ROS. T. Sohn J L: Some issues on performance analysis of fuel cells in thermodynamic power point of view, J. of Power Sources 167(2) (2007) 295–301
- [15] M. Hamour, J.P. Garnier, J.C. Grandidier, A. Ouibrahim and S. Martemianov: Thermal Conductivity Characterization of Gas Diffusion Layer in Proton Exchange Membrane Fuel Cells and Electrolyzers Under Mechanical Loading, International Journal of Thermophysics, Vol. 32, N° 5, pp : 1025-1037,
- [16] M. Hamour, J.C. Grandidier, A. Ouibrahim, S. Martemianov, Electrical conductivity of PEMFC under loading, Journal of Power Sources, 289(2015) 160-167.
- [17] J.P. Garnier, J.P. Maye, J. Saillard, G. Thévenot, A. Kadjo, S. Martemianov, Int. J. Thermophys. 29, 468 (2008)
- [18] A. Kadjo, J.P. Garnier, J.P. Maye, S. Martemianov, Int. J. Thermophys. 29, 1267 (2008)
- [19] Valdes, L. Resistivity Measurements on Germanium for Transistors. Proceedings of the IRE, 42(2):420{427, 1954.
- [20] Van der Pauw, L. A method of measuring resistivity and Hall effect on lamellae of arbitrary shape. Philips technical review, 20 :220-224, 1958.
- [21] Van der Pauw, L. A method of measuring specific resistivity and Hall effect of discs of arbitrary shape. Philips Research Reports, 13 :1-9, 1958.

Etude technique et économique d'un système solaire photovoltaïque/solaire thermique: Application à Bejaia (Algerie)

D. Rekioua^{#1}, T. Mehdioui¹, K. Mansouri, S. Taguelmimt

[#]Laboratoire LTH, Faculté de Technologie, Université de Bejaia, 06000 Bejaia, Algérie

¹dja_rekioua@yahoo.fr

Abstract— Ce travail sera consacré d'une part au dimensionnement de l'habitat solaire qui comporte deux parties, la première pour le dimensionnement de la chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité, l'autre partie est dédiée à l'étude du système solaire thermique. D'autre part, on fera l'étude technico- économique pour du système proposé selon les éléments le constituant. On terminera notre travail par une conclusion, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

Keywords— Photovoltaïque, solaire thermique, batteries

I. INTRODUCTION

Abondante, renouvelable, non polluante et disant gratuite, l'énergie solaire qui parvient sur terre représente la quasi-totalité de l'énergie disponible sur terre. L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité par effet photovoltaïque. Dans le domaine de l'habitat de plus en plus d'architectes choisissent l'énergie solaire ; cette tendance se simplifie probablement avec les progrès accomplis en architecture global de ces système par exemple la facilité de leur intégration dans l'habitat [1-13].

Ce travail sera consacré d'une part au dimensionnement de l'habitat solaire qui comporte deux parties, la première pour le dimensionnement de la chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité, l'autre partie est dédiée à l'étude du système solaire thermique. D'autre part, on fera l'étude technico- économique pour du système proposé selon les éléments le constituant. Une étude technico-économique est faite pour le système proposé. Un devis estimatif est proposé. On terminera notre travail par une conclusion, dans laquelle, nous ferons une synthèse récapitulative du travail présenté.

II. PRESENTATION DU PROJET DE LA MAISON SOLAIRE A BEJAIA :

A. Gisement solaire :

La maison dimensionnée se situe à Bejaia : Latitude : 36.45N ; Longitude : 5.04E ; Altitude : 500 m. L'irradiation globale moyenne mensuelle journalière sur un plan horizontal du site de Bejaia et les moyennes mensuelle des températures sont présentées sur la figure suivante :

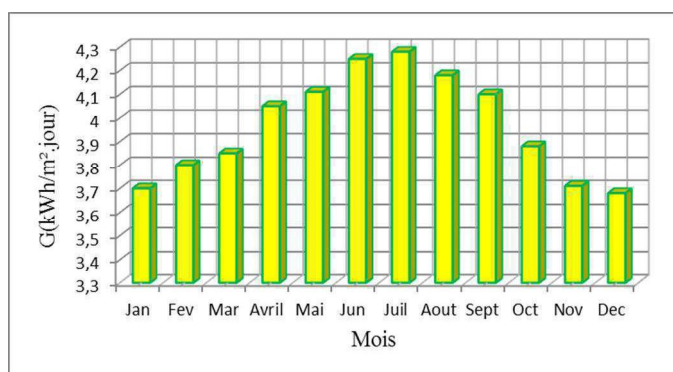


Fig. 1 Irradiations moyennes mensuelles journalières et moyennes mensuelles des températures

B. Présentation globale de l'installation solaire de la maison :

Le schéma ci-dessous représente le modèle de la maison étudié sous SOLIDWORKS.

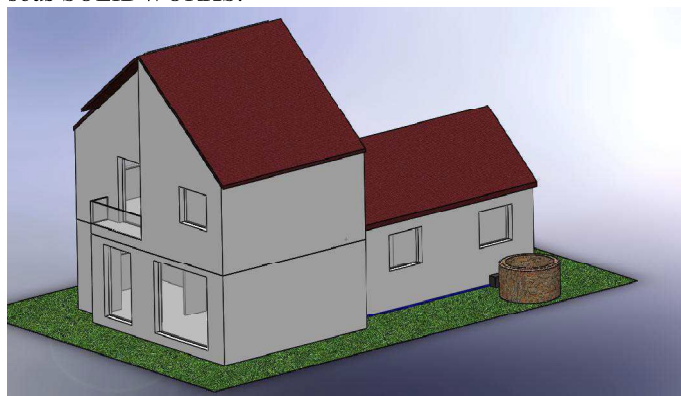


Fig. 2. Plan de la maison sous le logiciel solidWorks

III. ETUDE TECHNIQUE DU PROJET

A. Les principaux éléments d'une installation photovoltaïque

En général, les installations photovoltaïques comprennent quatre éléments essentiels : un générateur photovoltaïque, un système de régulation, une ou plusieurs batteries, un onduleur et des câbles.

B. Choix des méthodes de dimensionnement du GPV

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïques.

1. Méthode du besoin journalier.

La maison consomme une énergie totale égale à 14.737 kWh/jour. Les caractéristiques du module photovoltaïque choisi pour établir ces dimensionnements, sont les suivantes :

Table 1 :

FICHE TECHNIQUE DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE SIEMENS SM110-24 [1]

La puissance crête d'un module : $P_c=110Wc$
La tension a vide : $U_{co}=21,50V$
Le courant de puissance maximale : $I_{mpp}=6,25A$
La tension de puissance maximale : $U_{mpp}=17,7V$
Le courant de court-circuit : $I_{cc}=6,8A$

Les résultats sont réunis dans le tableau ci-dessous :

Table 2 :

RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LE BESOIN JOURNALIER

N_e (h/j)	$P_{pv,j}$ (Wh/j)	$P_{pv,Jr\acute{e}el}$ (Wh/j)	N_{pv} (Panneaux)	$N_{pv,nouv}$ (Panneaux)	P_{nouv} (W)
2.3	253	202.4	72.81	73	8030

2. Méthode des puissances

Les résultats sont réunis dans le tableau ci-dessous :

Table 3 :

RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LA PUISSANCE

P_c (Wc)	N_{pv} (panneaux)	$N_{pv,nouv}$ (panneaux)	P_{nouv} (W)
2962.555	26.93	27	2970

3. Méthode des surfaces

Les résultats sont réunis dans le tableau ci-dessous :

Table 4 :

RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LA SURFACE

$S1=20.74 m^2$		$S2=5.83 m^2$	
N_{pv}	$P_{nouv}(Wc)$	N_{pv}	$P_{nouv}(Wc)$
23	2530	6	660

4. Comparaison des trois méthodes

Les résultats des trois méthodes de dimensionnement sont réunis dans le tableau suivant.

Table 5 :

RÉSULTATS OBTENUS DES TROIS MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT

Dimensionnement selon le besoin journalier	Dimensionnement selon la puissance	Dimensionnement selon la surface
73 panneaux	25 panneaux	23 panneaux

C. Montage des panneaux selon les dimensions du toit et des panneaux

Soit la surface de la toiture de la maison de $26.57m^2$ constituée de deux surfaces différentes : La première surface égale à $S1= 20.74 m^2$ (3.4m selon la longueur et 6.1 m selon la largeur), la deuxième surface étant une surface de $S2= 5.83 m^2$ seulement, (1.59m selon le sens de la longueur et 3.67m selon le sens de la largeur). Et le panneau choisi est de 110Wc (siemens SM110-24) de dimensions (0.66 m selon le sens de la longueur et 1.321 selon le sens de la largeur).

Pour la première surface on prend le nombre de panneaux selon le sens de la longueur qui est égale à 20 panneaux, Par ailleurs, pour la seconde surface on opte pour le montage selon le sens de la largeur avec le nombre de panneaux de 5 panneaux. Nous aurons par conséquent, 25 panneaux au total et une puissance crête de 2750 Wc.

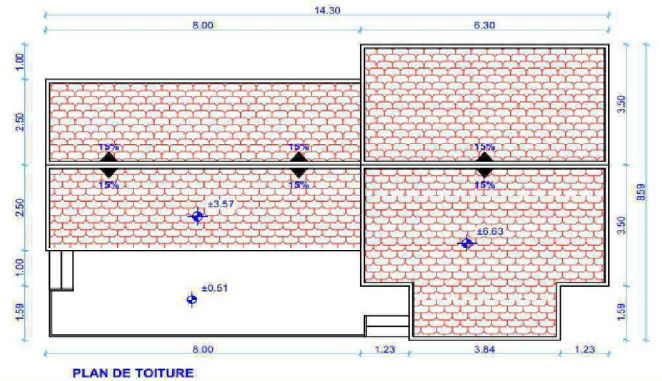


Fig. 5 : Plan du toit de la maison étudié

Les résultats des trois méthodes de dimensionnement sont réunis dans le tableau suivant.

Table 6 :

RÉSULTATS OBTENUS DES TROIS MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT APRÈS CORRECTION

Dimensionnement selon le besoin journalier	Dimensionnement selon la puissance	Dimensionnement selon la surface
73 panneaux	27 panneaux	25 panneaux

Le tableau montre que pour la méthode selon le besoin journalier on a besoins de 73 panneaux, 27 panneaux pour la méthode de puissance et 25 panneaux pour la méthode de dimensionnement selon les surfaces.

D. Dimensionnement de l'Onduleur

1. Par rapport à la méthode du besoin journalier :

Notre installation est composée de 73 panneaux d'une puissance crête de 110Wc. Donc la puissance crête totale est de 8030Wc.

Table 7 :

DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR POUR LA MÉTHODE SELON LE BESOIN JOURNALIER

Compatibilité en puissance	Compatibilité en tension		Compatibilité en courant
Pond, min	Pond, max	Npvs .min	Npvs .max
7,22kw	7,6285kW	21	36
			Npv. ch
			3

2. Par rapport à la méthode des puissances :

Notre installation est composée de 27 panneaux (GOLDI110PM) d'une puissance crête de 110Wc. Donc la puissance crête totale est de 2970Wc.

Table 8 :

DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR POUR LA MÉTHODE SELON LA PUISSANCE

Compatibilité en puissance	Compatibilité en tension		Compatibilité en courant
Pond, min	Pond, max	Npvs .min	Npvs .max
2,673kW	2,821kW	8	20
			Npv. ch
			2

3. Par rapport à la méthode de surface

Notre installation est composée de 25 panneaux (GOLDI110PM) d'une puissance crête de 110Wc. Donc la puissance crête totale est de 2750Wc.

Table 9

DIMENSIONNEMENT DE L'ONDULEUR POUR LA METHODE SELON LA SURFACE

Compatibilité en puissance		Compatibilité en tension		Compatibilité en courant
Pond, min	Pond, max	Npvs,min	Npvs,max	Npv, ch
2,475kW	2,613Kw	8	20	2

E. Dimensionnement de la batterie

1. La méthode selon le besoin journalier

Table 10 :

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE POUR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LE BESOIN JOURNALIER

Capacité des batteries (Ah)	Nombre de batteries calculé	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle	Nombre de batteries retenu
7675.52	35	4	9	36

Nous avons :

$$Chatt = \frac{Bj \times Jaut}{Vbatt \times DOD \times \eta} = 4849.17 \text{ Ah} \quad (1)$$

$$Nbatt = \frac{Chatt}{Cbatt, u} = 23 \quad (2)$$

$$Nbat, s = \frac{\text{tension de fonctionnement}}{\text{tension de la batterie}} \quad (3)$$

A partir de la nouvelle puissance crête la tension de fonctionnement est de 48V.

$$Nbat, s = 4 \text{ batteries}$$

$$Nbat, p = \frac{\text{nombre de batterie total}}{\text{nombre de batterie serie}} = 6 \quad (4)$$

Dans ce cas le nombre de batterie totale est :

$$Nbatt = Nbat, s \times Nbat, p = 24 \text{ batteries} \quad (5)$$

2. La méthode de dimensionnement selon la puissance

Table 11 :

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE POUR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LA PUISSANCE

Capacité des batteries (Ah)	Nombre de batteries calculé	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle	Nombre de batteries retenu
2846.25	13	4	4	16

Nous avons :

$$Npv, rest = Npv1 - Npv3 = 48 \text{ panneaux}$$

$$Bj = 9715.2 \text{ Wh}$$

$$Cbatt = \frac{Bj \times Jaut}{Vbatt \times DOD \times \eta} = 5060 \text{ Ah}$$

$$Nbatt = \frac{Cbatt}{Cbatt, u} = 23 \text{ batteries}$$

3. La méthode de dimensionnement selon la surface

Table 12

DIMENSIONNEMENT DU SYSTEME DE STOCKAGE POUR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LA SURFACE

Capacité des batteries (Ah)	Nombre de batteries calculé	Nombre de batteries en série	Nombre de batteries en parallèle	Nombre de batteries retenu
2635.41	12	4	4	16

F. Dimensionnement des câbles :

1. La méthode de dimensionnement selon le besoin

Table 13

.CALCUL DE LA SECTION DES CABLES POUR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LE BESOIN JOURNALIER

Méthode de dimensionnement selon la puissance Section des câbles coté DC											
Section des câbles entre le panneau et la boîte de raccordement (L=5m)	$I = \frac{1.25 \times Icr}{\rho \times L \times I} \quad I = 1.25 \times 6.8 \Rightarrow I = 8.5$ $S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V} \quad S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 5 \times 8.5}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 1.921 \text{ mm}^2$ <p>Donc on choisit le câble de 2.5 mm²</p>										
Section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC (L=10m)	$I = \frac{Impp \times Npv}{\rho \times L \times I} \quad I = 6.25 \times 73 \Rightarrow I = 456.25$ $S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V} \quad S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 10 \times 456.25}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 206.2 \text{ mm}^2$										
Branchement des batteries	Branchement des batteries										
Calcul la tension de la batterie	Calcul la tension de la batterie										
$Vbat = Vbat, u \times N$	$Vbat = 12 \times 5 \Rightarrow Vb = 60$										
Section des câbles entre le DC/DC et les batteries et section des câbles entre les batteries et l'onduleur (L=3m)	<table border="0"> <tr> <td>Calcul 1-α :</td> <td>Calcul 1-α :</td> </tr> <tr> <td>$1 - \alpha = \frac{Vbatt}{Vpv}$</td> <td>$1 - \alpha = \frac{12}{48} = 0.25$</td> </tr> <tr> <td>Calcul du courant de batterie</td> <td>Calcul du courant de batterie</td> </tr> <tr> <td>$Ibatt = \frac{I}{1 - \alpha}$</td> <td>$Ibatt = \frac{456.25}{0.25} = 1825 \text{ A}$</td> </tr> <tr> <td>$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$</td> <td>$S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 3 \times 1825}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 18.25 \text{ mm}^2$</td> </tr> </table>	Calcul 1-α :	Calcul 1-α :	$1 - \alpha = \frac{Vbatt}{Vpv}$	$1 - \alpha = \frac{12}{48} = 0.25$	Calcul du courant de batterie	Calcul du courant de batterie	$Ibatt = \frac{I}{1 - \alpha}$	$Ibatt = \frac{456.25}{0.25} = 1825 \text{ A}$	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 3 \times 1825}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 18.25 \text{ mm}^2$
Calcul 1-α :	Calcul 1-α :										
$1 - \alpha = \frac{Vbatt}{Vpv}$	$1 - \alpha = \frac{12}{48} = 0.25$										
Calcul du courant de batterie	Calcul du courant de batterie										
$Ibatt = \frac{I}{1 - \alpha}$	$Ibatt = \frac{456.25}{0.25} = 1825 \text{ A}$										
$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 3 \times 1825}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 18.25 \text{ mm}^2$										
Calcul courant	Calcul la tension de la batterie										
Calcul de a section coté AC	$I = \frac{Pch}{3V} \quad I = \frac{2215}{3 \times 17.7} = 7.696 \text{ A}$ $S = \beta \times \rho_1 \times I \times \frac{1}{S \times} \quad S = 139.6 \text{ mm}^2$										

2. La méthode de dimensionnement selon la puissance

Tableau 13

.CALCUL DE LA SECTION DES CABLES POUR LA METHODE DE DIMENSIONNEMENT SELON LA PUISSANCE

Section des câbles coté DC	
Section des câbles entre le panneau et la boîte de raccordement (L=5m)	$I = 1.25 \times Icr \quad S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 5 \times 8.5}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 1.921 \text{ mm}^2$ <p>Donc on choisit le câble de 2.5mm²</p>
Section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC (L=10m)	$I = Impp \times Npv \quad I = 6.25 \times 27 \Rightarrow I = 168.75$ $S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V} \quad S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 10 \times 168.75}{0.02 \times 17.7} \Rightarrow S = 6.27 \text{ mm}^2$
Branchement des batteries	Branchement des batteries
Calcul la tension de la batterie	Calcul la tension de la batterie
$Vbat = Vbat, u \times N$	$Vbat = 12 \times 5 \Rightarrow Vb = 60$

et l'onduleur (L= 3m)	Calcul 1-α :	Calcul 1-α :
	$1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}}$	$1 - \alpha = \frac{60}{17.7} = 3.389$
	Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{I}{1 - \alpha}$	Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{168.75}{3.39} = 49.77 A$
	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.68 \times 10^{-8} \times 49.77}{0.02 \times 17.7} = 6.7$ 49mm ²
Section les câbles coté AC		
Calcul courant Calcul de a section coté AC	$I = \frac{P_{ch}}{3V}$	$I = \frac{1770}{3 \times 230} = 4.30 A$
	$S = \beta \times \rho_1 \times I \times \frac{1}{\delta \times X}$	$S = 2 \times 0.0225 \times 4.30 \times \frac{1}{\delta \times X}$ S=50.7 mm ²

3. La méthode de dimensionnement selon la surface

Section des câbles coté DC		
Section des câbles entre le panneau et la boîte de raccordement (L=5m)	$I = 1.25 \times I_{cc}$	$I = 1.25 \times 6.8 = 8.5 A$
	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 8.5 \times 156}{0.02 \times 17.7} = 1.921 mm^2$ Donc on choisit le câble de 2.5mm ²
Section des câbles entre la boîte de raccordement et le régulateur DC/DC (L=10m)	$I = I_{mpp} \times N_{pv}$	$I = 6.25 \times 25 = 156.25 A$
	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 156.25 \times 156}{0.02 \times 17.7} = 70.62 mm^2$
Section des câbles entre le DC/DC et les batteries et section des câbles entre les batteries et l'onduleur (L= 3m)	Branchement des batteries	Branchement des batteries
	Calcul la tension de la batterie $V_{bat} = V_{bat.u} : V_{bat} = 12 \times 5 \Rightarrow V_{bat} = 60V$	Calcul la tension de la batterie $V_{bat} = 12 \times 5 \Rightarrow V_{bat} = 60V$
	Calcul 1-α :	Calcul 1-α :
	$1 - \alpha = \frac{V_{batt}}{V_{pv}}$	$1 - \alpha = \frac{60}{17.7} = 3.389$
	Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{I}{1 - \alpha}$	Calcul du courant de batterie $I_{batt} = \frac{156.25}{3.39} = 46.09 A$
	$S = \frac{\rho \times L \times I}{\Delta v \times V}$	$S = \frac{1.6 \times 10^{-8} \times 46.09 \times 156}{0.02 \times 17.7} = 6.25 mm^2$
Section les câbles coté AC		
Calcul courant Calcul de a section coté AC	$I = \frac{P_{ch}}{3V}$	$I = \frac{1770}{3 \times 230} = 3.98 A$
	$S = \beta \times \rho_1 \times I$	$S = 2 \times 0.0225 \times 3.98 = 46.93 mm^2$

G. Dimensionnement du système thermique

Tableau 14.

Vt,min	Ej (kW)	Stot	Np,th	Pa
$\frac{2 \times N_{PV} \times P_{PV} \times (T_{cc} - T_{ef})}{T_{st} - T_{ef}}$	$V \times C_p \times (T_{st} - T_{ef})$	$\frac{E_j}{\eta}$	$\frac{Stot}{5.11}$	$\frac{\rho \times h \times g \times Q}{\eta}$

Le tableau ci-dessous illustre les valeurs du volume du ballon de stockage, l'énergie nécessaire pour chauffer l'eau dans le ballon, le nombre de panneaux et la surface nécessaire pour l'installation de tous ces panneaux. Vu que le volume d'eau consommé est de 380 litres, nous avons décidé d'opter pour un ballon de 400 litres.

Tableau 15.

Vt,min (litres)	Ej (kW)	Stot (m ²)	Np,th	Pa (W)
380	22.227	9.19	6	2.57

Montage des panneaux:

Table 16.

TABLEAU RECAPITULATIF DU CALCUL DU NOMBRE DE PANNEAUX THERMIQUES

Selon la longueur			Selon la largeur		
NL ₁	NL ₂	Np,t	NI ₁	NI ₂	Np,t
$\frac{L_t}{L_{pv}}$	$\frac{L_t}{L_{pv}}$	NL ₁ × NL ₂	$\frac{L_t}{L_{pv}}$	$\frac{L_t}{L_{pv}}$	NI ₁ × NP _t
2	2	4	4	1	4

La meilleure combinaison c'est (2x2), à savoir, 2 branches en parallèles contenant chacune deux capteurs.

Autres ajustages :

Tableau 18.

Différents ajustement à rajouter

Pièces entourées de voisins qui chauffent	Chambres ensoleillées	Pièces de grande surface ou des pièces situées au nord	Chambres de grandes surfaces	Sanitaires
(-20%) de puissances	(-5 à 10%) de puissances	(+5 à 15%) de puissances	(+5 à 15%) de puissances	(+5%) de puissances

-Le bilan thermique de la maison

Volume de la maison

$V = 2.4 \times \text{la surface}$ (2.4 C'est les hauteurs des murs)

Notre maison est dans la région 1 parce elle a une l'attitude de 500m

Puissance de la maison

$$P = v \times 42 \times 1.1 \quad (6)$$

Tableau 19 :

bilan thermique de la maison

Pièce	Surface	Volume	Puissance	ajustage	Puissance ajustée
Chambre 1	11.1	26.64	1230.76	+10	1231.99
Chambre 2	14.4	34.56	1596.672	+15	1599.06
Salle d'eau	6.4	15.36	709.632	+10	780.59
Séjour/cuisine	23	55.2	2250.24	-10	2247.989
Chambre3	10.35	24.84	1108.8	-10	997.92
Chambre4	10.65	25.56	1180.872	sans ajustage	1180.872
			Puissance Totale		8076.984 W
			Puissance différence en puissance		7138.42 W
			Totale ajustée		938.564 W

H. Récapitulatif de l'étude technique :

Après avoir dimensionné les différentes parties, on a placé les différents composants dans le plan de la maison en 3D en utilisant le logiciel solidWorks.

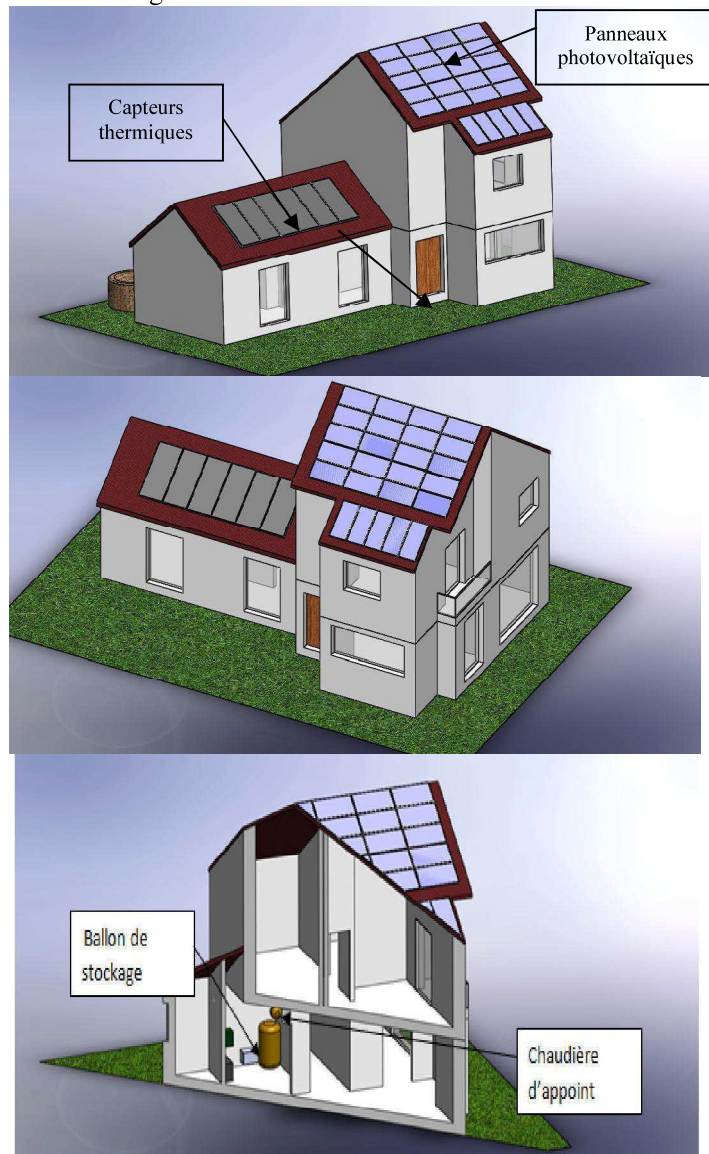


Figure 6. Représentation de l'installation PV/thermique

Avec :

1 : batterie de stockage, 2 : boîte de raccordement, 3 : convertisseur DC/AC, 4 : convertisseur DC/DC, 5 : charge, 6 : les câbles.

Nous proposons un organigramme du système hybride étudié.

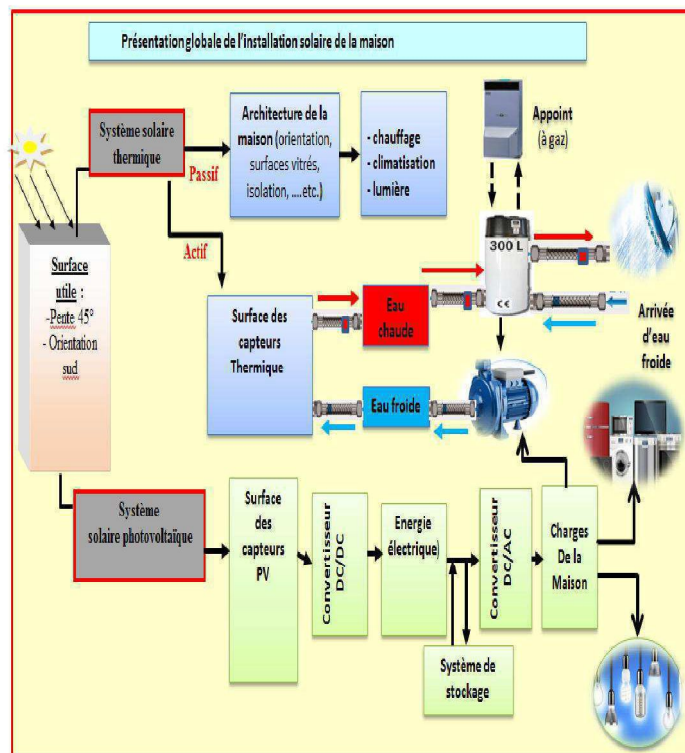


Figure 7. Présentation globale de l'installation solaire de la maison

IV. APPLICATION ET ANALYSE TECHNIQUE-ECONOMIQUE POUR LE SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Pour mieux comprendre on a préféré appliquer cette étude sur deux types de panneaux (monocristallin et poly-cristallin) de trois puissances différentes pour chaque type.

On doit prendre en compte le prix de maintenance et de rechange qui est de 2% du prix totale de l'installation photovoltaïque. Alors le prix total de l'installation est de **455 630 DA**

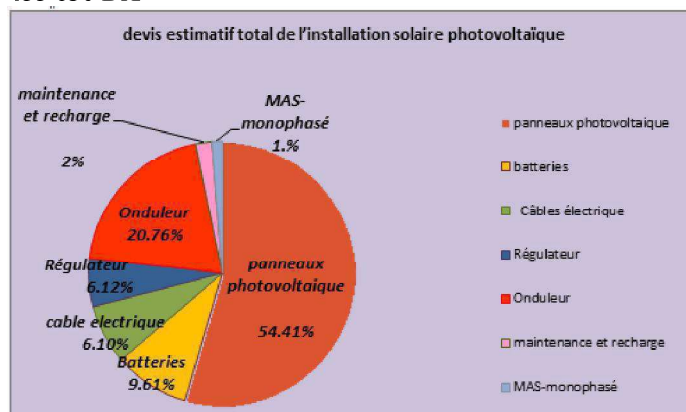


Fig. 8. Prix des éléments de l'installation photovoltaïque en pourcentage

V. APPLICATION ET ANALYSE TECHNICO-ECONOMIQUE POUR LE SYSTEME THERMIQUE

On a opté pour des capteurs solaires verticaux qui sont utilisés spécialement dans les installations de chauffage de ballons d'eau sanitaire, mais aussi pour le chauffage piscine. Pour cela on a pris trois dimensions différentes de ces capteurs. Le devis total de l'installation est de 211 223.4 DA. Les différents devis sont représentés dans les figures ci-dessous :

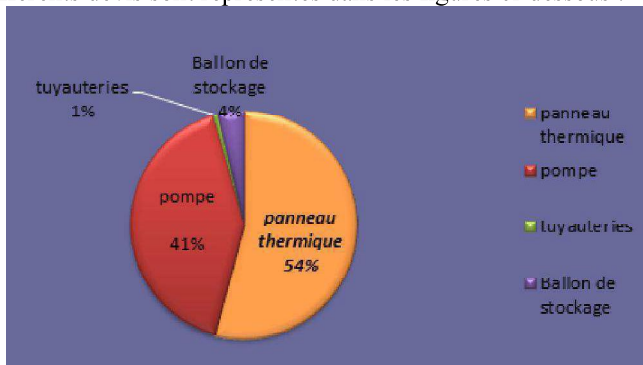


Fig 9 : Prix des éléments de l'installation thermique en pourcentage

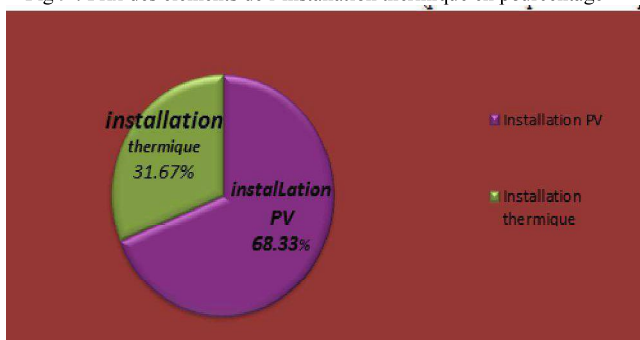


Fig. 10 : Prix des installations (photovoltaïque et thermique) en pourcentage

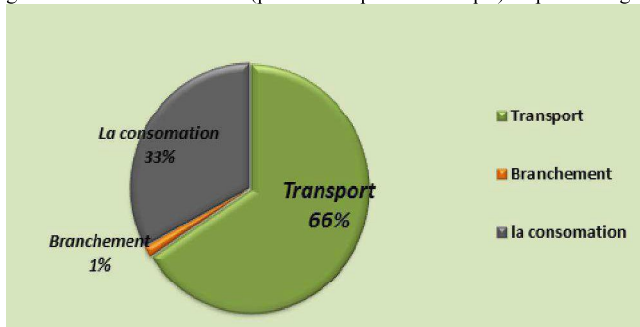


Fig.11 : Prix du raccordement au réseau en pourcentage

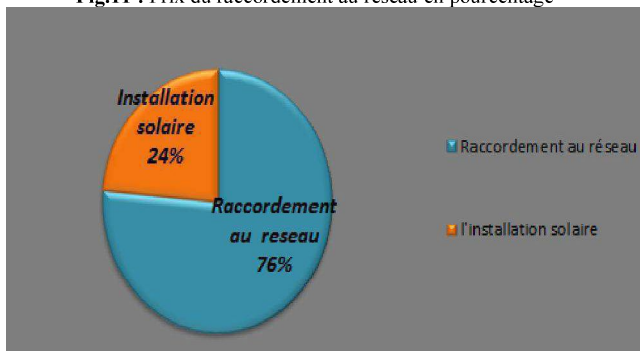


Fig.12: Comparaison entre le prix du réseau et le prix de l'installation solaire de la maison

D'après la figure on remarque que le cout de l'installation solaire autonome est moins couteux que celui du raccordement au réseau.

VI. CONCLUSIONS

Cette étude a été consacrée à une étude technique et économique comparative détaillée entre les différents composants des deux installations (photovoltaïque et thermique). Elle prend de plus en plus d'importance, elle est indispensable pour prendre des décisions et estimer le devis totale de installation solaire. L'étude se concentre sur la comparaison entre les différents devis des différents éléments de l'installation afin de choisir la combinaison la plus économique qui convient au mieux au besoin de la maison. Par la suite, nous avons élaboré une autre étude comparative entre le devis de l'installation solaire et celui du raccordement au réseau électrique. Nous avons constaté que le cout de l'installation en énergie solaire pour alimenter les régions isolées est moins élevé que celui ou la région est alimenté par le réseau de distribution électrique.

REFERENCES

- [1] D. Rekioua, E. Matagne. *Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, Simulation and Control*, (2012) Green Energy and Technology, 102.
- [2] [H. Ammar; A. Melit; M. Adouane; M. T. Bouziane](#); Techno-economic evaluation of a hybrid PV/diesel water pumping system for different pumping heads; in [3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference \(IRSEC\) 2015](#)
- [3] K.Amara « contribution a l'étude de conception d'une centrale PV » mémoire Magister université de Tizi ouzou 2015
- [4] S .Petibon « nouvelles architectes distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques » thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2009
- [5] B .Chikh –Bled « méthode de dimensionnement optimal d'une installation photovoltaïque » Revue internationale d'héliotechnique, N°41 (2010) 25-30
- [6] Z. Mokrani, D. Rekioua, T. Rekioua. Modeling, Control and Power Management of Hybrid Photovoltaic Fuel Cells with Battery Bank Supplying Electric Vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(27), pp.15178-15187, 2014.
- [7] N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani and D. Rekioua, Supervisor control for stand-alone photovoltaic/ hydrogen/ battery bank system to supply energy to an electric vehicle, *International Journal of Hydrogen Energy*. 39, pp.13777-13788, 2015.
- [8] S. G. Buja, Direct torque control of PWM inverter-Fed AC motor-a survey, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.51, pp. 744-757, 2004.
- [9] A. Haddoun, M. Benbouzid, D. Diallo, R. Abdessemed, J. Ghouili, and K. Srairi, A Loss-Minimization DTC Scheme for EV Induction Motor, *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 56(1),pp. 81-88, 2007.
- [10] Z. Keliang, J.A. Ferreira De Haan S.W.H., Optimal energy management strategy and system sizing method for stand-alone photovoltaic-hydrogen systems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(2), pp. 477-489, 2008.
- [11] Rekioua D., Bensmail S., Bettar N. Study of hybrid photovoltaic/fuel cell system for stand-alone applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(3), pp.13820-13826, 2014
- [12] C.Bernard, Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes, l'archive ouverte pluridisciplinaire HAL 2006
- [13] H.Yotto « Etude et conception d'une mini centrale PV » mémoire fin d'études Master 2 IE Bénin 2011.

ÉTUDE NUMÉRIQUE DE L'INFLUENCE DU NOMBRE DE PRANDLT SUR LA GÉNÉRATION D'ENTROPIE DANS UNE ENSEINTE CARRÉE CHAUFFÉE PAR LE BAS

FERROUDJ NAWAL^{#1}, KACHI SACIA^{*2}, BOUDEBOUS SAADOUN^{#3}

^{#1} *Laboratoire de Biotechnologie, École Nationale Supérieure de Biotechnologie (ENSB), Constantine, Algérie*
Ville universitaire Ali Mendjeli, BP E66 25100, Constantine, Algérie

¹n.ferroudj@ensbiotech.edu.dz

²kachi.sacia@gmail.com

²*Génie des procédés, Université de Constantine3, Algérie*

³s_boudebous@yahoo.fr

^{#3} *Université de Larbi Ben M'hidi O.E.B*
Algérie

Abstract— Dans ce travail nous nous intéressons à une étude numérique du phénomène de la génération d'entropie en convection mixte laminaire dans une cavité carrée. Les parois latérales de la cavité, soumises à une température froide, se déplacent vers le haut avec une vitesse constante. Une source de chaleur est placée au milieu de la paroi inférieure. Toutes les autres parois de la cavité sont considérées adiabatiques. Les équations générales de conservation, formulées par un modèle mathématique basé sur l'approche « fonction de courant-vorticité (ψ, ω) », sont discrétisées par la méthode des différences finies. Les résultats obtenus présentent l'influence du nombre de Prandtl pour différentes valeurs du nombre de Richardson sur les caractéristiques des champs de la génération d'entropie.

Keywords— Génération d'entropie, convection mixte, Différences Finies, Nombre de Prandtl, Cavité Carrée.

décrites dans plusieurs ouvrages de Bejan [3, 4]. Les concepts fondamentaux de l'énergie, de l'entropie et de leurs applications dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques ont été bien détaillés par Dincer et Cengel [5]. De nombreux travaux sur la génération d'entropie dans différents processus ont déjà été rapportés par Oztop et Al-Salem [6] et plus récemment par Oztop et al. [7]. L'étude de la littérature montre qu'aucune attention particulière n'a été accordée à la convection mixte dans la configuration géométrique considérée dans ce travail. Cette contribution vise à étudier l'influence des nombres de Prandtl et de Richardson sur la distribution de la génération de l'entropie et du nombre de Bejan en régime de convection mixte dans la dite configuration géométrique.

I. INTRODUCTION

Les écoulements des fluides dans des espaces confinés avec transfert de chaleur se rencontrent dans de très nombreux domaines de la science et de la technologie tels que par exemple, le refroidissement des composants électroniques, le chauffage et climatisation, les processus biotechnologiques etc. La résistance thermique et le frottement sont des mécanismes qui génèrent une irréversibilité lors des écoulements de fluide présents dans tout processus de transfert de chaleur. Cependant, la première et la deuxième loi de la thermodynamique indiquent que ces irréversibilités entraînent une perte de travail utile (génération d'entropie) dans les processus de transfert de chaleur. L'un des principaux défis de l'ingénierie thermique est de minimiser la génération d'entropie d'un système pour collecter le maximum de travail utile et améliorer ainsi l'efficacité énergétique du système [1, 2]. Les études théoriques les plus importantes de la production d'entropie dans les processus de transfert de chaleur ont été

II. DESCRIPTION DU PROBLEME

La géométrie considérée dans cette étude est une cavité carrée illustrée sur la figure 1. Elle contient une source de la chaleur sur la paroi inférieure soumise à une température constante T_c , les parois verticales se déplacent vers le haut avec une vitesse fixée V_0 , et sont maintenues à une température froide constante T_f . Les autres parois sont supposées adiabatiques. Nous supposons que l'écoulement est laminaire et bidimensionnel, le fluide newtonien et incompressible et qu'il satisfait l'hypothèse de Boussinesq.

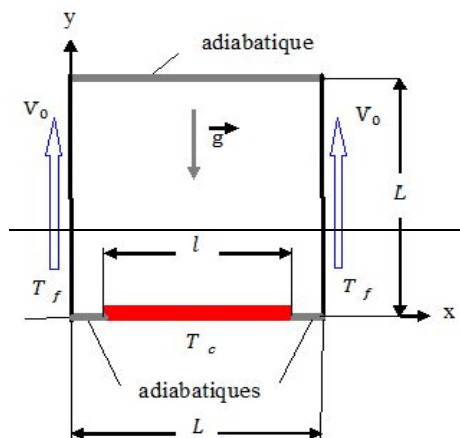


Figure 1. Configuration géométrique

Le modèle mathématique, basé sur la formulation fonction du courant-vorticité ($\psi-\omega$), régissant le phénomène de la convection mixte est donné par les équations adimensionnelles suivantes :

A. Equation d'énergie :

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re Pr}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (1)$$

B. Equation de la vorticité :

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + U \frac{\partial \omega}{\partial X} + V \frac{\partial \omega}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}} \left[\frac{\partial^2 \omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial Y^2} \right] + \text{Ri} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (2)$$

C. Equation de la fonction de courant :

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = -\omega \quad (3)$$

D. Composantes de vitesses :

$$U = \frac{\partial \psi}{\partial Y} \quad , \quad V = -\frac{\partial \psi}{\partial X} \quad (4)$$

Les paramètres figurant dans ces équations sont, respectivement, les nombres de Reynolds, de Prandtl et de Richardson et sont définis par les relations suivantes :

$$\text{Re} = \frac{V_0 L}{\nu} \quad , \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad , \quad \text{Ri} = \frac{Gr}{\text{Re}^2} \quad ,$$

$$Gr = \frac{g \beta (T_c - T_f) L^3}{\nu^2} \text{ est le nombre de Grashof.}$$

Les variables primitives et les variables sans dimensions sont reliés par les expressions suivantes :

$$X = \frac{x}{L} \quad , \quad Y = \frac{y}{L} \quad , \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_c - T_f} \quad , \quad U = \frac{u}{V_0} \quad , \quad V = \frac{v}{V_0} \quad , \quad \tau = t \frac{V_0}{L} \quad , \quad P = \frac{p - p_0}{\rho V_0^2}$$

Dans ces relations x et y sont les coordonnées cartésiennes ; u et v sont les composantes de la vitesse ; g est l'accélération terrestre, T est la température, t est le temps et p est la pression. ν , α , et β désignent, respectivement, la viscosité, la diffusivité thermique et le coefficient d'expansion thermique.

La résolution des équations précédentes est basée sur les conditions aux limites figurant sur la figure 1.

L'équation permettant la détermination du champ de la génération dans le domaine considéré est donnée par l'expression suivante [2] :

$$S_{gen} = \underbrace{\left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right]}_{S_\theta} + \underbrace{\varphi \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right]}_{S_\psi} \quad (6)$$

Dans cette formule S_θ est la génération d'entropie thermique, S_ψ la génération d'entropie visqueuse et

$\varphi = \frac{\mu V_0^2}{k \Delta T^2}$ est le coefficient de distribution d'irréversibilité.

Le nombre de Bejan (Be) local qui exprime le rapport entre la génération d'entropie thermique et la génération d'entropie totale est défini par :

$$Be = \frac{S_\theta}{S_\theta + S_\psi} \quad (7)$$

L'intégration numérique, des équations (6) et (7), sur toute la surface de la cavité (Voir l'équation (8)) nous permet de calculer la génération de l'entropie moyenne et le nombre moyen de Bejan.

$$\overline{S_{gen}} = \int_0^1 \int_0^1 (S_\theta + S_\psi) dXdY \quad \overline{Be} = \int_0^1 \int_0^1 Be dXdY \quad (8)$$

III. PROCEDURE NUMERIQUE

Le système d'équation (1-4) avec les conditions aux limites (5a-5d) a été discrétisé par la méthode des différences finies. La discrétisation suivant le temps est assurée par la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Les termes convectifs sont discrétisés à l'aide d'un schéma Upwind du 3^{ème} ordre, alors que les termes diffusifs et les termes sources sont traités par un schéma de différences centrales du 4^{ème} ordre. L'équation de la fonction de courant est résolue par la méthode itérative de sur relaxation N.L.O.R. (Non Linear Over Relaxation). Une fois les champs thermique et hydrodynamique déterminés, les champs de la génération de l'entropie et le nombre local de Bejan. Une série de simulations préalables nous a permis d'opter pour un maillage non uniforme de 100×100 nœuds suivant chaque direction. Un code de résolution a été établi en

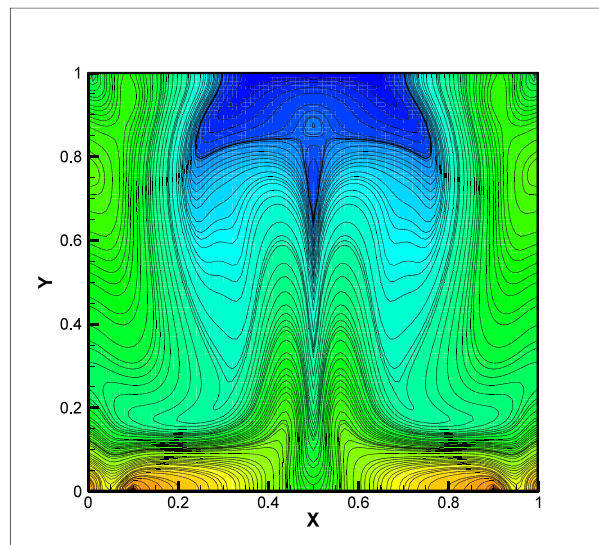
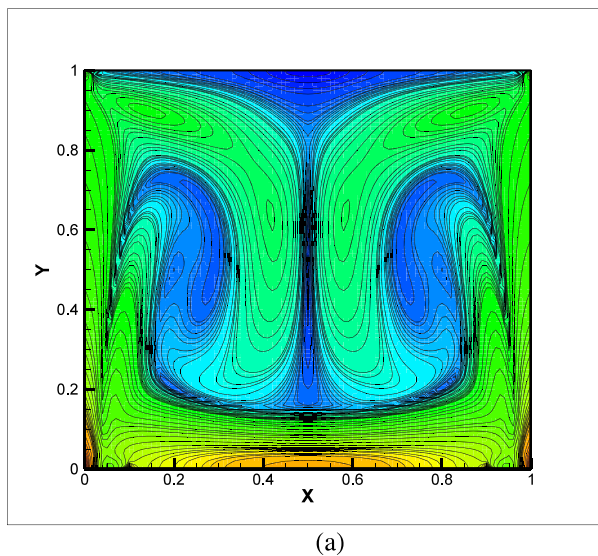
langage Fortran et a été validé en considérant le travail d'Aydin et Yang [8].

VI. RESULTATS

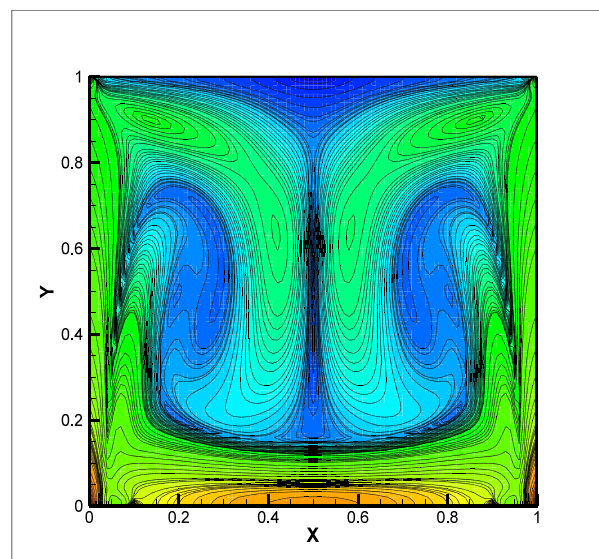
Les simulations numériques ont été effectuées pour un nombre de Reynolds fixé à 100, une longueur adimensionnelle de la partie chauffée ε égale à 0.8 et un coefficient de distribution d'irréversibilité φ égal à 10^{-4} . Trois valeurs du nombre de Prandtl (0.0198, 0.71 et 3.02) caractérisant, respectivement, le mercure, l'air et l'eau ont été considérées pour étudier leur influence sur les champs de la génération d'entropie et du nombre de Bejan et l'évolution de leur moyenne en régime de convection naturelle dominante ($Ri=15$).

A. Les champs de la génération d'entropie totale

Les contours de la génération d'entropie totale sont montrés par la figure 2 pour les différents fluides considérés. Nous constatons que la génération totale d'entropie augmente en fonction du nombre de Prandtl. Aux faibles valeurs de ce nombre, la variation de l'entropie totale ne varie pas beaucoup car le mécanisme de conduction domine et que le gradient de température et le champ d'écoulement sont si réduits ; mais pour les valeurs élevées de ce nombre, l'augmentation de la production totale d'entropie est plus importante, ce qui peut s'expliquer par l'augmentation de l'intensité de l'écoulement du fluide et des gradients de la température. En outre cette génération de l'entropie devient de plus en plus significative et se développe sur les parois latérales et la partie chauffée de la paroi inférieure.



(b)

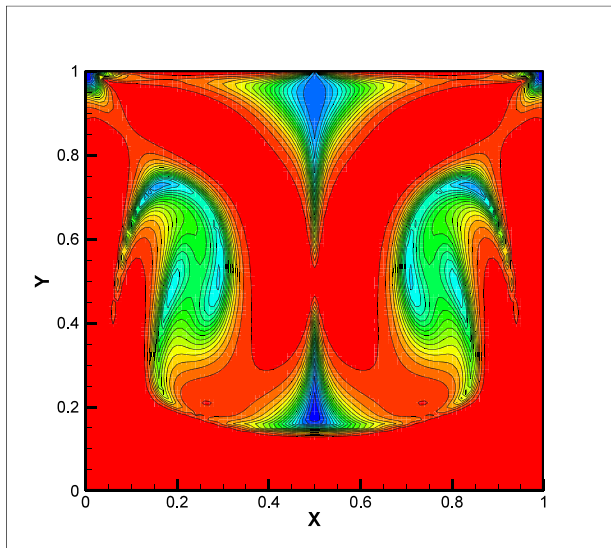


(c)

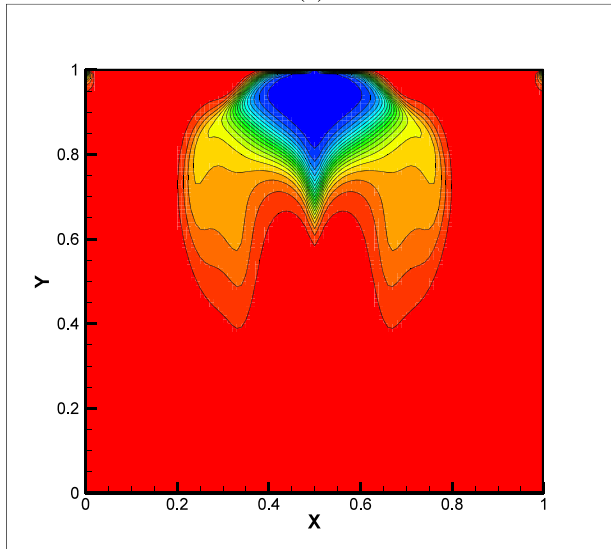
Figure 2. Génération d'entropie totale (a) Mercure $Pr=0.0198$, (b) Air $Pr=0.71$ et (c) Eau $Pr=3.02$

B. Les champs du nombre de Bejan

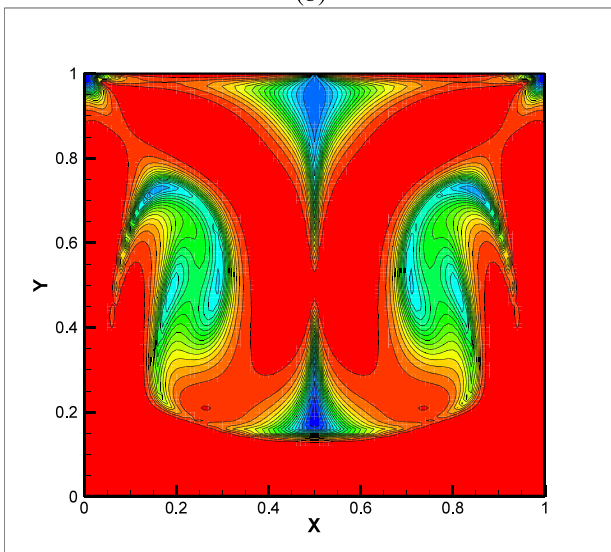
Les contours du nombre local de Bejan sont montrés dans la figure 3 pour les différents fluides considérés. Des valeurs maximales de ce nombre sont obtenues presque dans toute la cavité, sauf dans une partie médiane située sur la paroi supérieure qui se rétrécit au fur et à mesure que le nombre de Prandtl augmente.



(a)



(b)

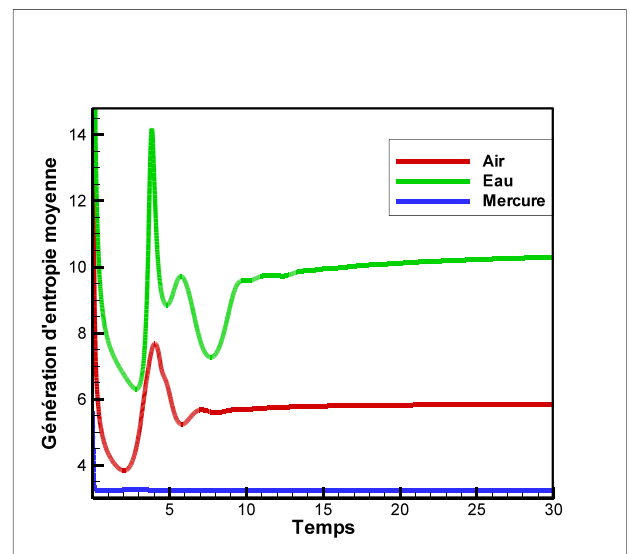


(c)

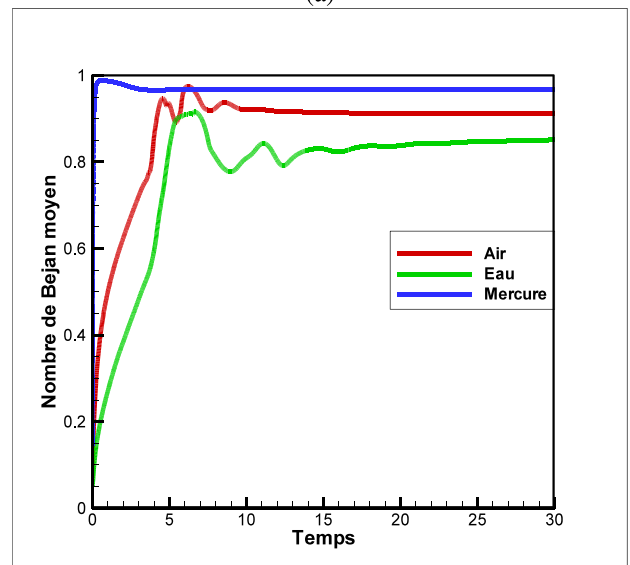
Figure 3. Nombre de Bejan (a) Mercure $Pr= 0.0198$, (b) Air $Pr=0.71$ et (c) Eau $Pr=3.02$

C. Evolution de la génération d'entropie moyenne et du nombre de Bejan moyen

L'évolution de la génération d'entropie moyenne et du nombre de Bejan moyen est montrée, respectivement, dans la figure 4 (a) et (b). Cette évolution présente des fluctuations dans les premiers instants avant de se stabiliser à des valeurs constantes. Ces valeurs confirment les résultats précédents à savoir que la génération de l'entropie totale augmente au fur et à mesure que le nombre de Prandtl augmente. Le nombre moyen de Bejan de l'air est légèrement inférieur que ceux du mercure et de l'eau.



(a)



(b)

Figure 4. Evolution de la génération d'entropie (a) et du nombre de Bejan (b)

IV. CONCLUSIONS

Dans cette étude numérique nous avons considéré l'influence du nombre de Prandtl sur la génération d'entropie de l'écoulement d'un fluide ou la convection naturelle est dominante ($Ri=16$). La configuration géométrique explorée est une cavité carrée chauffée par le bas et dont les parois latérales froides se déplacent vers le haut avec une vitesse constante. Toutes les autres parties de cette cavité sont considérées adiabatiques. Les résultats préliminaires montrent:

- Une augmentation significative de la génération d'entropie moyenne quand le nombre de Prandtl augmente.
- Le nombre de Bejan moyen, pour tous les fluides considérés, est supérieur à 0.5 confirmant que la génération de l'entropie est essentiellement produite par les gradients de température.

REFERENCES

- [1] A. Bejan, Second law analysis in heat transfer. *Energy*, 1980, 5, 720–732.
- [2] A. Bejan. *Entropy Generation Minimization*, CRC Press, 1996.
- [3] A. Bejan. *Entropy Generation through Heat and Fluid Flow*. New York: Wiley Interscience, 1982.
- [4] Bejan A., *Advanced Engineering Thermo-dynamics*, John Wiley and Sons, New York 1988.
- [5] Ibrahim Dincer, Yunus A., Cengel, *Energy, Entropy and Exergy Concepts and Their Roles in Thermal Engineering*, *Entropy* 2001, Vol. 3, 116-149.
- [6] Öztop, H.F.; Al-Salem, K. *A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, Vol.16, pp. 911–920.
- [7] Öztop, H.F, Estellé, P, Yan, W.M, Al-Salem, K, Orfi, J, Mahian, O, A brief review of natural convection in enclosures under localized heating with and without nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2015, Vol. 60, 2015, pp. 37-44
- [8] Aydin, O., Yang, W. J. *Mixed convection in cavities with a locally heated lower wall and moving sidewalls*. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2000, Vol. 36, pp. 695–710.

Sur la conversion du moteur Deutz F4L912 en version dual-fuel

Mohamed BENBRAIKA, Arezki SMAILI, Said RECHAK, Azouaou HAMMOUDI, Yanis CHENDOUH

Laboratoire Génie Mécanique Développement Ecole Nationale Polytechnique, P.B. 182 El Harrach, 16200, Alger - Algérie.
mohamed.benbraika@g.enp.edu.dz

- **Résumé**— Le présent travail porte sur la conversion du moteur Diesel Deutz F4L912 en dual-fuel (Diesel-GNC). Ce travail de recherche rentre dans le cadre d'un contrat entre le Laboratoire de Génie Mécanique et Développement de l'Ecole Nationale Polytechnique « ENP » et l'entreprise Moteurs « EMO ». L'article comprend deux parties : la première porte sur les modifications techniques à apporter pour la conversion du moteur Diesel en moteur bi-carburant (dual-fuel); et la deuxième partie traite de la simulation numérique à l'aide du code ANSYS. Les simulations ont été effectuées pour les concentrations de GNC variant de 25 à 80%. Les résultats de la simulation montrent que le mélangeur en forme de venturi contenant plusieurs orifices permettait une meilleure homogénéité du mélange air-GNC que le mélangeur à un seul orifice. L'optimisation du nombre d'orifices a été ensuite investiguée. Un nombre minimal de quatre orifices s'avère un choix judicieux.
- Mots clés : — Dual fuel, Conversion, Moteur Deutz F4L912, Simulation numérique, GNC, Mélangeur.

I. INTRODUCTION

La conversion d'un moteur diesel en dual-fuel ne requiert pas de modifications significatives sur le moteur diesel en dual-fuel mais n'est pas pour le moins aisée. En effet, elle doit tenir compte d'un certain nombre de contraintes techniques, économiques et surtout sécuritaires.

Les travaux publiés récemment [1-7] sur la conversion en dual-fuel démontraient clairement la pertinence et le rôle du mélangeur dans un moteur dual-fuel. La recherche sur une telle thématique est d'un intérêt scientifique et d'actualité, qui ainsi fait l'objet du présent travail, dont l'objectif principal est d'optimiser un mélangeur Air/GNC devant équiper le moteur F4L912.

CARACTERISTIQUES DU MOTEUR DEUTZ F4L912

Tableau1. Caractéristiques du moteur F4L912

Nombre de cylindres/ Refroidissement	4 / Air
Puissance maximale	54 kW à 2800 tr/mn
Cylindrée (cm ³), Alésage / Course (mm)	3768, 100 / 120
Couple moteur au régime nominal (N.m)	208N.m à 1650 tr/mn
Consommation spécifique gasoil	200 g/kWh
Taux de compression	19

II. LES METHODES DE CONVERSION EN DUAL-FUEL

Dans le cadre de l'étude de conversion du moteur F4L912, nous avons réalisé une étude comparative entre les différentes méthodes de conversion. L'étude est réalisée sur la base du cahier des charges formulé par l'entreprise EMO mais aussi dans une perspective de conformité aux exigences de conversion citées précédemment.

La conversion en dual-fuel (diesel-GNC) peut se faire de deux façons distinctes :

III. INJECTION SEQUENTIELLE

Elle consiste à injecter le gaz naturel moyennant des injecteurs (un par cylindre) contrôlés électroniquement en amont des soupapes d'admission. Cette méthode permet un contrôle optimal des quantités de gaz à injecter pour chaque cylindre.

Cependant, cette solution présente les inconvénients suivants :

- Apporter une modification importante au moteur.
- Elévation du coût du kit GNC.
- Homogénéité du mélange insuffisante.
- Ne permet pas le préchauffage du mélange Air/GNC au cas de besoin.

IV. INJECTION AVEC MELANGEUR

Cette méthode consiste à réaliser un mélange air/GNC en amont du collecteur d'admission.

Cette solution présente les avantages suivants :

- Possibilité de préchauffer le mélange pour rendre la combustion plus efficace.
- Homogénéité du mélange améliorée.
- Possibilité d'installation de plusieurs capteurs pour la mesure des paramètres thermodynamiques du mélange.
- Parer contre le phénomène de cliquetis.

Outre l'intégration du circuit d'alimentation en gaz, l'aboutissement de la conversion du moteur F4L912 nécessitera le passage vers un système d'injection en gazole commandé. Ceci est justifié par la nécessité d'assurer l'injection de quantités précises de combustible pilote (gazole) selon les conditions de fonctionnement (taux de substitution, régime, charge), mais aussi de garantir la possibilité de passer sans encombre à un fonctionnement purement diesel en cas de rupture de réserve GNC ou encore disfonctionnement du circuit d'alimentation en gaz.

V. ADAPTATION DU MELANGEUR

Le choix du circuit s'est fait en respectant les critères de minimisation du coût de conversion, des modifications et de l'encombrement et la facilité d'adaptation.

Compte tenu de la technologie classique, nous avons privilégié l'utilisation du circuit avec mélangeur. L'adaptation de ce dernier sur le F4L912, permettra d'assurer une bonne homogénéisation du pré-mélange air/GNC mais aussi d'éviter certaines modifications sur le moteur.

La géométrie du mélangeur est similaire à celle d'un tube de venturi et ce pour profiter des avantages que procure ce dernier sur le processus de mélange. Un dimensionnement optimal permettra une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air au niveau du col, produisant ainsi une turbulence favorable à une bonne homogénéisation air/GNC après injection.

VI. MODELE DE MELANGEUR PROPOSE

Les dimensions ont été choisies afin de respecter ce qui suit :

- Minimisation de la longueur afin de réduire l'encombrement.
- Rallongement du col pour augmenter la zone de turbulence.
- Les diamètres d'entrée et de sortie sont choisis conformément au diamètre d'entrée du collecteur d'admission.
- Le diamètre du col est choisi d'une manière à avoir un angle d'inclinaison adéquat afin de minimiser les pertes de charges.

VII. ETUDE DE L'HOMOGENEITE DU MELANGE AIR/GNC

Nous avons réalisé une étude comparative de l'influence du nombre d'orifices d'injection en GNC sur la qualité du mélange. Nous présentons dans ce qui suit, deux variantes du modèle conçu, avec mono et multi-injections ainsi qu'une simulation CFD du processus de mélange sur ANSYS Fluent.

IX. PARAMETRES DE LA SIMULATION NUMERIQUE

-Consommation spécifique en gasoil à $N= 2000$ tr/mn : 160 g/Ch.h = 217.69 g/kWh.

-Puissance aux mêmes conditions : 60 Ch = 44.13 kW

Hypothèse et données d'entrée :

- Pouvoir calorifique inférieur du gasoil : 42 MJ/kg
- PCI du CH₄ : 50 MJ/kg
- C horaire en diesel à $N=2000$ tr/mn: $Ch = 160*60= 9.6$ kg / h
- Coefficient d'excès d'air = 1.9
- Taux de substitution de gasoil : 80%

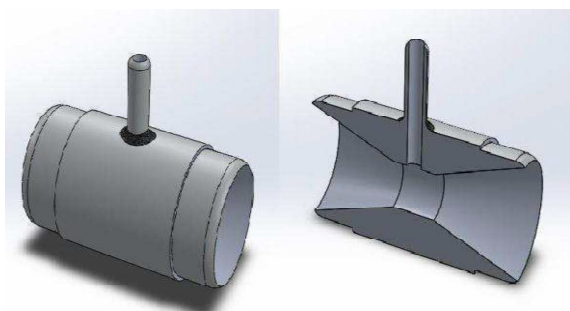


Fig.1- Mélangeur mono-injection

Les figures 2 et 3 mettent en évidence l'hétérogénéité du mélange air/GNC pour le modèle à mono-injection. Cela est mis en relief sur la figure 3 sur laquelle on peut visualiser un étagement de couleur qui reflète une variation de la fraction massique des deux fluides à la sortie du mélangeur.

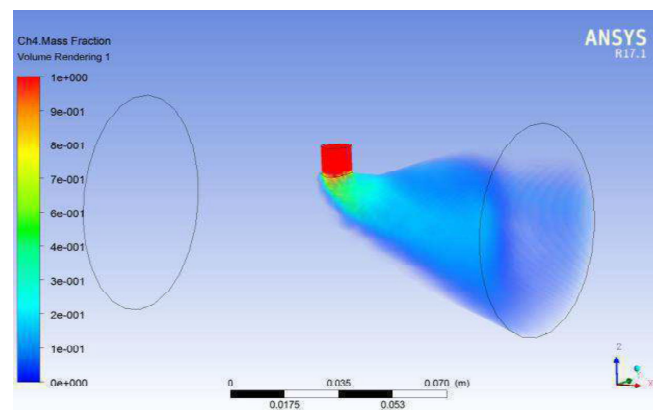


Fig.2 Fraction massique de CH4 (mono-injection)

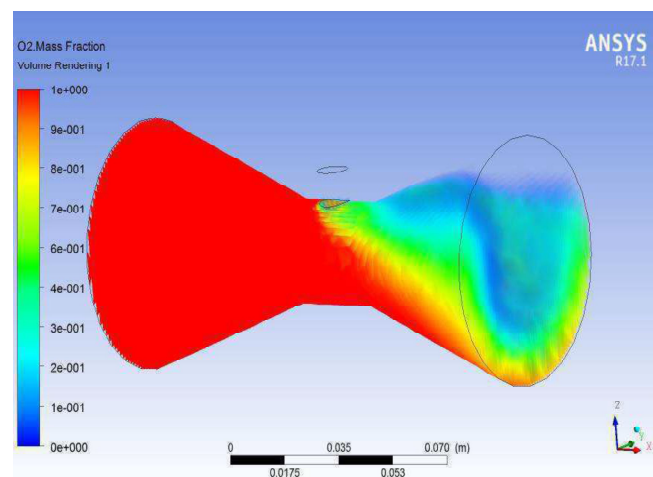


Fig.3 Fraction massique de l'Air (mono-injection)

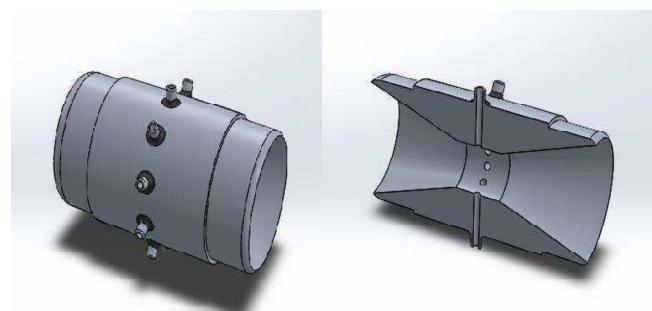


Fig. 4 Mélangeur multi-injection (10 orifices)

Par ailleurs, le modèle à multi-injection représenté sur les figures 5 et 6 démontre clairement une répartition uniforme des fractions massiques de l'air et de CH₄ après injection. Ceci est dû à la répartition uniforme de la masse injectée sur la circonférence du col.

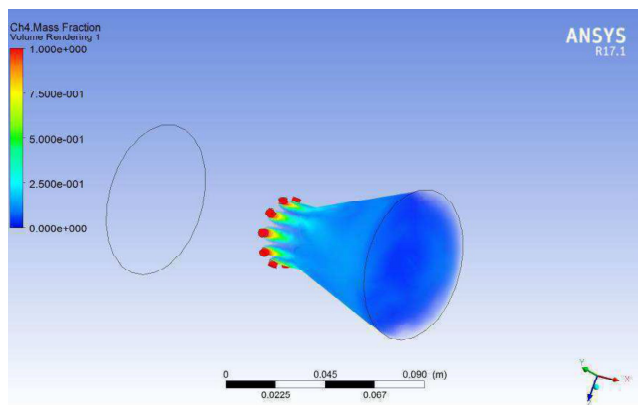


Fig. 5 Fraction massique CH4 (multi-injection)

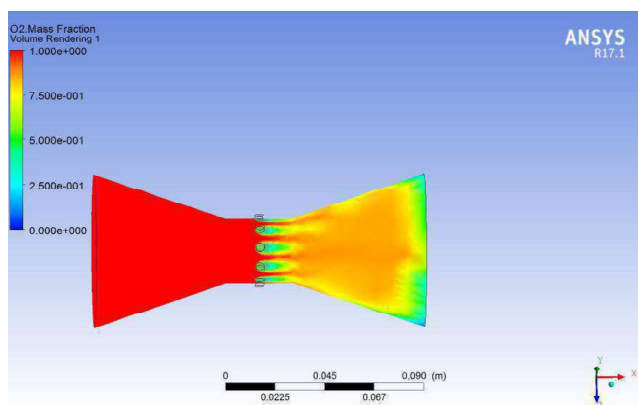


Fig. 6 Fraction massique Air (multi-injection)

X. OPTIMISATION DU MELANGEUR

Cette partie sera focalisée sur la qualité du mélange sortant du mélangeur, elle portera principalement sur l'optimisation de la géométrie du mélangeur (section d'entrée du carburant, section du col) ainsi que sur le nombre de trous d'injection donnant la meilleure homogénéité en utilisant l'outil de simulation numérique ANSYS-Fluent.

Nous avons choisi trois taux de substitution de GNC ; 25% , 50% et 75% pour une fréquence de rotation du moteur à 1500 tr/mn.

Tableau 2. Paramètres calculés du mélangeur

Rendement volumétrique η_v	88.02%
Cylindrée totale du moteur C_v	$3.7699 \times 10^{-3} m^3$
Régime max du moteur N	1500tr/min
Débit volumique d'air stœchiométrique Q_a	0.0415m ³ /s
Vitesse d'entrée d'air U_1	8.2519m/s
Vitesse de sortie du col U_2	34.029m/s
Diamètre du col D_2	39.41mm
Débit massique d'air \dot{m}_{air}	0.05084kg/s
Débit massique de GNC \dot{m}_{GNC}	0.001554kg/s
Rapport théorique air/carburant $r_{air/GNC}^{th}$	17.235kg _{air} /kg _{CH₄}
Rapport réel air/carburant $r_{air/GNC}^r$	32.716kg _{air} /kg _{CH₄}
Coefficient d'excès d'air α	189.82 %
Diamètre d'entrée GNC D_f	7.16mm

Sur la base des résultats obtenus, le mélangeur a été conçu en utilisant le logiciel Solidworks. Nous utilisons le logiciel ANSYS comme outil de modélisation et de simulation numérique pour valider le modèle de mélangeur choisi.

Conditions aux limites :

Trois conditions aux limites ont été prises :

- Entrée d'air : le moteur est à aspiration naturelle
- Entrée GNC : Le GNC est admis au mélangeur à température ambiante et avec une pression de 2bars.
- Sortie mélange : L'équation de conservation de débit massique nous permet de connaître le débit du mélange ainsi que la fraction massique de chaque composant.

Nous calculons les paramètres des conditions aux limites pour l'entrée d'air, l'entrée du GNC et la sortie du mélange ainsi que les paramètres de simulation.

Nous avons conçu 6 modèles de mélangeur à différents nombres de trous d'injection (2 jusqu'à 12).

Puisque le raffinement du maillage affecte significativement la précision des résultats et le temps requis pour la simulation, une étude d'indépendance de maillage a été faite afin de trouver le maillage satisfaisant les deux critères : de précision et de temps. La maille triangulaire et le 'Body Sizing' ont été utilisés pour générer un maillage dans lequel la taille des éléments varie de 1mm à 7mm (tableau 3).

Les paramètres observés lors de cette étude sont l'indice d'uniformité UI et la fraction massique du GNC.

Tableau 3. Variation de UI et de f_{CH_4} pour les différents modes de maillage à la sortie de mélangeur (taille des mailles de 1 à 7 mm)

Cas (mm)	1	2	3	4	5	6	7
f^{CH_4}	0.03	0.031	0.04	0.04	0.036	0.04	0.041
UI	0.87	0.873	0.85	0.88	0.85	0.78	0.856

Calcul de l'indice d'uniformité : L'homogénéité s'évalue à travers l'uniformité de la distribution de la concentration du carburant dans la section de sortie du mélangeur. L'indice quantitatif d'uniformité du débit (UI) est largement utilisé dans l'industrie automobile pour évaluer la distribution du mélange à l'intérieur du mélangeur. Ce coefficient peut être exprimé comme suit [8] :

$$UI = 1 - \frac{1}{2} * \frac{\sum_{i=1}^n |f_i^{CH_4} - f_{moy}^{CH_4}| A_i}{A * f_{moy}^{CH_4}}$$

$$f_{moy}^{CH_4} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n f_i^{CH_4} * A_i$$

Avec:

- UI : Indice d'uniformité.
- $f_i^{CH_4}$: Fraction massique locale de CH_4 .
- $f_{moy}^{CH_4}$: Fraction massique moyenne de CH_4 .
- A : La section où UI est calculé.
- A_i : la section locale.
- i : La $i^{ème}$ maille.
- n : Nombre de maille dans la section A .

Lorsque $UI = 1$, le mélange est homogène et quand $UI = 0$, le carburant ne s'est pas mélangé avec l'air.

Le facteur UI est utilisé pour estimer l'homogénéité du mélange AIR/GNC à la sortie du mélangeur. Le mélange le

plus hétérogène obtenu est celui du 6^{ème} cas avec un indice d'uniformité $UI = 0.78$, le 2^{ème} cas donne le mélange le plus homogène avec un indice d'uniformité $UI = 0.87$. La distribution de la fraction massique du GNC est utilisée pour évaluer l'homogénéité du mélange GNC-Air. La concentration du CH_4 à la sortie du mélangeur doit être uniformément répartie pour obtenir un mélange homogène. Nous avons aussi calculé les fractions massiques du CH_4 f^{CH_4} à la section de sortie pour les 6 modèles de mélangeur en mentionnant l'erreur relative entre $f_{th}^{CH_4}$ et $f_{simulation}^{CH_4}$. L'erreur la plus petite 5% (tableau 4) est celle du mélangeur à 4 trous. Le calcul de l'erreur s'est fait comme suit :

$$e_{rr} = 100 \times \frac{|f_{th}^{CH_4} - f_{simulation}^{CH_4}|}{f_{th}^{CH_4}}$$

Tableau4. UI et f_{CH_4} pour les 6 modèles de mélangeur

Modèle	1	2	3	4	5	6
UI	0.83	0.87	0.84	0.80	0.78	0.78
f^{CH_4}	0.025	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04
Err (%)	15	5	43	65	50	47

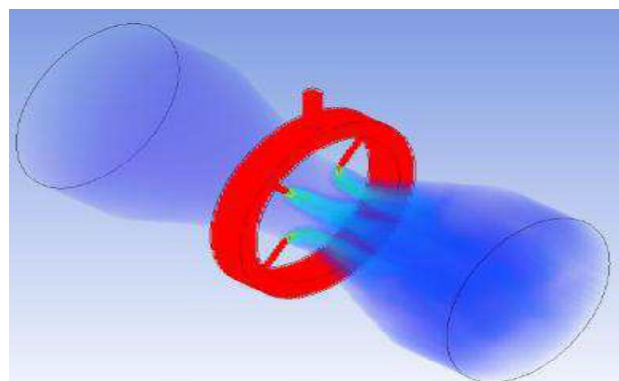


Fig 8. Fraction massique du CH_4 pour 4 orifices à l'intérieur des mélangeurs

Dans la partie de dimensionnement nous avons déterminé la section du col et d'admission du carburant donnant les meilleures conditions de fonctionnement du mélangeur en mode Dual-Fuel avec un taux de substitution de 75%. Dans la partie d'optimisation plusieurs modèles de mélangeur à différents nombres de trous d'injection ont été proposés, le modèle 2 à 4 trous est choisi.

XI. CONCLUSION

Un modèle de mélangeur air/GNC de type venturi à multi-injection (i.e. orifices) s'avère un choix prometteur pour la conversion du moteur Deutz FL4912 en dual-fuel. La simulation CFD à l'aide du logiciel ANSYS Fluent du processus de mélange nous a permis d'étudier proprement l'écoulement des fluides résultant air/GNC et déterminer la configuration minimale du mélangeur. Il a été ainsi trouvé qu'un nombre optimal de 4 orifices semblait produire un meilleur brassage et homogénéisation du mélange air/GNC.

REFERENCES

- [1] Danardon, D.; Kim, K.-S.; Lee, S.-Y.; Lee, J.-H. Optimization the design of venturi gas mixer for syngas engine using three-dimensional CFD modeling. *J. Mech. Sci. Technol.* **2011**, *25*, 2285–2296
- [2] Bora, B.J.; Debnath, B.K.; Gupta, N.; Sahoo, N.; Saha, U. Investigation on the flow behaviour of a venturi type gas mixer designed for dual fuel diesel engines. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.* **2013**, *3*, 202–209.
- [3] T. Yusaf, P. Baker, I. Hamawand and M.M. Noor. effect of compressed natural gas mixing on the engine performance and emissions. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)* ISSN: 2229-8649 (Print); ISSN: 2180-1606 (Online); Volume 8, pp. 1416-1429, July-December 2013
- [4] Supee, A.; Shafeez, M.; Mohsin, R.; Majid, Z. Performance of Diesel-Compressed Natural Gas (CNG) Dual Fuel (DDF) Engine via CNG-Air Venturi Mixjector Application. *Arab. J. Sci. Eng.* **2014**, *39*, 7335–7344.
- [5] Abo-Serie, E.; Özgür, M.; Altinsik, K. Computational analysis of methane-air venturi mixer for optimum design. In *Proceedings of the 13th International Combustion Symposium, Bursa, Turkey, 9–11 September 2015*.
- [6] Arat, H.T.; Baltacioglu, M.K.; Özcanli, M.; Aydin, K. Effect of using Hydroxy-CNG fuel mixtures in a non-modified diesel engine by substitution of diesel fuel. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 8354–8363.
- [7] Hussein A. Mahmood, Nor Mariah. Adam, B. B. Sahari and S. U. Masuri. New Design of a CNG-H2-AIR Mixer for Internal Combustion Engines: An Experimental and Numerical Study. *Energies*, **2017**
- [8] Kim, J.; Kim, H.; Yoon, S.; Sa, S. Effect of intake valve swirl on fuel-gas mixing and subsequent combustion in a CAI engine. *Int. J. Automot. Technol.* **2008**, *9*, 649–657.

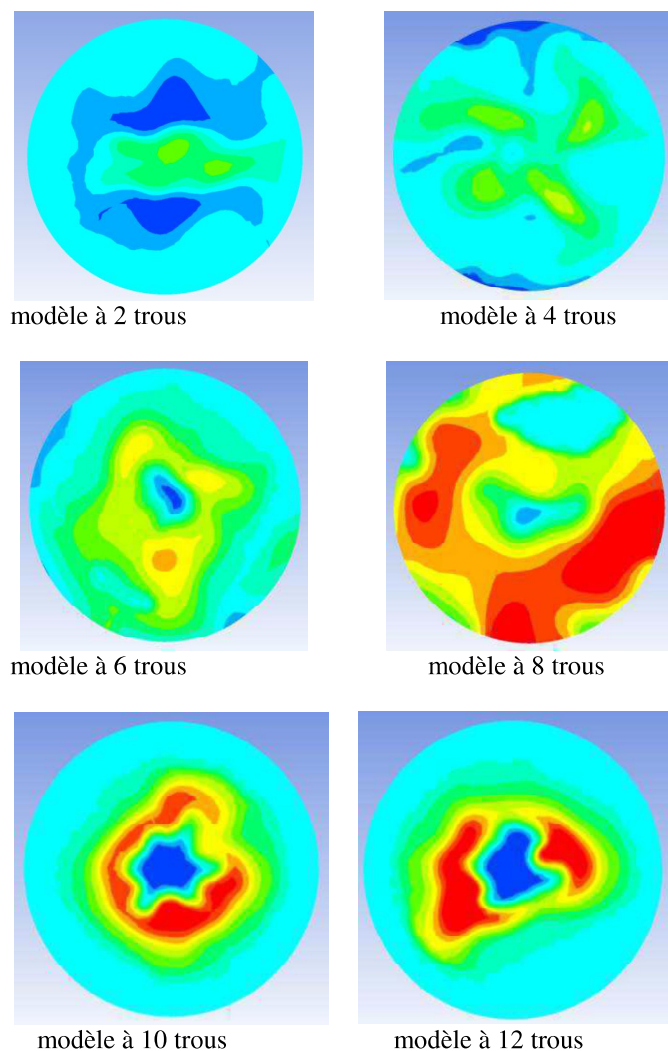


Fig. 7 Fraction massique du CH_4 à la section de sortie des mélangeurs.

Étude sur les principes ancestraux d'intégration et recommandations pour une architecture bioclimatique adaptée au sud de l'Algérie

Djamel MESTOUL[#]

[#] *Laboratoire Architecture Et Environnement (LAE), Ecole Polytechnique d'Architecture Et d'Urbanisme, EPAU*

Adresse: Route de Beaulieu, El-Harrach BPN° 177, 16200 Alger-Algérie.

E-mail: d.mestoul@epau-alger.edu.dz

Résumé— Notre présente recherche vise à identifier les principes d'intégration climatique dans l'architecture des villes traditionnelles du sud algérien. Elle retient pour cas d'étude la ville de Timimoun, située dans le Sahara algérien entre le Grand Erg Occidental, au Nord, et le plateau du Tademaït, au Sud. Elle met en œuvre une série de campagnes de mesures in situ des principaux paramètres climatiques, avec différentes résolutions spatiales et temporelles pour le confort d'été.

À l'échelle microclimatique, certains aspects de la morphologie urbaine tel que le prospect (H/W), ont montré des effets limités sur la réduction des températures de l'air contrairement à d'autres (passage couvert, orientation des rues...etc.) qui semblent être plus pertinents et constituent de ce fait des moyens efficaces pour le contrôle climatique. Ainsi cette étude nous a permis de corriger certaines idées reçues quant à la circulation d'air au sein du ksar. En effet, la morphologie des ksour à tissu compacte génère des conditions de vent particulièrement importantes, et ce, en dépit des prospects de rues étroites. En terme d'implications urbanistiques, la conception urbaine devrait porter une attention particulière sur les conditions d'implantation des sites, des moyens de protection contre le vent et des attributs positifs de la végétation et de la ventilation naturelle.

Keywords— ksar, architecture traditionnelle, prospect, canyon, climat urbain, confort aérothermique

I. INTRODUCTION

La prise en charge des considérations climatiques dans les processus de conception urbaine peut constituer en effet un outil incontournable dans l'amélioration de la qualité environnementale en milieu urbain. Un urbanisme approprié doit procurer en effet des mesures de réduction de stress thermique pour les usagers de l'espace urbain. Ce dernier lorsqu'il est attractif influence de manière significative la vie sociale et peut influencer indirectement l'économie locale. De ce point de vue, nous sommes conscients qu'un urbanisme climatique peut influencer toutes les dimensions de durabilité, à savoir; économique, sociales et environnementale, d'où la nécessité de se pencher sur cette question très peu investiguée dans notre contexte algérien.

Dans la zone septentrionale du sud algérien le forçage solaire peut être excessif, le piégeage de la chaleur et la modification du bilan énergétique de surface peuvent avoir par conséquent un effet extrême. Ces effets peuvent altérer le cadre de la vie en influant sur le confort des usagers par des perturbations au niveau du confort en espace extérieur et à l'intérieur des habitations, une hausse consommation énergétique des bâtiments et des problèmes de santé liés aux vagues de chaleur.

II. CAS D'ÉTUDE

Dans le triangle formé par la frange méridionale de l'Erg occidental, la bordure nord-occidentale du Plateau du Tademaït et l'Oued Saoura à l'Ouest, s'étend le Gourara. Son chef-lieu, Timimoun, se situe approximativement au centre de ce triangle, par 29°15 de latitude N et 0°14 de longitude E (Greenwich), c'est-à-dire à la latitude de la ville marocaine de Sidi Ifni sur le littoral atlantique et la longitude de Mostaganem sur sa côte méditerranéenne [1].Fig.1

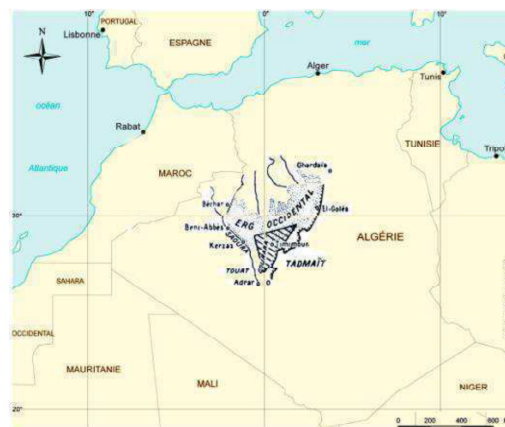


Figure 1: Position de Timimoun en Algérie.

Le ksar¹ de Timimoun, objet de notre présente étude se caractérise par un tissu urbain très compact, dense et serré. Les ruelles sont imbriquées avec des orientations différentes, dont,

¹ Ksar (pl. Ksour) : village traditionnel (Agham en berbère)

des orientations principales semblent prévaloir l'axe nord-est Sud-ouest, et ce, pour la majorité des rues, tandis que, l'axe nord-ouest sud-est pour les ruelles et les impasses. Ainsi une hiérarchie spatiale peut être distinguée en allant de l'espace public à l'espace privé.

III. MÉTHODOLOGIE

A. PROTOCOLE DE MESURE

La campagne de mesure est basée sur la collecte de données climatiques sur terrain en période d'été (Juillet 2010). Une station HOBO dite de « référence » a été placée à 10 mètres du sol sur une terrasse de l'hôtel sable d'or à l'écart du centre urbain afin d'éviter les zones de sillages engendrées généralement par les obstacles voisinant (Fig.2). Elle enregistre en continu la température de l'air (°C), l'humidité relative (HR) en % ainsi que la direction et vitesse de l'air.



Figure 2: Station de référence placée sur la terrasse de l'hôtel sable d'or à plus de 10 m du sol.

Des mesures instantanées dites « ponctuelles » et en continu ont été effectuées dans différentes configurations urbaines à travers un parcours urbains couvrant des typologies représentatives variées et exhaustives, à l'aide des instruments portables de type TESTO et HOBO (Fig.3). L'objectif étant d'évaluer les variations microclimatiques journalière dues à certains paramètres d'ordre architectural (prospect H/W, forme, gabarit, matériaux....etc.) et d'autres d'ordre urbain (orientation, morphologie, végétation ... etc.).



Figure 3: Instruments de mesures ponctuelles ayant servi pour les campagnes de mesures sur le site d'étude

A ces mesures ponctuelles et continues s'ajoute une série de prises de photos thermographiques à l'aide d'une caméra thermique de type FLIR. Les photos récupérées peuvent montrer sur une échelle graduée la température radiante suivant un degré d'émissivité propre à chaque corps et à chaque matériau (parois en ciment, en terre, espace végétal....etc.)

B. CHOIX DU PARCOURS

Au sein de l'ancien ksar de Timimoun et en fonction des critères de l'orientation des rues, du rapport ² (H/W) et le type de couverture au sol (végétal ou minéral) des points de mesures ont été choisis (Fig.4 et Table 1). Le parcours choisi comporte des espaces essentiellement piétons ; à orientations différentes, à profils étroits et larges, exposés et non à l'ombre (passages couverts) et des espaces végétaux (oasis) et minéraux. Ce choix est justifié par la volonté d'accéder à un maximum de caractéristiques morphologiques qui permettraient de retenir les aspects les plus pertinents dans le confort d'été.

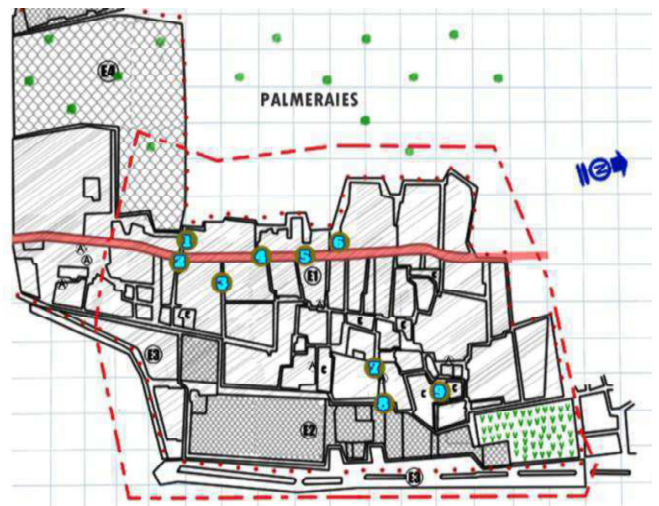
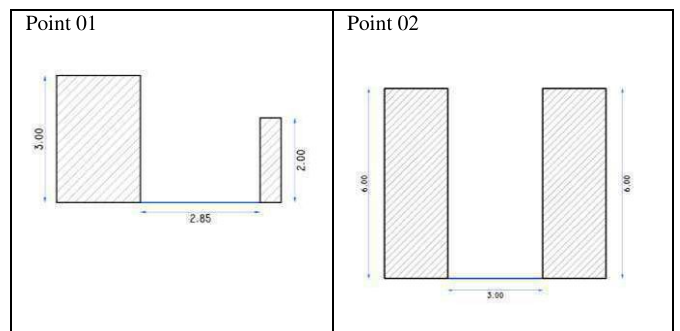


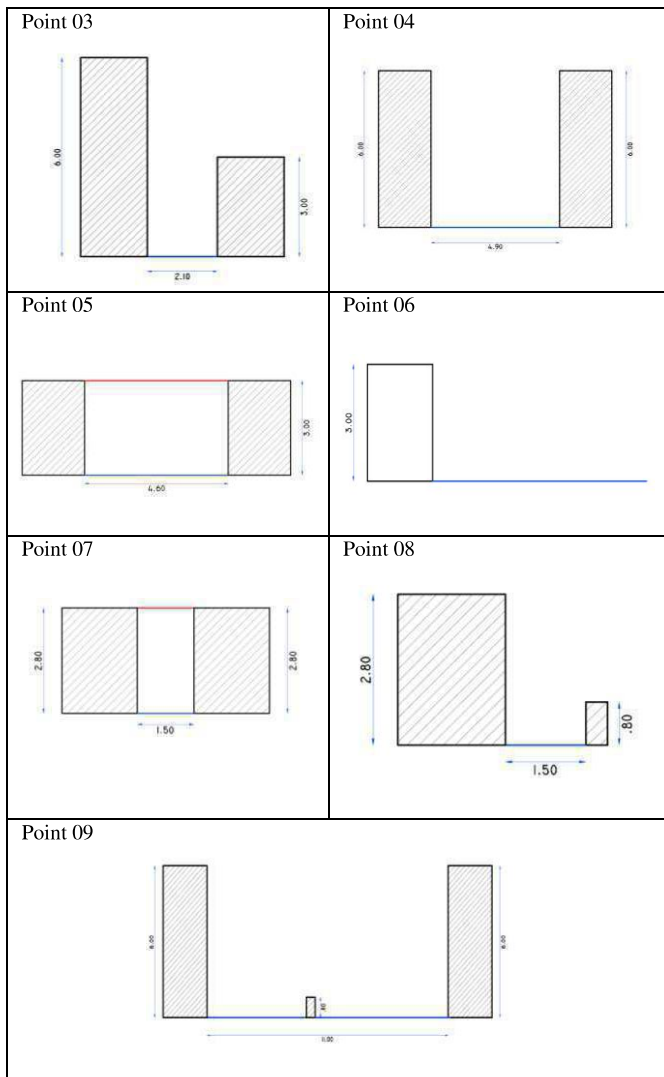
Figure 4: Parcours urbain retraçant les mesures ponctuelles réalisées au sein du ksar de Timimoun.

TABLE 1

Caractéristique morphologiques des 09 points de mesures ponctuelles.



² Avec, H : hauteur du bâtiment. W : largeur de la rue.



C. PROCÉDURE DE MESURES

Les campagnes de mesures s'établissent sur une période de l'année représentative des conditions extrêmes (période chaude) du confort d'été soit mi-juillet. Les mesures sont prises simultanément pendant 5 jours de 9h00 à 21h00 (présence du soleil) à travers les différents parcours et selon un intervalle de temps régulier de trois heures. La durée moyenne du parcours est de 90 minutes. La durée moyenne d'acquisition climatique pour chaque point urbain requiert 5 à 10 minutes pour la stabilisation des données. Les campagnes de mesures, s'étalent sur une période de cinq jours et coïncident avec des périodes anticycloniques, sous des conditions de ciel clair dans la plupart du temps.

Les paramètres climatiques mesurés sont la vitesse moyenne et la direction du vent, l'humidité relative, la température de l'air et radiante. La vitesse d'air moyenne est calculée sur un intervalle de temps de 60 secondes tandis que les températures radiantes sont prises directement à distance par infrarouge grâce à la caméra thermique. Les instruments de mesures HOBO sont protégés contre les rayonnements solaires

directs grâce à un système de protection sous forme de brises soleil qui entourent les sondes.

IV. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

A. LES VENTS

« Les vents sont les véhicules du climat.....Ce sont eux, ou du moins leurs courants inférieurs, qui répartissent la température et les pluies sur le globe. A ce titre ils sont aussi les véritables auteurs du désert. » [2]

L'étude du comportement du vent (vitesse, direction) a été effectuée à partir des moyennes mensuelles récupérées auprès de l'ONM³ pour la période 1991-2010 pour la station de Timimoun (Fig.5). Cette figure montre que le site présente un maximum de vitesse moyenne pendant la période juillet-septembre et le mois de mars. Quant au minimum, il se produit durant la période hivernale. Ainsi, les données montrent que le site de Timimoun est un site venté durant toute l'année, avec une vitesse moyenne annuelle de 6 m/s à 10 m du sol.

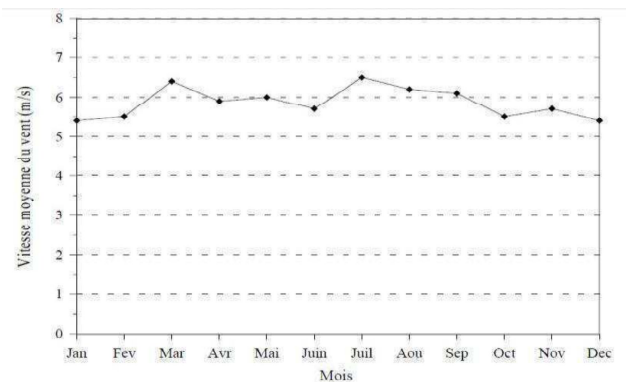


Figure 5 : Moyennes mensuelles des vitesses du vent. ONM (1991-2010)

1) **RÉGIME DES VENTS:** La région de Timimoun est exposée à des vents variant de 4 à 6 m/s. D'après la rose des vents les vents est-nord-est et nord-est sont visiblement les vents dominants de la région avec une vitesse moyenne pouvant atteindre 6 à 8 m/s (Fig.6).

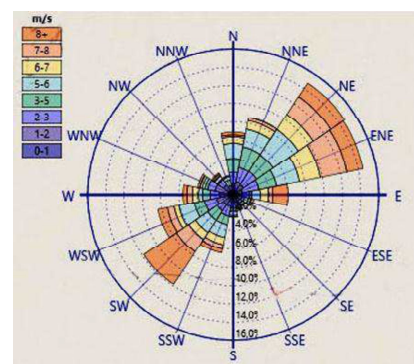


Figure 6: Rose des vents - ville de Timimoune. Données (1995-2010) ONM.

³ Office National de la Météorologie (ONM)-Alger. Site web : www.meteo.dz

2) **VARIATION JOURNALIÈRE:** Les données recueillies au niveau de notre station de référence concordent avec celles récupérées de l'ONM. Le vent dominant intercepté est d'une double direction, soit le Nord-est et l'Est-nord-est avec une vitesse moyenne de 5 à 7 m/s (Fig.8). Autre caractéristique de cette activité éolienne est qu'elle est diurne. La nuit, ce sont les vents calmes qui dominent (vitesse <6m/s). L'évolution des moyennes tri-horaires de la vitesse du vent dans le site d'étude est représentée en Fig.7 pour différents points de mesures les plus représentatives.

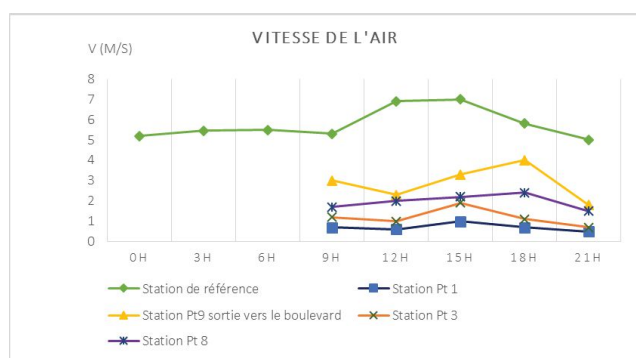


Figure 7: Evolution de la vitesse moyenne tri-horaire du vent dans différents points de mesures.

Cette évolution de la vitesse au niveau de la station de référence montre, d'une part, une diminution de la vitesse moyenne durant la nuit et une augmentation durant la journée, et d'autre part que le site de Timimoun est plus venté l'après-midi que la matinée. Ainsi, les données donnent une idée sur l'important potentiel éolien du fait que le vent souffle à une vitesse relativement élevée pendant une longue période de la journée. En effet, le vent souffle à une vitesse supérieure à 5 m/s durant les 24h et supérieure à 6 m/s pendant presque 10 heures (plus de 40% du temps).

3) **EFFET DE LA MORPHOLOGIE:** Les mesures in-situ diurnes relèvent une nature complexe des écoulements d'air dans les différentes rues du ksar. Selon Kitous la structure du ksar influe fortement sur le comportement du flux d'air incident, et de ce fait, sur la ventilation intérieure des rue [3]. Les éléments morphologiques les plus influents sont la géométrie et l'orientation des rues ainsi que la présence ou non de percées au niveau du périmètre du ksar. En effet, ces percées sont considérées comme vecteurs du flux d'air incident. Leur direction, largeur et profondeur sont déterminants dans le processus de ventilation intérieure du ksar.

4) **EFFET DE L'ORIENTATION DES VOIES:** En effet, l'orientation des voies et des artères principales d'une ville rapport aux vents dominants influencent d'une manière significative la vitesse et la turbulence du vent [4]. Nakamura et Oke ont également montré qu'il existe un lien entre la vitesse du vent à l'intérieur et au-dessus d'une rue canyon : le vent à l'intérieur de la rue est ralenti, sa direction est modifiée

et des flux turbulents sont générés [5]. Cette relation est largement influencée par l'orientation de la rue par rapport au vent et par le prospect de la rue. Dans le cas d'un tissu traditionnel dense aux rues sinueuses comme c'est le cas du ksar de Timimoun, les vents seront vite ralentis et la chaleur du ksar ne sera pas aisément dispersée.

Par ailleurs, les faibles pourcentages de réduction obtenus pour la vitesse de l'air à l'intérieur de certains endroits du ksar indiquent la forte pénétration du vent dans les rues canyons en dépit de leur configuration urbaine compacte. En effet, les valeurs de fortes vitesses d'air ont été relevées dans les rues intérieures qui débouchent généralement sur des places publiques ouvertes dites rahba⁴. Selon Mestoul les profils étroits de ces rues jouent le rôle de canalisateur de flux d'air à partir des places qui interceptent le vent incident et le propulsent tout au long des artères du ksar [6].

Ainsi, l'angle d'incidence parallèle à la direction du vent permet de produire un effet de canalisation et de survitesse dans des rues canyons compactes et longues. Tandis que dans les rues courtes et larges ces effets sont moindres ou inexistant. En effet, ces résultats mettent en valeur l'impact de la longueur (L) de la rue canyon dans les mécanismes de ventilation à l'intérieur du ksar. Ceci dit que le rapport H/W seul s'avère insuffisant pour déterminer le potentiel de ventilation intérieure, il faudrait alors le combiner avec le rapport L/W.

B. LA TEMPÉRATURE

Le climat chaud et sec qui caractérise le site d'étude se traduit par des amplitudes de température journalière importantes. En été, les températures d'air moyennes mensuelles sont comprises entre 35,7°C et 38°C et des températures moyennes maximales de 43,9°C et 46,9°C. Les températures maximales absolues peuvent atteindre 47°C. Fig.8

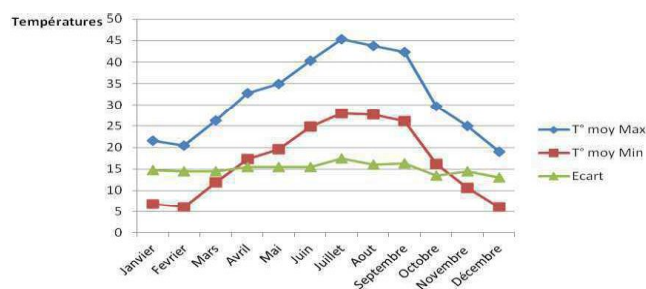


Figure 8: Variation de températures maximales et minimales pour l'année 2010. Station de Timimoun-ONM

⁴ Rahba est un espace public ouvert équivalent à une place ou placette dans la ville haussmannienne. « Les places des ksour (rahba) constituent des éléments structurants dans l'espace urbain et servent le plus souvent de lieux de réunions pour des structures sociales traditionnelles » (Mazouz, 2005-a, p.124)

1) **VARIATIONS DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES:**
 L'analyse des données de la température moyenne annuelle pour la période 1991-2010 montre que l'année la plus chaude est l'année 2010 avec une température moyenne annuelle de 27.37°C et que l'année la plus froide est l'année 1992 avec une température moyenne annuelle de 24.07°C, ainsi, la température moyenne interannuelle est de 25,89°C. Ci-dessous est présentée la répartition des températures, moyenne minimale (T°C min), moyenne annuelle (T°C moy), ainsi que la moyenne maximale (T°C max) pour une série de 20 ans d'observation. Fig.9

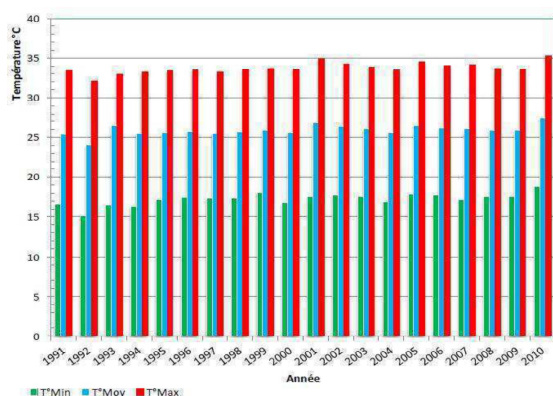


Figure 9: Variations moyennes annuelles des températures. Données ONM - Station de Timimoun (1991-2010).

Mais ces chiffres ne sont guère significatifs quand il s'agit de caractériser la température saharienne ; il faut ici considérer la variation diurne. « *Le désert est une contrée à température extrême où, en dépit de la latitude, il fait tour à tour plus froid que sur la Méditerranée et plus chaud que sous l'équateur. En d'autres termes, c'est un pays où la variation diurne et annuelle de la température, est très grande* » [2].

2) **VARIATION DIURNE:** Il existe de grands écarts de température entre l'hiver et l'été. L'amplitude des variations thermiques annuelles, qui est l'une des particularités du climat des déserts chauds, peut dépasser 55°C au Sahara. En outre, l'amplitude quotidienne, c'est-à-dire la différence entre le maximum diurne et le minimum nocturne, dépasse souvent 35°C.

En effet, dès que le soleil se lève dans le ciel clair. Ses rayons dans cette sèche atmosphère ressentent déjà brûlants à cette heure matinale de l'été, et sous l'influence du sable et de la pierre, la couche d'air voisine du sol s'échauffe rapidement à son tour. Ici point d'évaporation active qui entre en jeu pour modérer le soleil. Dès 9 heures du matin, la chaleur est forte, elle ne cesse de monter jusqu'à atteindre sa valeur maximale de 42°C à 13h. Une fois arrivée à son maximum vers 13h la chaleur, ne commence à lentement descendre en après-midi que vers 17 heures ; elle se maintient longtemps après le coucher du soleil ; malgré l'activité du rayonnement la terre n'arrive pas à se débarrasser de toute la chaleur reçue et les

nuits sont chaudes (27°C en moyenne pour le mois de juillet 2010).

3) **TEMPÉRATURE DE L'AIR RECUEILLIE SUR LE SITE D'ÉTUDE:** La température de l'air se rapproche de la température de la station météorologique dans certains cas. Cependant elle s'éloigne de celle de la station météo d'autant que la température radiante est grande (points 6, 8, 9). Ce constat laisse supposer qu'il est indispensable de protéger les espaces urbains du rayonnement direct si nous voulons conserver une température moins importante. Il est évident que ce sont les espaces couverts qui bénéficient de cet avantage (effet d'ombre) en premier lieu (points 5 et 7). Fig.10

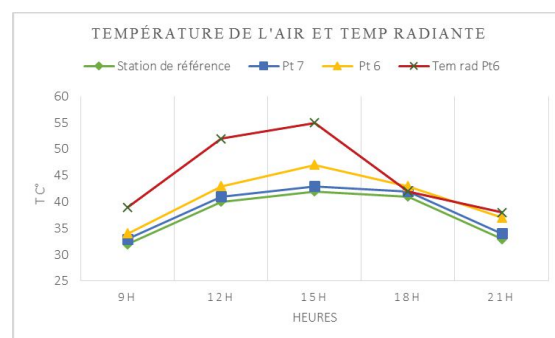


Figure 10: Évolution journalière de la température de l'air et la température radiante à différents points de mesure.

4) **TEMPÉRATURE RADIANTE:** En été, la température radiante enregistre des différences remarquables comparées aux maxima de l'air (en moyenne, elle oscille entre 38°C et 55°C). En effet, en raison de la haute altitude du soleil, le principal gain de chaleur de ces surfaces était principalement de la radiation diffuse et réfléchi. Dans ces conditions, le sol constitue la surface la plus exposée, et de ce fait, enregistre la température la plus élevée (62°C) à 15h dont la différence est d'environ 7°C par rapport aux surfaces verticales (55°C). Fig.11

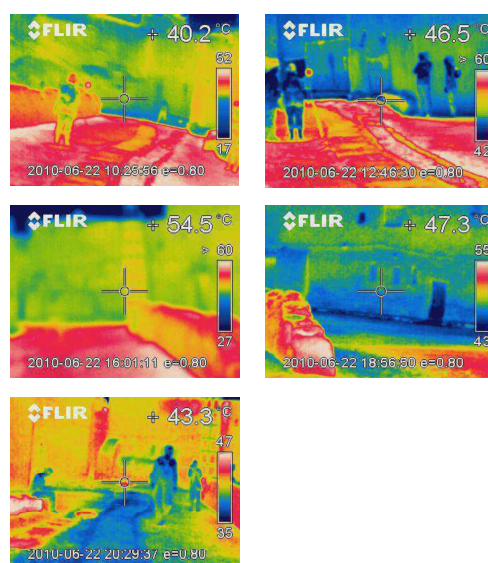


Figure 11: évolution de la température radiante en point 6 à des différentes heures de la journée.

Les températures de surface de façades et de sol, à l'abri de l'irradiation solaire directe, sont respectivement de 14°C à 20°C plus basses que celles des rues découvertes.

En effet, la forte inertie thermique due à la compacité du tissu traditionnel (ksar) et de sa structure justifie le faible taux de refroidissement radiatif (dû à l'angle réduit de vue du ciel des rues) qui provoque à son tour ce décalage thermique entre température de l'air et de surface. Les rues et les surfaces verticales forment ce que l'on appelle les canyons urbains [7] et constituent de véritables pièges radiatifs.

5) *EFFET DE LA PALMERAIE DIT « EFFET OASIS »*: L'effet oasis constitue un phénomène caractéristique qui résulte du contraste existant entre une zone humide ou irriguée et la zone sèche qui l'entoure [7]. Cet effet est souvent recherché dans les zones désertiques car il permet de réduire d'une manière significative le stress thermique en été [7,8]. L'effet oasis tire naissance de l'évapotranspiration du couvert végétal qui consomme une importante quantité d'énergie et refroidit l'air [8,9].

Les points de mesure situés à la périphérie notamment près de la palmeraie montrent qu'un refroidissement nocturne se produit au coucher de soleil d'une manière plus importante par rapport aux points situés au centre du ksar. La différence entre les deux endroits est significative, elle est de l'ordre de 1,5 °C à 21h pour notre cas. Bien que ces résultats doivent être approfondis, ils soulignent dans une partie le fait que palmeraie peut jouer un rôle important dans le refroidissement nocturne urbain. Les espaces végétalisés gardent une température moins élevée bien que la température de rayonnement y soit élevée, cela s'explique par l'influence de l'humidité qui y est logiquement plus importante que dans les autres espaces [10, 11, 12].

6) *EFFETS DE LA GÉOMÉTRIE DES RUES*: L'un des paramètres les plus influant sur le bilan radiatif d'une zone urbaine concerne les ombres que font les bâtiments sur les espaces extérieurs et qui limitent la montée en température des matériaux. Ces ombres seront d'autant plus importantes que le prospect du tissu urbain est élevé [3, 13, 14].

Les rues et passages couverts ont enregistré une température de l'air la plus basse pendant les heures les plus chaudes de la journée ; soit 2 à 4 °C de moins ont été observés en comparaison avec les rues découvertes selon différents prospects de rues. Par ailleurs, les températures de surfaces à l'ombre horizontales et verticales étaient pratiquement les mêmes et varient entre 40 °C et 43°C.

Un large échantillon de profils de rues (prospect H/W) a été contrôlé dans notre présente étude. La variation de la température de l'air s'est avérée faible durant toute la période de mesures. En effet, avec des rues situées dans le même ksar,

la différence enregistrée dans la température de l'air était au maximum de 0,5 °C pour des profils variant entre 1.42 et 3,2. Bien que des différences de températures de surface ont été relevées (les valeurs les plus basses dans le plus profond canyon) l'inertie thermique des parois agit d'une manière légère sur l'augmentation et la diminution de la température de l'air au cours d'un cycle journalier [15].

Par ailleurs, les places urbaines avec un rapport H/W = 0.54 se sont comportées comme de plus grands sites exposés. La température de l'air oscillait entre 34°C et 46°C (point 6 entre 9h et 15h), qui étaient comparées aux valeurs de l'aéroport (32°C à 42°C). L'amplitude moyenne diurne était respectivement d'environ 12°C et 10 °C.

7) *EFFETS DE L'ORIENTATION DES RUES SUR LA TEMPÉRATURE DE L'AIR*: En été, l'orientation des rues semble avoir un effet négligeable sur la température de l'air en été, en raison de l'altitude élevée du soleil sous cette latitude (29°15 N) qui atteint toutes les surfaces de toutes les rues quelles qu'elle soit leur orientation. En effet, la température enregistrée pour les rues orientées N-S, E-O ou intermédiaires étaient presque la même, à condition que les rues aient plus au moins le même profil H/W et sous condition de vents faibles. L'orientation n'induit guère plus de 0.5 à 1°C d'écart entre les rues d'orientation Est-ouest et Nord-sud. Selon Kitous les rues sont ainsi réchauffées au cours des heures de la journée indépendamment de leur orientation en raison de la hauteur du soleil et de l'effet de piégeage radiatif induit par la forte compacité des rues canyons [3].

V. CONCLUSION : QUELQUES CONSIDÉRATIONS BIOCLIMATIQUES

Le constat que l'on peut faire globalement sur l'architecture traditionnelle des ksour anciens est qu'elle est durable... sinon, il ne nous serait pas parvenu. Elle est donc à la fois durable au sens de la longévité, mais également au sens de la soutenabilité car elle est fondée sur une économie de moyens compatible avec un développement local équilibré. Ce sont le climat et les ressources locales qui dictent les formes, les techniques et les matériaux : tronc de palmier, branches de palmes, terre ou terre cuite, pierre...etc., le choix s'effectue ou s'impose, en fonction de la nature géologique du lieu et du climat [16].

Dans le sud algérien, l'impact des conditions climatiques sur la composition de l'espace traditionnel (ksar) est régi par une logique de résilience et d'adaptation à travers laquelle chaque élément de la composition urbaine et architecturale joue un rôle dans l'amélioration du microclimat.

En effet, les matériaux de construction assurent un très grand rôle dans le confort thermique. Ceci grâce d'une part à l'épaisseur des murs (40 à 60cm) et d'autre part à leur grande

inertie thermique grâce au matériau terre (toub)⁵ qui jouent un rôle important dans le **déphasage thermique** journalier, qui atteint les 12h.

La présence de **l'eau** et **la végétation** crée un milieu **bioclimatique** par l'effet d'évapotranspiration, en créant des brises d'air qui rendent les espaces urbains, et les habitations cléments durant les périodes de grande chaleur. De ce fait, la palmeraie représente un élément de confort climatique. En plus, **la forme urbaine compacte** de ses groupements, ses rues, ruelles et impasses étroites et sinueuses (zkak) créent de l'ombre et minimisent les surfaces extérieures exposées au rayonnement solaire et aux vents indésirables. **L'introversion** de l'espace habité à son tour rend l'habitation protégée de toute insolation ou effet de nuisance sonore et climatique. La somme de ces facteurs procurent au ksar une parfaite intégration et accommodation dans un milieu aride tant sur le plan climatique qu'environnemental.

Dans les ksour traditionnels, le régime de distribution des températures de surface est **hétérogène** et montre l'influence de **l'orientation des rues**, particulièrement sur les températures de surfaces horizontales : ces dernières sont soumises à une importante surchauffe du sol lorsqu'elles sont orientées dans la direction Est-ouest.

De même, l'écoulement de l'air va se modifier d'une rue à l'une, en fonction de son **orientation** par rapport aux vents dominants. Les réductions de vitesses de vent les plus importantes sont obtenues pour des directions de vents obliques par rapport à l'axe des rues canalisatrices tandis que pour une direction de vent parallèle, la vitesse du vent est moins réduite et peut être même plus élevée dans une rue profonde que dans une rue plus large (**effet canalisation**).

L'effet du **prospect** sur les températures d'air et de surface semble être limité. Dans ces conditions, seules les protections solaires horizontales permettent une réduction du stress thermique dans les espaces extérieurs. Le passage couvert, dispositif urbain local, constitue une de ces protections efficaces.

Les mesures effectuées ont mis l'accent sur l'effet de **compacité** : plus l'espace est dégagé, plus l'impact de la température de l'air est fort, la palmeraie et les **passages couverts** réalisent les températures les plus basses, les places et les passages découverts les températures les plus élevées. Par contre, ces **espaces dégagés** favorisent le soir la dissipation rapide de chaleur emmagasinée dans la journée, alors que dans le tissu urbain compact, l'évacuation de cette

chaleur emmagasinée prend du temps et risque de s'étaler jusqu'à matin

REMERCIEMENT

Merci au Directeur de l'EPAU et au responsable du laboratoire LAE pour avoir mis les moyens financiers et logistiques nécessaires à l'aboutissement de cette recherche. Merci également au responsable de l'Office National de Météorologie (ONM) de Dar El Beida d'Alger pour m'avoir fourni les données climatiques (1991-2010) de la ville de Timimoun. Enfin aux membres du projet CMEP 09MDU788 ayant participé aux campagnes de mesures.

RÉFÉRENCE

- [1] Bisson, J. 1957 Le Gourara. Étude de géographie humaine. Alger.
- [2] Schirmer, 1893, Le Sahara. (Hachette, Éd.) Paris. P.21. Consulté sur <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k166057n/f6.item>
- [3] Kitous S, Bensalem R, Adolphe L. Airflow patterns within a complex urban topography under hot and dry climate in the Algerian Sahara. Building and Environment. Volume 56, October 2012, Pages 162-175
- [4] Sacré, C. (1983). Le confort dans les espaces extérieurs: analyse microclimatique (Comfort in outdoor spaces: microclimatic analysis). CSTB de Nantes.
- [5] Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. Atmospheric Environment (1967), 22(12), 2691–2700.
- [6] Mestoul D., Bensalem R., Adolphe L. (2017) Modeling of urban form against sand accumulation in the city of Gourara in southern Algeria. Energy Procedia 122, 913-918. <http://www.bu.edu/wara/files/2012/05/Programme-Carrefours-Sahariens-15.05.2014.pdf>
- [7] Oke T.R. Boundary layer climates. London and New-York: Methuen, second edition, 1987 (first edition 1978), 435p.
- [8] Guyot G. – Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Edit. Masson, Paris, 1997, 505p.
- [9] Escourrou G. - Le climat et l'environnement. Les facteurs locaux du climat. Edit Masson, Paris, 1983.
- [10] Saito I., Ishihara O., Katayama T. 1990: Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. Energy and Buildings 15/16: 443-446.
- [11] Avissar R. 1996: Potential effects of vegetation on urban thermal environment. Atm. Envir. 30: 437-448.
- [12] Givoni B. Climate considerations in building and urban design. (1998). New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.
- [13] Adolphe, L., Châtelet, A., Bousoulim, Aït-Ameur, Barlet, Casal, Deboulbé, E. (2002). SAGACités Vers un Système d'Aide à la Gestion des Ambiances urbaines - RAPPORT FINAL (MENRT- Direction de la Technologie.).
- [14] Ali-Toudert F., Mayer H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and solar orientation on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. Building and Environment, vol. 41: 94-108.
- [15] Ali-Toudert F., Djenane M., Bensalem R., Mayer H. 2005. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. Climate Research Vol. 28: pp 243-256,
- [16] Mazouz, S. (2005). L'adaptation bioclimatique dans le Bas-Sahara. Dans M. COTE, & IREMAM (Éd.), La ville et le désert : le Bas-Sahara algérien (pp. 187-199). Paris: Karthala.

⁵ Pour réaliser leurs constructions, les anciens habitants du ksar utilisaient la terre disponible sur place qu'ils façonnent eux-mêmes en terre crue après mélange avec l'eau des seguias et malaxage avec leurs pieds. Ils font sécher le produit à l'air libre pour obtenir des pièces de brique de terre, qui serviront à la construction des murs avec des épaisseurs de 40 à 60cm. Ces derniers sont couverts à leur tour par une couche de terre servant d'enduit.

Influence du Dopage du Dioxyde de Titane Sur la Dégradation Des Substances Pharmaceutiques

Nadia Chekir¹, Djilali Tassalit², Ouassila Benhabiles², Nachida Kasbadji Merzouk²,
Nour elimen Bendjebbas¹, Hayat Ghebghoub¹

¹Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, Laboratoire des Phénomènes de Transfert, Bab-Ezzouar, 16111 Alger, Algérie.

²Unité de Développement des Équipements Solaires. UDES /Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER, Bou-Ismaïl, 42004, W. Tipaza, Algérie.

*nchekir@yahoo.fr

Résumé— Le traitement photocatalytique se présente comme une technologie de choix pour la dépollution et l'intégration des eaux contaminées, car il s'agit d'un système performant, simple et économique. Ces différentes caractéristiques attractives ont engendré un grand intérêt de la part des chercheurs pour la compréhension, l'optimisation et l'application industrielle de ce procédé. L'objectif de cette étude est d'appliquer un processus d'oxydation avancée, à savoir, la photocatalyse solaire, pour le traitement des eaux contaminées par des substances pharmaceutiques telle que le paracétamol et essayer d'améliorer ses performances en utilisant un catalyseur dopé. Nous avons testés deux métaux à savoir le cuivre et l'argent à plusieurs pourcentages. Le taux de dégradation a augmenté de 20% en présence du catalyseur dopé 4% Ag/TiO₂ comparativement au traitement en présence du catalyseur TiO₂.

Mot clés— Dopage, photocatalyse, Dioxyde de titane, Paracétamol

I. INTRODUCTION

Les procédés de traitement dans les stations d'épuration ne permettent pas toujours d'éliminer toute la pollution et l'on retrouve des traces de polluant dans les eaux en sortie des stations. L'exemple caractéristique est la présence de substances pharmaceutiques qui peuvent avoir un impact sur les organismes vivants [1]. On peut même retrouver ces substances dans les eaux pour la consommation humaine.

C'est dans l'intention de développer des techniques de traitement rapides, moins onéreuses et plus adaptées aux composés organiques réfractaires et afin d'éliminer les traces de micropolluants pharmaceutiques dans les eaux, de nombreuses techniques d'oxydation avancée (TOAs) ont vu le jour ces dernières années. Plusieurs études rapportent que les composés non biodégradables sont souvent chimiquement très stables et difficiles à minéraliser de manière complète [2]. C'est dans ce type de cas qu'il convient d'utiliser des techniques plus performantes que les procédés de purification classiques.

Ces techniques sont des procédés de traitement d'eau ayant connu une évolution rapide au cours des vingt dernières années. Elles appartiennent à la dernière génération de techniques mises au point dans ce domaine. Elles ont pour but la minéralisation totale de polluants en CO₂, H₂O et composés inorganiques. Si la charge polluante est trop élevée pour une

minéralisation totale, ces techniques permettent une dégradation en composés moins toxiques et moins concentrés. Ce sont des méthodes d'oxydation physico-chimiques qui permettent la destruction des polluants cibles et non la séparation ou le changement de phase comme le font les procédés de séparation ou de transfert de matière. Elles fournissent une solution complète à l'abaissement du taux de pollution aqueuse et ne sont pas concernées par des problématiques d'élimination de déchets secondaires ou concentrés (filtrats, adsorbats, boues biologiques, etc.) [3]. Toutes ces TOAs sont fondées sur le même principe de base : générer des espèces radicalaires très oxydantes, comme par exemple les radicaux hydroxyles °OH, pour dégrader les polluants organiques. De par leur très forte réactivité, les radicaux hydroxyles sont des oxydants peu sélectifs, qui sont capables de dégrader toutes sortes de polluants.

Parmi les TOAs, la photocatalyse hétérogène est un processus qui repose sur l'excitation d'un semi-conducteur par un rayonnement lumineux conduisant à l'accélération de la photoréaction en faisant intervenir des réactions entre les paires électron/trou et les produits organiques adsorbés à la surface du semi-conducteur. Ce processus peut se décomposer en 5 étapes indépendantes comme tout les autres procédés de catalyse hétérogène [4] :

- 1 - transfert du ou des réactifs de la phase fluide vers la surface du catalyseur,
- 2 - adsorption d'au moins d'un réactif,
- 3 - réactions en phase adsorbée,
- 4 - désorption des produits intermédiaires et/ou finals,
- 5 - transfert de ces produits de la région de surface dans la phase fluide.

Le rayonnement lumineux nécessaire à notre procédé peut être fourni par le rayonnement solaire. L'énergie solaire disponible tout au long de l'année avec des intensités variables peut constituer une source alternative utilisable surtout dans les pays en voie de développement. En effet, cette source d'énergie renouvelable est gratuite et inépuisable, elle est de loin l'énergie la plus abondante sur Terre.

Le deuxième pilier de la photocatalyse est le semi-conducteur. Plusieurs semi-conducteurs ont été testés dans la photocatalyse comme TiO₂, ZnO, ZnS, WO₃, GaP, Fe₂O₃ et CdS [5,6]. Le

CdS et le GaP ont l'avantage d'absorber une fraction plus importante du spectre solaire que le TiO₂, mais ils sont instables durant l'oxydation photocatalytique.

Le TiO₂, au contraire, est stable et constitue un bon compromis entre efficacité et stabilité. C'est le semi-conducteur le plus utilisé en photocatalyse hétérogène en raison de son faible coût et de sa grande efficacité à minéraliser des polluants organiques [7]. Plusieurs auteurs ont montré qu'effectivement le dioxyde de titane présente une efficacité photocatalytique plus importante [8]. Reste que l'une des limitations du procédé photocatalytique en présence de TiO₂ est la recombinaison des porteurs de charge dans le volume et à la surface. Cette recombinaison diminue le rendement quantique du processus photocatalytique du TiO₂. D'autre part, la non absorption de la lumière visible limite ses applications en lumière solaire. Afin d'améliorer l'activité photocatalytique du TiO₂, plusieurs recherches se sont effectuées sur la modification de TiO₂ :

- Taille : la diminution de la taille des particules a permis d'augmenter le rapport surface/volume ainsi que la surface d'interaction SC-polluant. Simultanément, des études de réflectance diffuse résolues en temps ont montré que la concentration des porteurs de charge sur la surface est améliorée en diminuant la taille des particules [9].

- Dopage métal : *Hoffman et al.* [10] ont montré que la substitution systématique des atomes Ti par des atomes métalliques (Fe³⁺, Mo⁵⁺, Ru³⁺, Os³⁺, Re⁵⁺, V⁴⁺, Rh³⁺, Co³⁺ et Al³⁺) modifie l'absorption du TiO₂ (de taille 2-4 nm) en introduisant des niveaux énergétiques localisés entre la BV et la BC de TiO₂. L'énergie de ces niveaux ainsi que la distribution et concentration de dopants dans le semi-conducteur jouent un rôle important dans les processus photocatalytiques d'oxydation du chloroforme (CHCl₃) et de réduction du tétrachlorure de carbone (CCl₄).

- Fer : la substitution des atomes de Ti par des atomes de Fe dans le réseau du TiO₂ est possible grâce à la similarité de leurs rayons ioniques. Des études de simulation DFT sur l'introduction du fer dans le réseau du TiO₂ en phase rutile ont été menées par *Asai* [11] et plus récemment par *Yalçin* [12] pour le TiO₂ en phase anatase. Dans les deux scénarios, un léger déplacement des énergétiques de la BV et BC et la création de niveaux intermédiaires sont prédits : ces événements sont fondés sur l'interaction des orbitales 3d du fer avec la bande de conduction de TiO₂. En conséquence, les nanoparticules de Fe-TiO₂ sont capables d'absorber la radiation visible.

- Palladium : *Wang* [13] a montré que la déposition de Pd sur la surface du TiO₂ diminue de façon importante la vitesse de dépolariation des particules au point que l'accumulation de charges négatives dans les particules devient nulle. Ce phénomène est attribué à l'amélioration du mécanisme de capture et de transport des (photo) électrons par le Pd vers l'O₂ adsorbé. Avec la diminution des électrons dans les particules, la probabilité de recombinaison de charges diminue et le processus photocatalytique est plus efficace [14].

- Autres métaux : la déposition de métaux tels que le Cu, Pt, Au, Ag sur la surface de TiO₂ améliore son activité photocatalytique. D'une part les clusters/nanoparticules métalliques agissent comme capteurs des électrons et améliorent la séparation de charges. D'autre part il existe une action synergique entre le TiO₂ et les propriétés catalytiques propres du métal. Ainsi les nanoparticules dopées au cuivre, Cu-TiO₂ ont été fréquemment appliquées dans les traitements biologiques/antibactériens, dans des réactions de réduction de CO₂ [15]. Les nanoparticules dopées avec du platine (Pt-TiO₂) sont utilisées dans le «water splitting» et dans la production d'H₂ à partir d'alcools, d'aldéhydes ou d'acides organiques de petite taille à température ambiante [16]. Les nanoparticules dopées avec de l'or (Au-TiO₂) de façon équivalente au Pt-TiO₂ ont des applications intéressantes pour la production d'H₂ car elles absorbent dans le domaine du visible vers 450nm grâce aux «surfaces plasmon-résonance» propres aux nanoparticules d'or [17].

L'objectif principal de cette étude est d'augmenter les performances de la photocatalyse solaire pour la dégradation du paracétamol en présence du dioxyde de titane en suspension et d'optimiser les conditions de fonctionnement des réacteurs photocatalytiques. Pour cela nous avons testé de nouveaux catalyseurs dopés par des métaux.

II. MATERIEL ET METHODE

II.1. Réactifs chimiques utilisés

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le paracétamol qui représente un polluant pharmaceutique comme molécule organique biorécalcitrante. le paracétamol, encore connu sous le nom d'acétaminophène, est l'analgésique le plus couramment utilisé dans le monde et plus précisément dans différentes spécialités médicamenteuses pour le soulagement de la fièvre, des maux de tête et de certaines douleurs mineures [18, 19] . Il est transformé dans le foie en métabolites sulfates et glucuroconjugés, et est excrété dans l'urine [20]. La source majeure de la pollution des eaux de surface par le paracétamol provient des effluents de stations d'épuration [21], tandis que la pollution des sols et des eaux souterraines est plus limitée. Si ses effets toxiques à forte dose sont bien connus pour l'homme (dommages hépatiques), les conséquences sur l'environnement de sa présence sont moins bien renseignées [22]. Cependant une homologie de récepteur chez la truite arc-en-ciel suggère une sensibilité des poissons à cette molécule [23]. Chimiquement, le paracétamol est désigné sous le terme de 1-hydroxy 4-acétamidobenzène qui est un dérivé phénolique. Sa formule brute est: C₈H₉NO₂ et sa masse molaire est de 151,1626 g/mol, son spectre d'adsorption dans l'eau indique une longueur d'onde maximale à 243 nm.

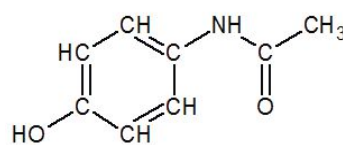


Fig.1. Structure moléculaire du paracétamol.

Commercialisé par la firme Millennium, le dioxyde de titane PC500 a été utilisé comme catalyseur de référence au cours de ce travail. Il est sous forme d'une poudre blanche utilisé en suspension dans la solution à traiter. Il est constitué d'une seule forme cristalline de TiO_2 : l'anatase, connue pour son activité photocatalytique supérieure à celle du rutile. La taille moyenne des grains est de 5 à 10 nm. Sa surface spécifique est de $320 \text{ m}^2/\text{g}$.

Pour le dopage du TiO_2 de type PC500 nous avons opté pour la méthode d'imprégnation volumique qui consiste à mettre en contact un solide avec un liquide contenant les composants à déposer sur la surface qui sont dans notre cas le cuivre (Cu) et l'argent (Ag) à plusieurs pourcentages .

II.2. Dispositif expérimental

Afin d'évaluer la dégradation photocatalytique des polluants étudiés ainsi que les conditions opératoires optimales, une nouvelle conception d'un réacteur tubulaire en verre a été réalisée (fig.2). Ce dispositif expérimental est constitué de 19 tubes de 50 cm de longueur et 5 mm de diamètre interne placés en parallèle. Un réservoir de deux litres (2L) a été utilisé dans lequel la solution a été introduite. Différentes quantités de particules de dioxyde de titane (TiO_2) ont été constamment dispersées en utilisant un agitateur magnétique. Ce mélange réactionnel est recyclé au moyen d'une pompe péristaltique permettant ainsi la recirculation de la solution. Le réacteur a ont été irradié par 02 lampes U.V.A comme source de rayonnement.

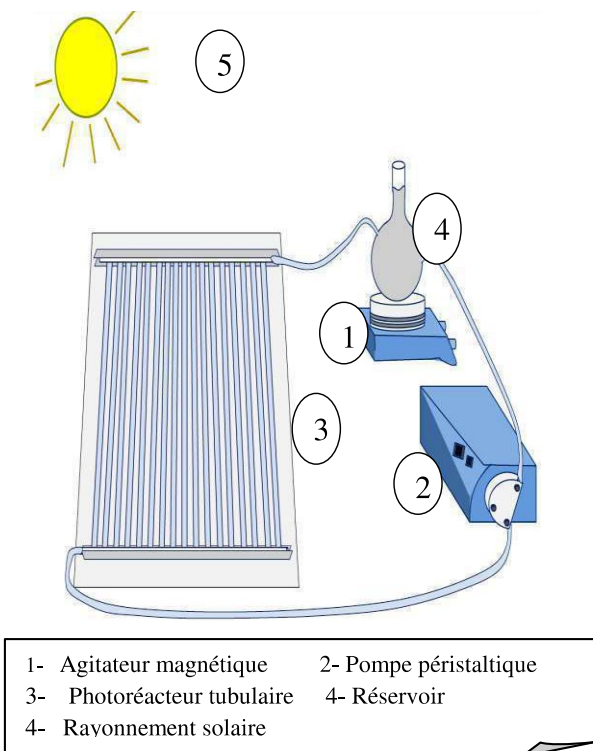


Fig.2. Schéma de l'installation expérimentale.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.1. Choix du catalyseur

Le dioxyde de titane TiO_2 est le photocatalyseur le plus utilisé lors de la dégradation des polluants organiques. Afin de déterminer le type de dioxyde de titane le plus performant, une étude préliminaire a été menée pour la dégradation du paracétamol en présence de différents types d'oxyde de titane à savoir le TiO_2 Degussa P25, le TiO_2 PC 500 Millenium et le TiO_2 commercial Biochem nommé TiO_2 42.

Une série d'expérience a été réalisée en batch dans différents milieux réactionnels (Acide, neutre et basique) et sous irradiation par deux lampes de 24 watt de puissance chacune. La photodégradation du paracétamol a été évaluée en maintenant les conditions opératoires suivantes :

- Une quantité de dioxyde de titane (TiO_2) : 0,4 g/l
- Une concentration initiale en paracétamol : 10 mg/l

Les courbes illustrées dans la figure 3 représentent l'évolution temporelle de la concentration réduite pour différents types de catalyseur et dans différents milieux. Les courbes montrent que pour tous les cas étudiés, le paracétamol a été oxydé de façon appréciable. Les taux de dégradation obtenus pour les différents catalyseurs varient entre 30% et 95%.

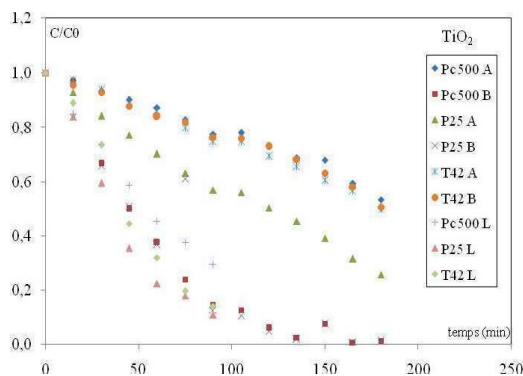


Fig. 3. Evolution temporelle de la concentration réduite du paracétamol en utilisant différents types de TiO_2 .

L'allure des courbes est de forme exponentielle laissant prédire que la cinétique de la dégradation du paracétamol est de pseudo-premier ordre.

Les constantes de vitesses de pseudo-premier ordre k_{app} , les vitesses initiales r_0 , les taux de dégradation déterminés après 120 min de traitement ainsi que les temps de demi-réaction sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1. Valeurs des constantes de vitesse apparente, vitesses initiales, le temps de demi-réaction et le taux de dégradation.

	pH	X % à 120 min	k_{app} (min^{-1})	r_0 ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	$t_{1/2}$ min	R^2
P25	3	49.3	0.0060	0.064	116	0.9959
	Libre	89.3	0.0187	0.223	37	0.9992
	9.5	95.3	0.0144	0.154	48	0.9912
PC500	3	26.5	0.0024	0.026	289	0.9925
	Libre	70.4	0.0104	0.128	67	0.9975
	9.5	94.3	0.0197	0.210	35	0.9984
TiO ₂ 42	3	30.6	0.0025	0.026	277	0.9991
	Libre	85.8	0.0183	0.208	38	0.9983
	9.5	27.0	0.0026	0.028	267	0.9994

Les valeurs du tableau 1, montrent que la dégradation la plus importante est observée pour le TiO₂ P25 en milieu basique et le TiO₂ PC 500 en milieu basique également avec un taux de dégradation qui a atteint 95 % et 94% respectivement. En tenant compte des constantes des vitesses apparentes, le TiO₂ PC 500 présente une performance plus importante avec une constante k_{app} égale à 0,0197 min^{-1} comparativement à celle de TiO₂ P25 avec k_{app} de 0,0144 min^{-1} , d'où vient notre choix pour la suite de notre travail.

III.2. Comparaison entre les différents procédés d'élimination du paracétamol

Dans cette étude le paracétamol a été soumis à différents procédés : une adsorption où la solution est mise en contact avec le catalyseur qui joue le rôle d'adsorbant sans aucun contact avec une source lumineuse, une photolyse où le polluant est mis en contact avec de la lumière naturelle en l'absence de catalyseur et une photocatalyse en présence du catalyseur et de la source de rayonnement UV (soleil). La figure 4 représente la concentration réduite en paracétamol en fonction du temps d'irradiation pour les différents procédés étudiés.

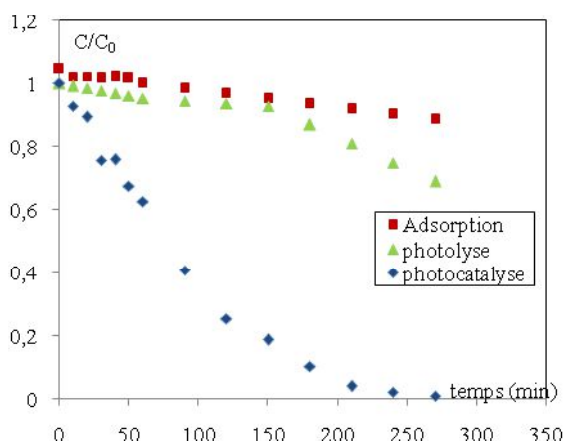


Fig. 4. Evolution temporelle de la concentration réduite du paracétamol pour différents procédés. $C_{para}=10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, $C_{TiO_2}=0,1 \text{ g/l}$; pH libre.

Les résultats obtenus montrent que la quantité du polluant éliminée lors de la photolyse et de l'adsorption est pratiquement négligeable, tandis que lors de la photocatalyse, le taux de dégradation du paracétamol augmente d'une façon remarquable pour atteindre un rendement de 98% au bout de 270 min de traitement. A partir de ces résultats, nous pouvons dire que la photocatalyse apparaît comme une méthode de choix pour la dépollution des polluants organiques tel que le paracétamol, cela rejoint la conclusion trouvée par *Gupta et al.*[24], qui confirme que la photocatalyse hétérogène est une méthode qui permet l'oxydation de la plupart des polluants organiques. Les études réalisées sur la photodégradation de nombreuses molécules organiques [25] indiquent d'une manière générale que la cinétique de dégradation est du pseudo premier ordre ce qui a été confirmé d'après l'allure des courbes caractérisées par une diminution de la concentration du paracétamol montrant une allure exponentielle.

III.3. Effet de la concentration en catalyseur TiO₂

L'effet de la quantité du dioxyde de titane PC500 utilisée pour la photodégradation du paracétamol a été étudié. Nous avons fait varier les concentrations du catalyseur dans une gamme allant de 0,1 à 1,2 g/L avec une concentration initiale en paracétamol de 10 mg/L, un débit de recirculation de 26 ml/s. Les courbes illustrées dans la figure 5, représentent la variation de la concentration réduite en paracétamol en fonction du temps pour différentes concentrations en TiO₂.

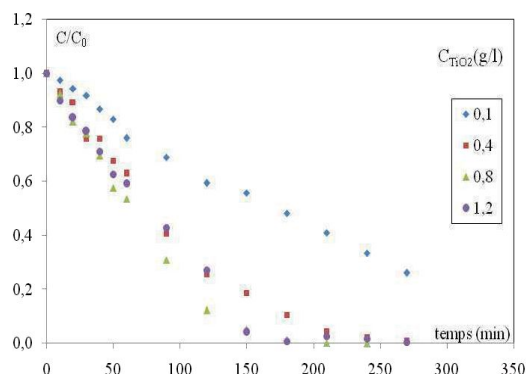
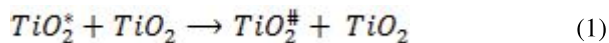


Fig.5. Evolution temporelle de la concentration réduite du paracétamol pour différentes concentrations de TiO₂.

Les résultats montrent que la dégradation du paracétamol augmente avec la concentration du dioxyde de titane TiO₂ jusqu'à ce qu'il atteigne une concentration maximale de 0,8 g/l. Au-delà de cette valeur, la dégradation reste constante. Ces courbes illustrent l'effet remarquable de la quantité du catalyseur, confirmant ainsi le rôle des sites actifs sur la surface du catalyseur dans le processus photocatalytique. Quand on augmente la quantité du catalyseur, les sites actifs disponibles et la pénétration de la lumière dans le système réactionnel diminuent engendrant une quantité faible de catalyseur activée en suspension [26]. De plus à une grande charge de catalyseur, beaucoup de catalyseurs initialement activés peuvent être désactivés par collision avec les particules

des catalyseurs à l'état fondamental selon l'équation suivante [27] :



Où TiO_2^* c'est un catalyseur ayant des espaces actifs adsorbés sur sa surface et $TiO_2^\#$ est la forme désactivé du TiO_2 .

A de grande quantité de TiO_2 les phénomènes l'agglomération et la sédimentation auront lieu, la surface du catalyseur disponible pour l'adsorption de photon va diminuer causant ainsi une diminution de la vitesse de dégradation [28].

Les constantes apparentes de vitesse relatives à chaque concentration ont été déterminées par régression linéaire à partir du tracé de l'évolution de $-\ln(C/C_0)$ en fonction du temps. Ces valeurs de k_{app} ainsi les vitesses initiales r_0 , les taux de dégradation X et les temps de demi-réaction $t_{1/2}$ sont regroupées dans le tableau 2.

Tableau. 2. Valeurs des constantes de vitesse apparente, vitesse initiale et le temps de demi-réaction pour les deux réacteurs.

TiO_2 (g/l)	X %	k_{app} (min^{-1})	r_0 (mg. $l^{-1}.min^{-1}$)	$t_{1/2}$ (min)	R^2
0,1	73,9	0,0041	0,043	169	0,993
0,4	98,9	0,0078	0,085	89	0,999
0,8	100	0,0106	0,108	65	0,995
1,2	99,5	0,0088	0,089	79	0,992

L'effet de la concentration du semi-conducteur sur la vitesse de dégradation est significatif. Les vitesses de dégradation augmentent avec la quantité de dioxyde de titane jusqu'à atteindre un optimum correspondant à la valeur de 0,8 g/l pour une dégradation complète. Il en est de même pour les constantes de vitesse.

III.4. Dopage de TiO_2 PC500

Les rayonnements UV représentant 5% de la lumière solaire sont les seuls à pouvoir activer le photocatalyseur TiO_2 . Plusieurs travaux ont permis de montrer que le dopage de TiO_2 avec les éléments métalliques et non métalliques permet d'étendre son activité dans le visible ce qui permet donc d'élargir le domaine d'application [29]. La photocatalyse solaire va s'imposer progressivement comme une technologie alternative pour la dépollution de l'eau notamment dans les pays à fort taux d'ensoleillement comme c'est le cas de notre pays ; elle s'inscrit dans une perspective de développement durable utilisant le soleil comme source d'énergie renouvelable.

A cet effet, deux approches principales ont été utilisées :

- Dopage cationique avec des métaux de transition
- Dopage anionique avec les non métaux.

Dans cette partie de travail, nous nous intéressés à la première approche (dopage cationique) où nous avons testé plusieurs métaux à différents pourcentages.

Nous avons sectionné plusieurs métaux à savoir le cuivre et l'argent pour effectuer ces expériences. Différentes préparations du catalyseur dopé à différents pourcentage des métaux (1%, 4%, 10%) ont été menées [30,31].

Des tests préliminaires pour la photodégradation du paracétamol ont été effectués pour définir le meilleur catalyseur dopé et avec quel pourcentage de métal. A cet effet, nous avons mené des essais en batch sous rayonnement solaire et sous les conditions opératoires suivantes :

- Concentration en TiO_2 dopé : 0,4 g/L
- Concentration en paracétamol : 10 mg/L
- pH libre.

Les figures 6 et 7 représentent l'évolution de la concentration réduite en paracétamol en fonction du temps pour les différents pourcentages en métal et cela sous irradiation solaire.

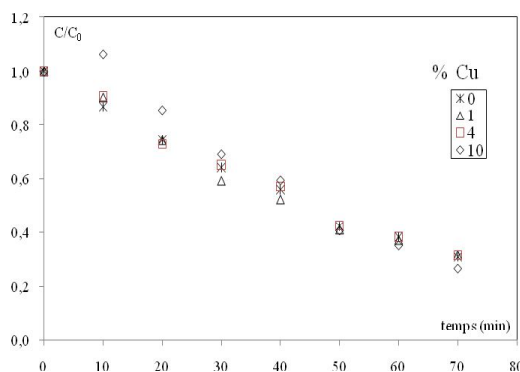


Fig. 6. Evolution temporelle de la concentration réduite du paracétamol pour différents pourcentages de catalyseur dopé Cu/ TiO_2 .

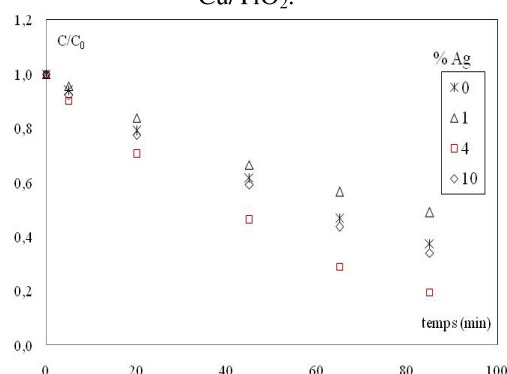


Fig. 7. Evolution temporelle de la concentration réduite du paracétamol pour différents pourcentages de catalyseur dopé Ag/ TiO_2 .

Les résultats obtenus en présence des deux catalyseurs dopés montrent que la photodégradation du paracétamol est améliorée sous irradiation solaire en présence du catalyseur Ag/ TiO_2 à 4%.

La présence du cuivre avec les différents pourcentages n'a aucun effet sur la dégradation du paracétamol, alors qu'en

présence de l'argent, la dégradation photocatalytique sous le soleil a un effet significatif. Le taux de dégradation obtenue après 80 min de traitement passe de 62% pour le TiO₂ PC uniquement à 80% pour 4% Ag/TiO₂.

Nous avons supposé que la réaction suit une cinétique de pseudo premier ordre lors de l'utilisation des deux catalyseurs, les valeurs des constantes cinétiques, vitesses initiales ainsi que les temps de demi-réaction et les taux de dégradation sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 3. Valeurs des constantes cinétiques, vitesses initiales et les temps de demi-réaction pour les différents pourcentages en métal.

	% Métal	X %	k _{app} (min ⁻¹)	r ₀ (mg.l ⁻¹ .min ⁻¹)	t _{1/2} (min)	R ²
Cuivre	0	69.0	0.0164	0.1484	42	0.9982
	1	68.2	0.0166	0.1767	42	0.9970
	4	68.2	0.0159	0.1680	44	0.9962
	10	73.4	0.0182	0.1917	38	0.9973
Argent	0	62.5	0.0115	0.1172	60	0.9943
	1	51.0	0.0099	0.1010	70	0.9917
	4	80.7	0.0189	0.1926	37	0.9860
	10	66.0	0.0126	0.1296	55	0.9951

D'après les valeurs du tableau 3, la constante apparente présente un optimum pour le catalyseur dopé avec de l'argent à 4%, ce qui nous pousse à tester ce catalyseur dans les deux réacteurs utilisés dans cette étude et cela dans les conditions opératoires optimales à savoir :

- Débit de recirculation Q : 26ml/s
- Concentration en paracétamol : 10mg/L
- Concentration en Ag/TiO₂ à 4% : 0,4 g/l

L'évolution de la concentration réduite du paracétamol en fonction du temps pour le catalyseur dopé sous rayonnement solaire est représentée dans la figure 8.

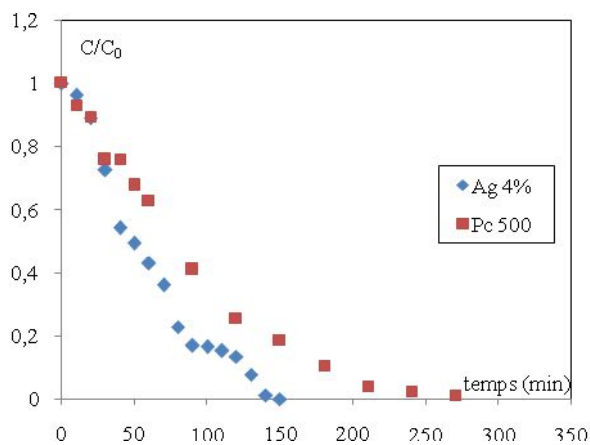


Fig.8. Evolution temporelle de la concentration réduite du paracétamol dans le système (Ag-TiO₂/U.V. solaire)

D'après les courbes de la figure 8, nous observons que la dégradation du paracétamol est beaucoup plus importante en

utilisant un catalyseur dopé 4% Ag/TiO₂. Une dégradation complète est obtenue au bout de 150 min de traitement. Ce qui confirme que sous le soleil, le catalyseur dopé améliore nettement le taux d'abattement.

IV. CONCLUSIONS

La dégradation du paracétamol a été étudiée par photocatalyse hétérogène en suspension en utilisant le TiO₂ PC-500 comme semi-conducteur cela sous le rayonnement solaire comme source d'irradiation.

Le procédé photocatalytique semble être performant pour l'élimination de composés organiques résistants aux techniques classiques. La dégradation du paracétamol atteint des taux de 100% au bout de 90 min seulement de traitement sous rayonnement solaire. Ce travail montre

Dans le but d'améliorer et d'augmenter les performances de la photocatalyse solaire, nous avons testé de nouveaux catalyseurs dopés par des métaux. La dégradation du paracétamol est beaucoup plus importante en utilisant un catalyseur dopé 4% Ag/TiO₂.

Lors du traitement photocatalytique en présence du catalyseur dopé 4% Ag/TiO₂, le taux de dégradation à augmenté de 20% comparativement au traitement avec le catalyseur PC500.

Une dégradation complète est obtenue au bout Ce qui confirme que sous le soleil, le catalyseur dopé améliore nettement le taux d'abattement.

REFERENCES

- [1] D.W. Kolpin, M. Skopec, M.T. Meyer, E.T. Furlong, S.D. Zaugg. Urban contribution of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants to streams during differing flow conditions, *Science of the Total Environment*. 328 (1-3), 2004, 119-130.
- [2] R. Andreozzi, V. Caprio, A. Insola, R Marotta. Advanced oxidation processes (AOP) for water purification and recovery, *Catalysis Today* 53 (1), 1999, 51-59.
- [3] S. Helali. Application de la photocatalyse pour la dégradation des polluants chimiques et bactériologiques dans l'eau en utilisant des catalyseurs irradiés par des photons de lumière naturelle ou artificielle (UV-A /UV-B) , thèse doctorat , Université Claude Bernard - Lyon I, 2012.
- [4] J.M. Herrmann, Heterogeneous photocatalysis: fundamentals and applications the removal of various types of aqueous pollutants. *Catalysis today* 53, 1999, 115-129.
- [5] S. Chatterjee, S. Sarkar, S.N. Bhattacharyya, Photodegradation of phenol by visible light in the presence of colloidal Fe2O3, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 81 (3), 1994, 199-203.
- [6] J.-M. Herrmann, M.-N.I. Mozzanega, P. Pichat. Oxidation of oxalic acid in aqueous suspensions of semiconductors illuminated with UV or visible light, *Journal of Photochemistry* 22 (4), 1983, 333-343.
- [7] D.M. Blake. Bibliography of work on the photocatalytic removal of hazardous compounds from water and air, National Technical Information Service. U.S Department of Commerce. Springfield, USA. Update number 3 to January 1999 (2000).
- [8] Suja P. Devipriya, Suguna Yesodharan. Photocatalytic degradation of phenol in water using TiO2 and ZnO 31 (3), 2010, 247-249.
- [9] A. Furube, T. Asahi, H. Masuhara, H. Yamashita, et M. Anpo. Charge Carrier Dynamics of Standard TiO2 Catalysts Revealed by Femtosecond Diffuse Reflectance Spectroscopy, *The Journal of Physical Chemistry B* 103 (16), 1999, 3120-3127.
- [10] W. Choi, A. Termin, et M. Hoffmann. The Role of Metal Ion Dopants in Quantum-Sized TiO2: Correlation between Photoreactivity and Charge Carrier Recombination Dynamics, *The Journal of Physical Chemistry* 98 (51), 1994, 13669-13679.

-
- [11] K. Asai, T. Umebayashi, T. Yamaki, et H. Itoh. Analysis of electronic structures of 3D transition metal-doped TiO₂ based on band calculations, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 63 (10), 2002, 1909-1920.
- [12] Y. Yalçın, M. Kiliç, et Z. Çinar. Fe³⁺-doped TiO₂: A combined experimental and computational approach to the evaluation of visible light activity, *Applied Catalysis B Environmental* 99 (3-4), 2010, 469-477.
- [13] C. M. Wang, A. Heller, et H. Gerischer. Palladium catalysis of O₂ reduction by electrons accumulated on TiO₂ particles during photoassisted oxidation of organic compounds, *Journal of The American Chemistry Society* 114 (13), 1992, 5230-5234.
- [14] B. Xie, Y. Xiong, R. Chen, J. Chen, et P. Cai. Catalytic activities of Pd-TiO₂ film towards the oxidation of formic acid, *Catalysis Communications* 6 (11), 2005, 699-704.
- [15] K. Hirano, K. Inoue, et T. Yatsu. Photocatalysed reduction of CO₂ in aqueous TiO₂ suspension mixed with copper powder, *Journal of photochemistry and photobiology A Chemistry* 64 (2) 1992, 255-258.
- [16] S. Jin et F. Shiraishi. Photocatalytic activities enhanced for decompositions of organic compounds over metal-photodepositing titanium dioxide, *Chemical Engineering Journal* 97 (2-3), 2004, 203-211.
- [17] O. Rosseler, M. V. Shankar, M. K.-L. Du, L. Schmidlin, N. Keller, et V. Keller. Solar light photocatalytic hydrogen production from water over Pt and Au/TiO₂ (anatase/rutile) photocatalysts: Influence of noble metal and porogen promotion, *Journal of Catalysis* 269 (1), 2010, 179-190.
- [18] J.V. Holm, K. Ruegge, P.L. Bjerg, T.H. Christensen. Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater down-gradient of a landfill (Grindsted Denmark). *Environmental Science Technology* 29(5), 1995, 1415-1420.
- [19] K. Ikehata, N.J. Naghashkar, M. El-Din. Degradation of aqueous pharmaceuticals by ozonation and advanced oxidation processes: a review. *Ozone Science Engineering* 28(6), 2006, 353-414.
- [20] K.A. Johnson, R. Plumb. Investigating the human metabolism of acetaminophen using UPLC and exact mass OA-TOF MS. *J. Pharmaceut. Biomed.* 39: 805-810. (2005)
- [21] A. Thomas, T. Ternes. Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Resources* 32 (11), 1998, 3245-3260.
- [22] Rapport de l'Académie nationale de Pharmacie «Médicaments et environnement», 2008.
- [23] M. C. Bregand. Contamination des milieux aquatiques par les substances pharmaceutiques et cosmétiques - Etat des lieux et perspectives. *Archive Institutionnelle de l'Ifremer*, 2009.
- [24] V. K. Gupta, R. Jain, A. Nayak, S. Agarwal, M. Shrivastava. Removal of the hazardous dye—Tartrazine by photodégradation on titanium dioxide surface, *Materials Science and Engineering C* 31 (5), 2011, 1062-1067.
- [25] G.R. Boyd, H. Reemtsma, D.A. Grimm, S. Mitra. Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in surface and treated waters of Louisiana, USA and Ontario, Canada, *Science of The Total Environment* 311(1-3), 2003, 135-149.
- [26] L. Yang, L. E. Yu, M.B. Ray. Degradation of paracetamol in aqueous solutions by TiO₂ Photocatalysis, *Water Research* 42 (13), 2008, 3480-3488.
- [27] B. Neppolian, H. C. Choi, S. Sakthivel, B. Arabindoo, V. Murugesan. Solar/UV-induced photocatalytic degradation of three commercial textile dyes, *Journal of Hazardous Materials* 89 (2-3), 2002, 303-317.
- [28] C. M. So, M.Y. Cheng, J. C. Yu, P.K. Wong. Degradation of azo dye Procion Red MX-5B by photocatalytic oxidation, *Chemosphere* 46 (6), 2002, 905-912.
- [29] M. Hamadianian, S. Karimzadeh, V. Jabbari, D. Villagran. Synthesis of cysteine, cobalt and copper-doped TiO₂ nanophotocatalysts with excellent visible-light-induced photocatalytic activity, *Materials Science in Semiconductor Processing* 41, 2016, 168-176.
- [30] I. Ganesh, P.P. Kumar, I. Annapoorna, J.M. Sumliner, M. Ramakrishna, N.Y. Hebalkar, G. Padmanabham, G. Sundararajan. Preparation and characterization of Cu-doped TiO₂ materials for electrochemical, photoelectrochemical, and photocatalytic applications, *Applied Surface Science* 293, 2014, 229-247.
- [31] E. Albiter, M.A. Valenzuela, S. Alfaro, G. Valverde-Aguilar, F.M. Martinez-Pallares. Photocatalytic deposition of Ag nanoparticles on TiO₂: Metal precursor effect on the structural and photoactivity properties, *Journal of Saudi Chemical Society* 19(5), 2015, 563-573.

Séparation d'énergie dans un tube vortex: Modélisation tridimensionnelle

Ines Mokni^{#1,2}, Philippe Bournot^{*3}, Hatem Mhiri^{#2}

^{#1} CRTE n Borj Cedria, Laboratoire des procédés thermiques (LPT), BP 95, Hammam-Lif 2050 Tunisie

^{#2} ENIM - Unité de Thermique et Thermodynamique des Processus Industriels, Université de Monastir,
Route Ouardanine 5000 Monastir, Tunisie

mokni_ines@yahoo.fr

^{*3} Institut de mécanique de Marseille, UNIMECA, Université de Provence
60 rue Joliot Curie Technopôle de Château-Gombert 13453 MARSEILLE Cedex 13, France

Résumé— Une analyse numérique de l'écoulement compressible dans les tubes vortex est menée afin de contribuer à la compréhension du phénomène de séparation thermique. Les résultats trouvés en termes de température du flux chaud et du flux froid sont comparés aux données expérimentales de la littérature. La modélisation a permis de bien comprendre le phénomène de la séparation de l'énergie qui est en fait le résultat des contraintes visqueuses entre les couches fluides en rotation ainsi qu'au processus de détente et de compression.

Mots clés — Tube vortex, CFD, RHVT, séparation d'énergie.

I. INTRODUCTION

Le tube vortex est un dispositif thermodynamique qui se présente sous forme d'un tube creux avec une entrée où le fluide y sera introduit à haute pression. Ce dispositif permet de produire deux jets de haute et de basse température. Une telle séparation de l'écoulement est désignée sous le nom de l'effet de séparation d'énergie.

Le tube vortex est avantageux par rapport à d'autres appareils de réfrigération normaux. Il est écologique et il ne nécessite aucun entretien. Il permet à faible coût d'avoir instantanément un flux froid avec une température réglable. Le tube vortex peut être utilisé dans plusieurs domaines industriels tels que dans le refroidissement des pièces mécaniques, le refroidissement des équipements traitant les produits chimiques explosifs, le refroidissement des armoires électriques et électroniques ...

Afin de contribuer à la compréhension du phénomène de séparation thermique ainsi que d'améliorer ses performances, plusieurs travaux ont été menés. Ces derniers peuvent être divisés en trois catégories : les études expérimentales, analytiques et numériques. En outre, pour les trois catégories citées, les chercheurs ont traité les résultats de deux manières différentes. Il y en a qui se sont intéressés à l'écoulement interne (profils de température, pression et vitesse) et le phénomène de séparation d'énergie ([1], [2], [3]).

Alors que d'autres se sont intéressés à l'amélioration des performances du dispositif en étudiant non seulement des paramètres thermo-physiques comme la pression d'entrée ([4], [5]) et la température d'entrée [6], mais aussi des paramètres géométriques comme le diamètre de l'orifice froid [7], la buse d'entrée [8] et la longueur du tube vortex [9].

Cockerill [3] et Gao [4] ont menés des études expérimentales sur les tubes vortex mais ils ont aussi constaté que la détermination expérimentale des composantes de vitesse est relativement difficile dans ces dispositifs. Ceci est à cause des sondes de mesure qui peuvent considérablement perturber ou modifier le champ d'écoulement. La détermination des composantes de la vitesse par CFD devient alors préférable.

En plus de la CFD, des modèles analytiques qui permettent d'estimer les différences de températures au niveau des flux chaud et froid, ont été proposés ([10], [4]).

On s'intéresse dans ce travail à l'étude de la séparation thermique dans les tubes vortex de Ranque Hilsch (RHVT) afin de contribuer à la compréhension du phénomène de séparation dans ce type d'équipement. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur les résultats expérimentaux trouvés dans la littérature [4] puisque l'étude expérimentale de ce dernier comporte une masse importante de données (Les champs de température, de vitesse et de pression). Ces résultats ont été obtenus grâce aux techniques CPT: tube de Pitot de type cylindrique, SPHWA : anémométrie à fil chaud et THC: thermocouple de type E. Ces moyens de mesures sont caractérisés par des erreurs de mesures ne dépassant pas respectivement 15%, 5% et 5%.

II. DESCRIPTION DU TUBE VORTEX

Nous représentons sur la Fig. 1 la géométrie et les dimensions du tube vortex étudié. Nous avons adopté la géométrie étudiée par [4]. Le tube vortex de dimensions D_{IV} et H comporte la chambre de vortex de dimensions D_{cv} et h_1 , une seule buse d'entrée de forme tubulaire (tuyère), une sortie du flux froid en forme de tube cylindrique de diamètre d_1 et enfin une sortie du flux chaud comportant une valve conique de dimension (d_2, h_2).

III. METHODES NUMERIQUES

Cette étude est basée sur l'approche RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Les équations adéquates d'un écoulement tridimensionnel turbulent sont résolues numériquement en utilisant le modèle de turbulence k-ε standard. Ce modèle a été choisi puisqu'il a été prouvé que ce modèle permet de bien modéliser l'écoulement turbulent dans

les tubes vortex. En effet, plusieurs auteurs se sont intéressés à la détermination du modèle de turbulence adéquat à la modélisation de la séparation thermique dans les tubes vortex. La plupart des ces auteurs ([11], [12]) ont trouvés que le modèle de turbulences de premier ordre k-ε standard est capable de prédire les caractéristiques générales de l'écoulement et même mieux que le modèle de turbulence k-ε RNG. Mais la comparaison du modèle k-ε standard avec le modèle de second ordre RSM [13] a montré que malgré que les deux modèles sont adéquats pour modéliser l'écoulement, le modèle RSM est capable de mieux prédire les températures des sorties chaude et froide.

La loi « les fonctions standard des parois » (Standard wall functions) pour le traitement près des parois a été associée au modèle de turbulence adopté.

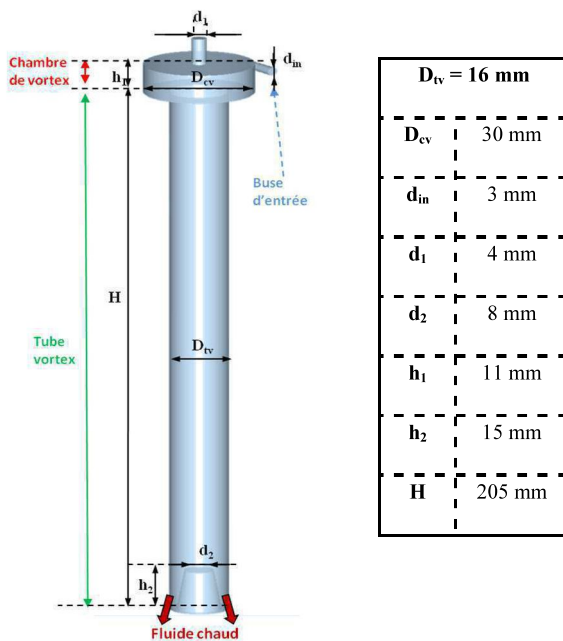


Fig.1 Géométrie et dimensions du tube vortex étudié.

Le domaine est constitué de 988000 volumes de contrôle. Afin d'éviter les erreurs numériques et disposer d'un maillage qui s'adapte bien à la géométrie considérée, les cellules hexaédriques ont été préférées à celles tétraédriques. Ce maillage a été choisi après avoir testé l'indépendance des résultats au degré de finesse du maillage.

En se référant aux données expérimentales de Gao [4], les conditions aux limites utilisées sont décrites ci-dessous. En effet, le fluide utilisé (l'azote) est injecté tangentiellement dans le tube à travers la buse d'entrée avec une pression absolue égale à 6,3 bar et à une température égale à 285.6 K. Par conséquent, nous avons utilisé la condition aux limites «Pressure Inlet» au niveau de l'entrée. La pression au niveau de la sortie du flux froid a été maintenue égale à 1.15 bar ce qui nous mène à imposer une condition aux limites « Pressure Outlet ». La sortie du fluide chaud comporte une valve conique qui permet la régulation du débit sortant à travers la sortie froide, par conséquent la pression au niveau de la sortie

chaude doit être variable afin de varier la fraction massique du flux froid en utilisant la condition aux limites « Pressure Outlet ». Au niveau des parois, supposées adiabatiques, une condition aux limites "no slip" a été utilisée. Les valeurs des pressions et des températures sont fixées en tenant compte des données de référence suivantes :

- Température et Pression (absolue) :
T_r = 293 K, Pr = 1 bar

L'écoulement est considéré à l'état stationnaire, le fluide utilisé est considéré comme un gaz parfait compressible et les propriétés physiques (viscosité, chaleur spécifique, conductivité thermique...) sont constantes.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Validation du Modèle:

Sur le tableau I, on donne les températures du fluide chaud (T_{chaud}) et du fluide froid (T_{froid}) trouvées à l'issue de cette étude numérique pour une fraction massique froide qui est presque égale à 0,3.

Ces derniers sont comparés aux données expérimentales trouvées par [4]. L'écart entre les valeurs trouvées numériquement et les valeurs expérimentales a été aussi calculée. Cet écart est défini comme suit:

$$\text{Ecart (\%)} = \frac{T_{\text{CFD}} - T_{\text{exp}}}{T_{\text{exp}}} * 100$$

TABLEAU I
VALIDATION DU MODÈLE

	CFD	Exp. [4]	Ecart (%)
T _{froid} (K)	268,46	270,5	0,7
T _{chaud} (K)	292,7	291,3	0,4

Le tableau I montre que le modèle élaboré sous Fluent pour la simulation numérique de la séparation thermique du tube vortex peut être considéré comme satisfaisant étant donné que les résultats trouvés en termes de températures du flux chaud et du flux froid sont en bon accord avec les données expérimentales. L'erreur calculée pour les températures est inférieure à 1%.

B. Champs Dynamique de l'Écoulement et Phénomène de Séparation Thermique:

Le modèle élaboré sous fluent est aussi examiné en fonction des vitesses tangentielle et axiale et les résultats ont été comparés aux données expérimentales [4]. On donne alors sur la Fig.2 (a et c), l'évolution radiale des vitesses, respectivement, tangentielle et axiale adimensionnées (par le maximum de la vitesse tangentielle (V_{tang,max}) pour la même position axiale). Les figures montrent que les profils de la vitesse tangentielle et de la vitesse axiale adimensionnées trouvés par CFD sont en bonne concordance avec les données trouvées expérimentalement dans la région située entre r/R=0.5 et r/R=1. Alors que pour la région limitée par r/R= 0 et r/R= 0.5, nous observons des écarts qui peuvent être expliqués par les erreurs de mesure impliquées par le tube de Pitot (présentant une erreur de mesure de la pression aux

alentours de 15%). En effet, dans la littérature, on a prouvé que la zone centrale du tube vortex correspond à un écoulement tourbillonnaire qui est décrit par le mouvement d'un vortex forcé ($v_r = Cte$, $r = w.r$). Ce qui peut à priori confirmer la justesse des profils de vitesse tangentielle et axiale trouvés par CFD. Compte tenu des erreurs de mesure dans cette zone, et étant donné que la vitesse tangentielle et la vitesse axiale sont calculées à partir des mesures de la pression, nous pouvons, par conséquent, attribuer en partie les écarts présentés dans la Fig.2 (a et c) dans la zone centrale aux erreurs de mesure de l'appareil utilisé. De plus, Gao [4] a mentionné que lorsque le nombre de Mach est inférieur à 0,25 la technique CPT (qui est utilisé par cet auteur pour la mesure du champ des vitesses) possède une erreur de 20%. La représentation du nombre de Mach est donnée sur la Fig.3. Cette dernière confirme que les positions, pour lesquelles les vitesses tangentielle et axiale représentent un écart non négligeable entre les données expérimentales et les résultats numériques, correspondent au centre du tube vortex où le nombre de Mach est inférieur à 0,25.

De même, nous observons que la comparaison entre les profils de la vitesse axiale trouvés par CFD et ceux trouvés expérimentalement [4] (Fig.2-c) révèle aussi des écarts dans

la zone proche des parois. En effet, Gao [4] a mentionné que d'après d'autres chercheurs les erreurs de mesure dans cette zone sont dues à l'apparition de l'interférence entre la pointe de la sonde et la paroi. Ces derniers ont indiqué que pour un CPT type cantilever, des erreurs de mesure de la pression de $\pm 8\%$ sont possibles alors que pour le type de sonde utilisé dans [4], l'erreur est d'environ la moitié de l'erreur d'un CPT de type cantilever.

Gao [4] a estimé alors que les effets de paroi deviennent importants lorsque l'orifice de mesure est proche de la paroi.

La distribution de la vitesse tangentielle dans le tube pour un plan longitudinal (Fig.2-b) montre que la vitesse tangentielle augmente à partir des parois puis diminue pour atteindre une valeur minimale au centre de la chambre de vortex. Ce qui montre que l'écoulement dans le tube vortex est décrit par le double vortex de Rankine (un vortex extérieur : libre et un vortex intérieur : forcé).

D'après la distribution de la composante axiale (Fig.2-d), l'écoulement est caractérisé par deux flux. Le premier qui est situé à proximité des parois correspond à l'écoulement du fluide descendant vers la sortie chaude. Alors que le deuxième qui est situé au centre du tube correspond à l'écoulement du fluide ascendant vers la sortie froide.

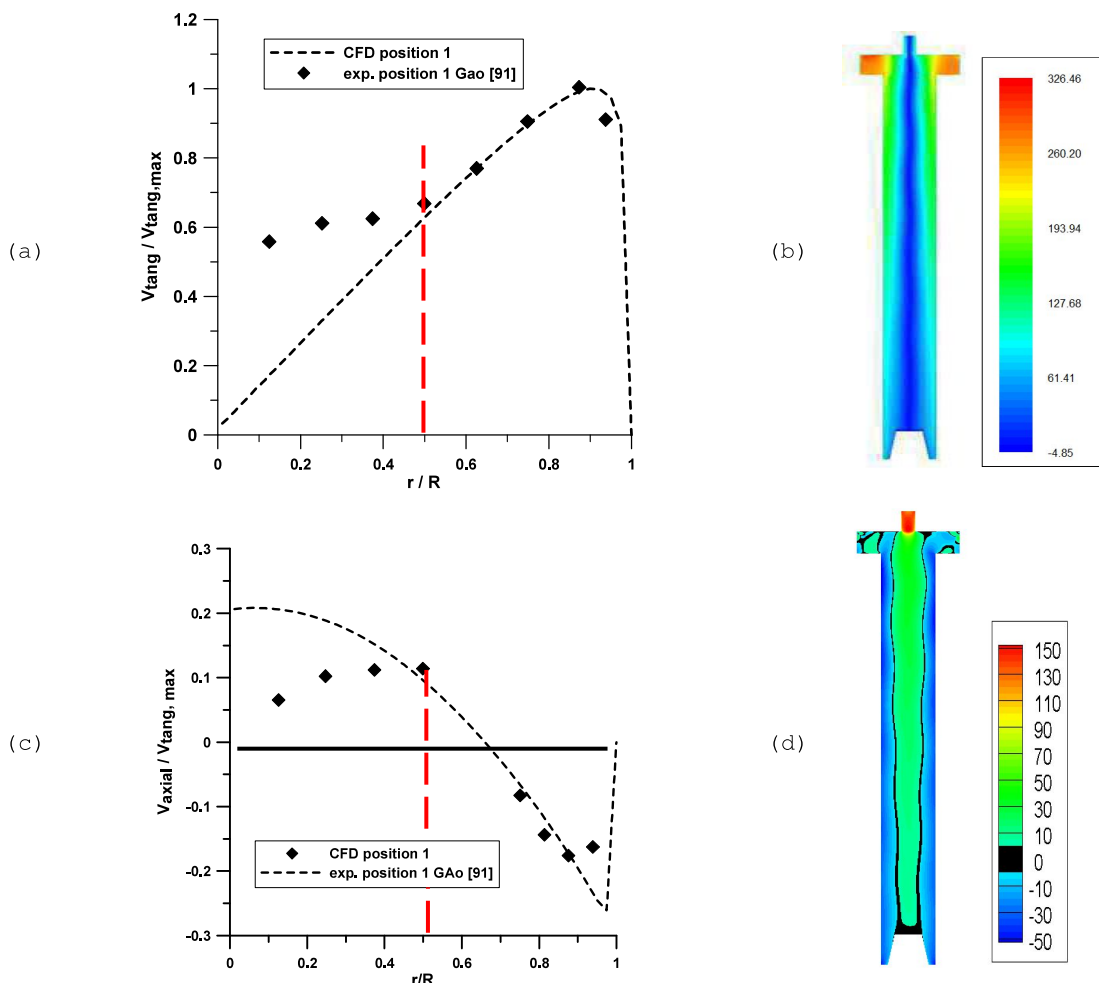


Fig.2 Profils et distributions de : (a) et (b) vitesse tangentielle, (c) et (d) vitesse axiale

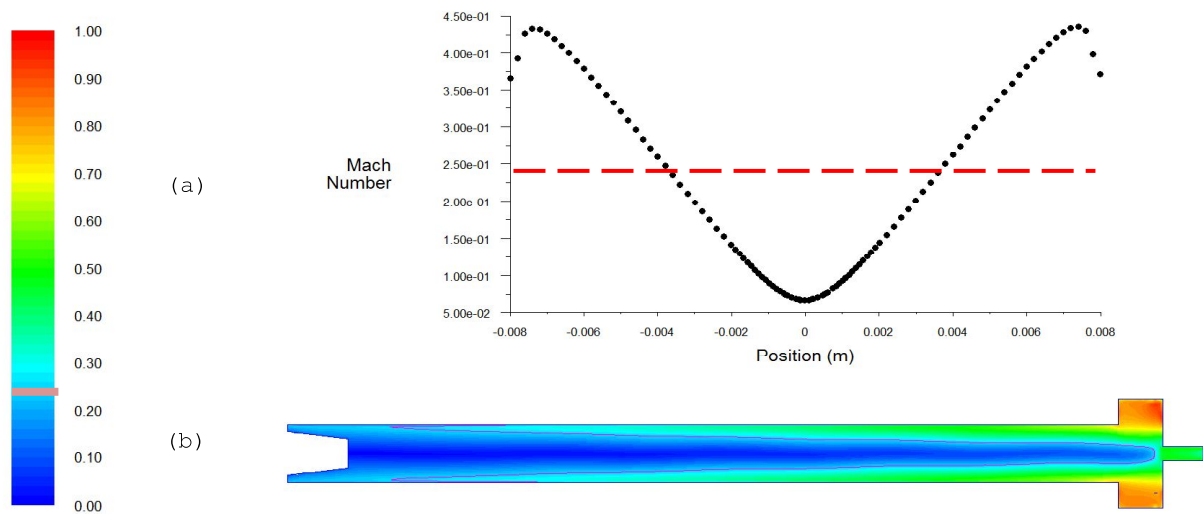


Fig.3 Nombre de Mach (a) évolution sur une ligne à la position 1 (b) distribution sur un plan longitudinal

La ligne noire représentée sur la Fig.2-d correspond aux positions pour lesquelles l'écoulement possède une vitesse axiale nulle. La Fig.2-d montre que l'amplitude de la vitesse axiale au centre ($r = 0$) diminue en s'approchant de la sortie du flux chaud et il y a une position pour laquelle la vitesse axiale devient nulle. Le point où la vitesse axiale cesse d'avoir une valeur positive au centre est désigné par le point d'arrêt.

La répartition de la pression totale dans le tube vortex ainsi que son évolution radiale pour quatre positions axiales sont représentées sur la Fig.4 (a et b). La pression totale pour un gaz compressible est donnée par la relation suivante :

$$p_T = p_s \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\gamma / (\gamma - 1)}$$

p_T , p_s , γ et M sont respectivement la pression totale, la pression statique, l'indice adiabatique et le nombre de Mach.

Les Fig.4 (a et b) montrent qu'il existe un gradient de pression dans la direction radiale avec une pression plus élevée à proximité des parois. En effet, le flux fortement tourbillonnaire provoque l'expansion du fluide à partir des parois vers l'axe.

La différence de pression entre les parois et l'axe est maximale à proximité de l'entrée (La section située dans la chambre de vortex) et diminue progressivement vers la sortie chaude (sections 1-2-5). La figure montre également que la pression est la même à une position voisine de 0,004 m (une valeur moyenne des positions pour lesquelles la vitesse axiale est nulle). La pression diminue progressivement à partir de l'entrée vers la sortie chaude dans la région périphérique. Mais, dans la région centrale ($r=0$), elle diminue à partir de la sortie chaude vers la sortie du flux froid. Ceci indique que le fluide circule dans le sens axial négatif près des parois, mais dans la zone centrale, le fluide circule dans le sens axial positif.

Après la description du champ dynamique de l'écoulement dans le tube vortex, nous passons à la description du phénomène de séparation thermique.

On donne alors sur les Fig.4 (c et d) la distribution de la température totale pour un plan longitudinal ainsi que son évolution radiale pour cinq sections axiales, respectivement.

La température totale pour un gaz compressible est donnée par la relation suivante :

$$T_T = T_s \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)$$

T_T , T_s , γ et M sont respectivement la température totale, la température statique, l'indice adiabatique et le nombre de Mach.

La Fig.4-d montre bien la séparation des flux thermiques chaud et froid. En effet, les valeurs les plus élevées de la température sont situées au niveau de la périphérie. La température atteint 292,7 K à la sortie chaude, alors que les valeurs les plus basses sont situées au niveau de la sortie froide où la température est égale à 268,48 K.

Les profils de la température totale pour différentes positions axiales (Fig.4-c) montrent que la différence des températures entre le centre et la région située près des parois diminue tout en s'approchant de la sortie du flux chaud.

Cette figure montre également que la température au centre de la chambre de vortex est inférieure d'environ 2 K par rapport à la température de la sortie du flux froid. De plus, la température de la sortie du flux chaud est proche de la température près de la paroi à des niveaux axiaux inférieurs (positions 2-4-5). En effet, à cause de l'effet de mélange, les températures des sorties sont une valeur moyenne, de sorte que la température près de la paroi au niveau du côté chaud est supérieure à la température de sortie du flux chaud et la température au centre du côté froid est plus faible que la température de sortie du flux froid.

Si nous examinons maintenant l'allure des profils de la température totale, nous remarquons la compatibilité de ces derniers avec les profils de la pression et les profils de la vitesse tangentielle. La comparaison des profils de la température totale et les profils de la vitesse tangentielle (Fig.2-a) montre que la zone de basse température au centre

coïncide avec la zone de vitesse tangentielle faible. En outre, la comparaison du profil de la température totale et le profil de la pression totale (Fig.4-a) montre que la zone de basse température au centre coïncide avec la zone de pression totale faible.

L'écoulement fortement tourbillonnaire à l'intérieur du tube vortex provoque l'expansion du gaz à partir des parois vers l'axe du tube vortex, réduisant ainsi la pression statique et la température statique à proximité de l'axe. En outre, la vitesse tangentielle, qui est la composante dominante de l'écoulement, détermine la répartition de l'énergie cinétique. Étant donné que la température totale est calculée à partir de l'enthalpie totale, qui se compose d'enthalpie statique (relativement constante dans la direction radiale, à l'exception près de la paroi) et l'énergie cinétique, le profil de la température totale suit alors le profil de la vitesse tangentielle. Par conséquent, la séparation thermique entre les couches de fluide (interne et externe) est due à une combinaison de la détente radiale du gaz et de la variation de l'énergie cinétique. De ce fait, sous l'effet des contraintes de cisaillement des couches intérieures sur les couches périphériques, la zone axiale possède une énergie cinétique plus faible (l'énergie

cinétique est probablement transférée du vortex central au vortex externe), ce qui diminue l'enthalpie totale au centre et augmente l'enthalpie à proximité des parois (ainsi que la température totale).

On donne sur la Fig.5 les lignes de courant de deux flux différents colorées en fonction de la température totale. La représentation décrit clairement les trajectoires du vortex libre présent à la périphérie du tube ainsi que celles du vortex forcé qui se génère à l'intérieur à partir d'un point d'arrêt (point de stagnation). Donc, une particule fluide peut avoir soit un mouvement descendant vers la sortie chaude (vortex externe) soit un mouvement descendant puis ascendant vers la sortie froide (vortex interne). De plus, la température d'une particule fluide en mouvement à partir de l'entrée du tube vortex jusqu'à la sortie chaude augmente progressivement pour atteindre une valeur de 292,7K. Alors qu'en se déplaçant vers la sortie froide, la température décroît jusqu'à atteindre 268,48K à sa sortie froide. Cette différence de température est alors expliquée par la détente isentropique ainsi que le phénomène de conversion de l'énergie cinétique en énergie thermique sous l'action des contraintes de cisaillement entre les couches de fluides (interne et externe).

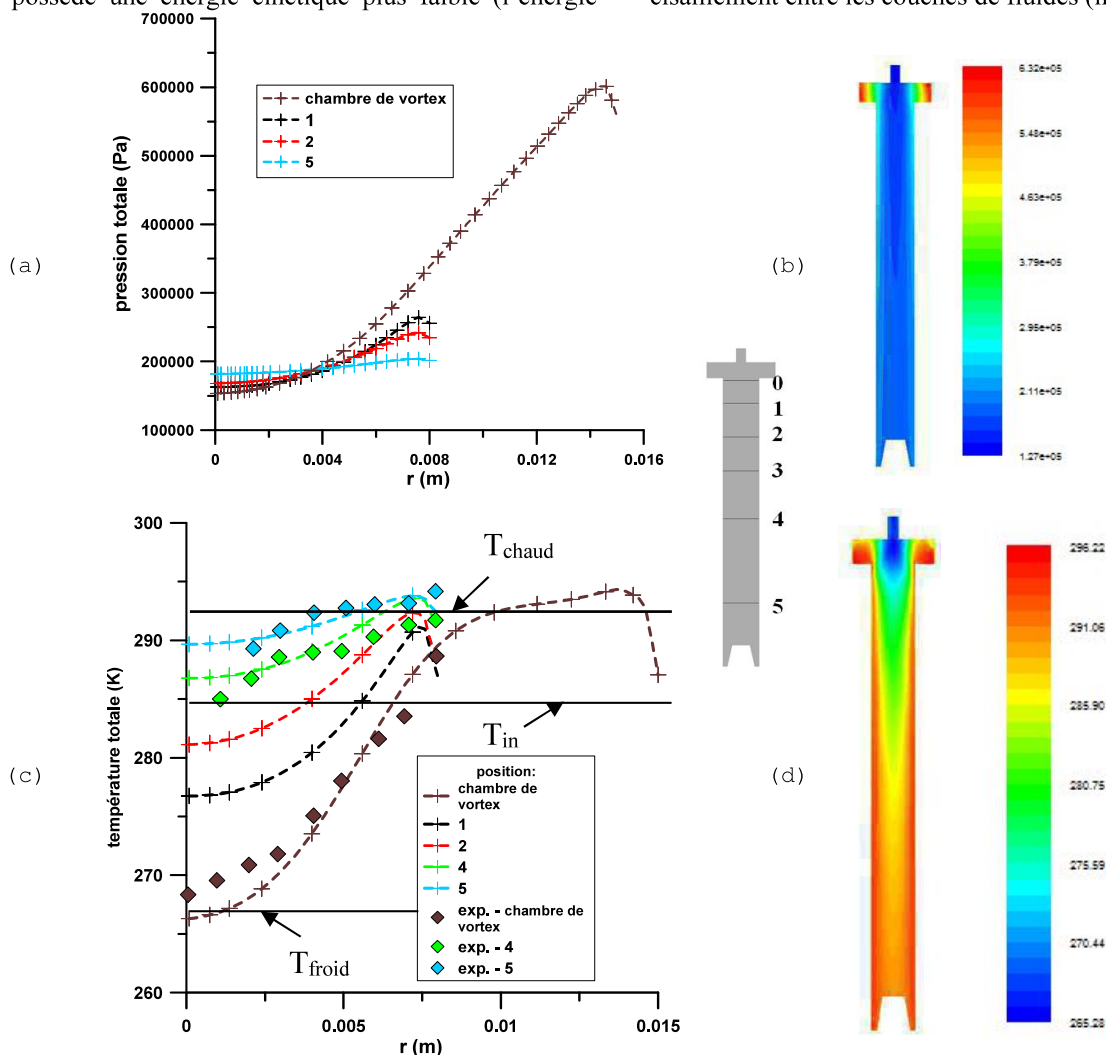


Fig.4 Profils et distributions de : (a) et (b) pression totale, (c) et (d) température totale

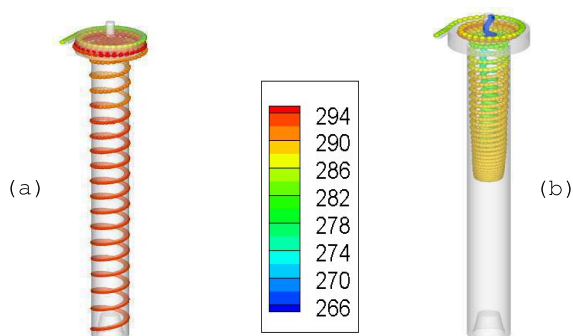


Fig.5 Lignes de courant colorées en fonction de la température totale :
(a) fluide chaud, (b) fluide froid

C. Efficacité Thermique :

Le post-traitement des résultats trouvés permet de calculer l'efficacité de séparation thermique du tube vortex à partir du calcul de ses coefficients de performance (COP) qui diffèrent selon le mode de l'utilisation de l'appareil (pompe à chaleur : COP_h ou machine frigorifique : COP_c).

$$COP_h = \frac{\gamma}{\gamma-1} \mu_h \frac{(T_h - T_{in})}{T_{in} \ln(\tau_p)} \quad COP_c = \frac{\gamma}{\gamma-1} \mu_c \frac{(T_{in} - T_c)}{T_{in} \ln(\tau_p)}$$

A l'aide des conditions opératoires, les coefficients de performance ont été calculés et représentés sur l'histogramme de la Fig.6. On regroupe alors les coefficients de performances trouvés à l'issue des résultats établis par la simulation de CFD ainsi que ceux trouvés expérimentalement [4]. Ces résultats seront aussi comparés à ceux estimés par le modèle d'Ahlborn [10].

La figure montre que les coefficients de performances trouvés par CFD sont en bon accord avec les coefficients de performance trouvés expérimentalement [4]. Le modèle théorique proposé par Ahlborn [10] surestime le COP du tube vortex lorsqu'il est utilisé comme pompe à chaleur.

En effet, le modèle d'Ahlborn est basé sur plusieurs hypothèses qui peuvent influencer les résultats d'une manière dramatique. A titre indicatif, dans ce modèle, la compressibilité du fluide circulant n'est pas toujours prise en considération (à l'entrée de la buse, le fluide est supposé incompressible). Ceci pourrait influencer l'estimation de la pression ainsi que la température à la sortie de la buse et par conséquent dans le reste du tube vortex plus précisément dans la région périphérique (près des parois). En plus Ahlborn et al. n'ont pas décrit le mouvement du vortex externe d'une manière satisfaisante et ils n'ont considéré que le mouvement d'un vortex forcé au centre du tube vortex.

Tout cela pourrait avoir comme résultat, une mauvaise estimation de la température dans la zone près des parois et par conséquent de la température du flux chaud. Ce qui explique la mauvaise estimation du COP_h par le modèle proposé par Ahlborn et al.

V. CONCLUSIONS

L'étude menée nous a permis d'étudier l'écoulement compressible et la séparation de température se produisant

dans les tubes vortex d'une manière satisfaisante. Ceci étant fait en comparant les résultats trouvés aux données expérimentales de la littérature. La séparation thermique dans le tube vortex se fait principalement dans la région proche de la chambre de vortex et généralement jusqu'au point d'arrêt. De plus, la séparation de l'énergie est le résultat des contraintes visqueuses entre les couches fluides en rotation ainsi qu'au processus de détente et de compression des deux flux (vortex libre et vortex forcé).

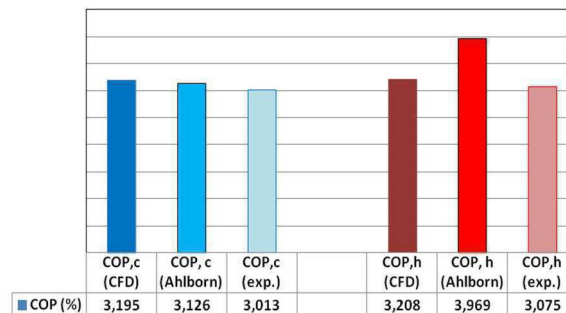


Fig.6 Coefficient de performance de chauffage et de refroidissement

REFERENCES

- [1] M. Attalla, H. Ahmed, M. S. Ahmed, and A. A. El-Wafa, "Experimental investigation for thermal performance of series and parallel Ranque-Hilsch vortex tube systems," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 123, pp. 327-339, 2017.
- [2] C. D. Fulton, "Ranque's tube," *Refrigerating Engineering*, vol. 5, pp. 473-479, 1950.
- [3] T. T. Cockerill, "Thermodynamics and fluid mechanics of a Ranque-Hilsch Vortex Tube," MS. thesis, University of Cambridge, Department of Engineering, England, 1998.
- [4] C. Gao, "Experimental Study on the Ranque-Hilsch Vortex Tube," Ph.D thesis, Eindhoven University of Technology, 2005.
- [5] S. E. Rafiee and M. Rahimi, "Experimental study and three-dimensional (3D) computational fluid dynamics (CFD) analysis on the effect of the convergence ratio, pressure inlet and number of nozzle intake on vortex tube performance-Validation and CFD optimization," *Energy*, vol. 63, pp. 195-204, 2013.
- [6] B. A. Shannak, "Temperature separation and friction losses in vortex tube," *Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung*, vol. 40(10), pp. 779-785, 2004.
- [7] S. Mohammadi and F. Farhadi, "Performance evaluation of a ranque-hilsch vortex tube with optimum geometrical dimensions," *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, vol. 35(1), pp. 95-107, 2016.
- [8] V. Kirmaci, H. Kaya, and I. Cebeci, "An experimental and exergy analysis of a thermal performance of a counter flow ranque-hilsch vortex tube with different nozzle materials," *Int. J. Refrig.*, vol. 85, pp. 240-254, 2018.
- [9] S. Rafiee and M. Sadeghiazad, "Heat and Mass Transfer Between Cold and Hot Vortex Cores inside Ranque-Hilsch Vortex Tube-Optimization of Hot Tube Length," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 34(1), pp. 31-38, 2016.
- [10] B. K. Ahlborn, J. U. Keller, and E. Rebhan, "The Heat Pump in a Vortex Tube," *J. Non-Equilibrium Thermodyn.*, vol. 23(2), pp. 159-165, 1998.
- [11] T. Dutta, K. P. Sinhamahapatra, and S. S. Bandyopdhyay, "Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque-Hilsch vortex tube," *Int. J. Refrig.*, vol. 33(4), pp. 783-792, 2010.
- [12] H. M. Skye, G. F. Nellis, and S. A. Klein, "Comparison of CFD analysis to empirical data in a commercial vortex tube," *Int. J. Refrig.*, vol. 29(1), pp. 71-80, 2006.
- [13] S. E. Rafiee and M. B. M. Sadeghiazad, "Three-dimensional computational prediction of vortex separation phenomenon inside the Ranque-Hilsch vortex tube," *Aviation*, vol. 20(1), pp. 21-31, 2016.

Valorisation de Déchets Plastiques à base de Polyamide par Recyclage

F. Djeddi¹, M. Mohellebi²,

Laboratoire d'Energétique Mécanique et Matériaux – LEMM Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie

¹*fadilamohellebi@yahoo.fr,*

²*mohellebi_mouloud@yahoo.fr,*

I. INTRODUCTION

Les déchets plastiques rejetés dans l'environnement et particulièrement dans les milieux marins est l'un des problèmes majeurs à l'origine de la pollution. Ils constituent une menace sérieuse sur la pérennité des espèces. Des particules de polymères particulièrement nocives se sont retrouvées dans l'organisme humain après consommation de poissons. Le recyclage de ces déchets constitue un moyen non négligeable pour la préservation de l'environnement.

La gestion de ces déchets par mélanges et recyclage de polymères constituent une alternative à la synthèse de nouvelles molécules qui coutent de plus en plus chères par leur caractère énergivore. Le Polyamide (PA 6.6), qui présente de bonnes caractéristiques mécaniques de résistance et de ductilité mais une très faible résilience (fragile) et le Polypropylène Copolymère PPC qui présente de faibles propriétés mécaniques de résistance mais une bonne résilience, sont deux polymères immiscibles et incompatibles.

Les travaux de [1] se sont intéressés à la valorisation des déchets solides plastiques qui comprennent environ 16% en poids de déchets municipaux produits en Australie dont seulement un quart est recyclé. Son étude a porté sur la caractérisation mécanique de ces déchets qui comprennent du PEHD, du PEBH et du PP. [2] s'est intéressé au recyclage des déchets non ferreux à partir de circuits imprimés (PCB : Printed Circuit Boards) en les utilisant comme charge de renfort à une matrice en Polypropylène. Il a mené des tests mécaniques de résistance à la température et de concentration en produit toxiques tel que le plomb. L'étude engagée par [3] concerne la transition ductile-fragile des mélanges de polymères issus de déchets de véhicules hors d'usage. Ces mélanges sont incompatibles à base de polypropylène et d'une faible quantité de polyamide considérée comme impurété.

L'objectif de cette étude consiste à élaborer par injection sans compatibilisant ni additif et caractériser des mélanges de polymères (PA6.6)/PPC. Ainsi nous avons mélangé et injecté ces polymères aux taux de 100% PP, [20%(PA6.6)/80%PPC], [40%(PA6.6)/60%PPC], [50%(PA6.6)/50%PPC], [60%(PA6.6)/40%PPC], [80%(PA6.6)/20%PPC] et 100% (PA6.6). En plus de l'étude de l'influence de l'ajout du (PA6.6) dans la matrice PP, nous avons étudié l'effet du recyclage sur ces mélanges en les faisant vieillir par leur exposition à des conditions atmosphériques sévères (gradient de température et UV) puis les broyant et les réinjectant.

II. MATERIEL ET MODE OPERATOIRE

Le Polypropylène homopolymère PPH et le polyamide PA6.6 sont utilisés à l'état granuleux et le mélangeage se fait à l'aide d'un mélangeur électrique. Pour la caractérisation physique, nous avons utilisé un Plastomètre de norme : EN/ISO1133-2 2011 pour déterminer les indices de fluidité ainsi qu'un électrothermal (Fusiomètre) pour déterminer les températures de fusion des deux polymères vierges. Pour la caractérisation mécanique nous avons utilisé une machine de traction pour déterminer les relations contraintes-déformations ainsi que les modules d'élasticité. Les essais ont été effectués selon la norme **DIN 5350** sur des éprouvettes plates de dimension (120x7x3) mm avec une vitesse de 10mm/min.

Pour les essais de résilience nous avons utilisé les moutons-pendule conformément à la norme **DIN 51222**. Pour le recyclage, nous avons fait vieillir les échantillons en les exposants à des conditions atmosphériques sévères (températures et UV) puis broyer et réinjecter pour élaborer d'autres éprouvettes. Enfin, plusieurs mélanges ont été réalisés et étudiés.

III. . RESULTATS ET DISCUSSIONS

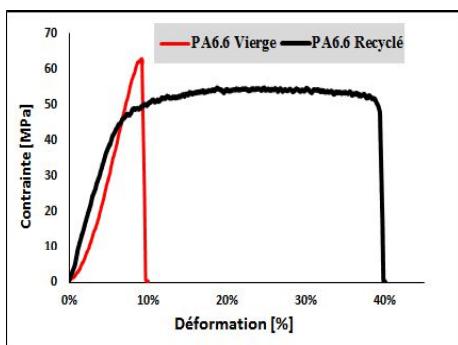


Fig. 1: Courbe contrainte déformation du PA6.6

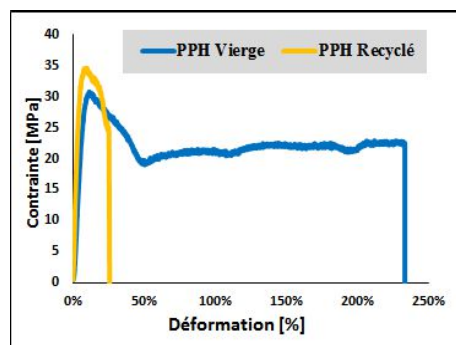


Fig. 2: Courbe contrainte déformation du PPH

La figure 1 montre que le polyamide PA6.6 a de bonnes caractéristiques mécaniques de résistance avec un faible allongement à la rupture. Son recyclage engendre une amélioration de la ductilité de l'ordre de 233% avec une diminution de la contrainte maximale de 11%. La figure 2 montre que le polypropylène a un très grand allongement à la rupture et une faible contrainte maximale par rapport au PA66. Son recyclage engendre une diminution importante de la ductilité avec une amélioration de la contrainte maximale.

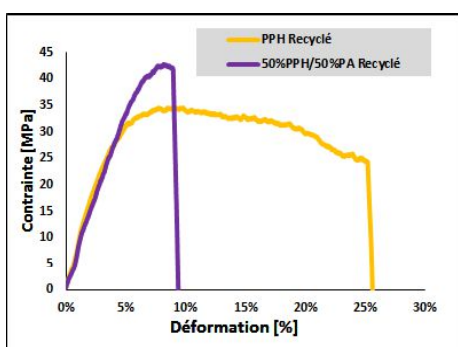


Fig. 3: Courbe contrainte déformation PPH recyclé et du mélange 50%PPH/50%PA6 recyclé

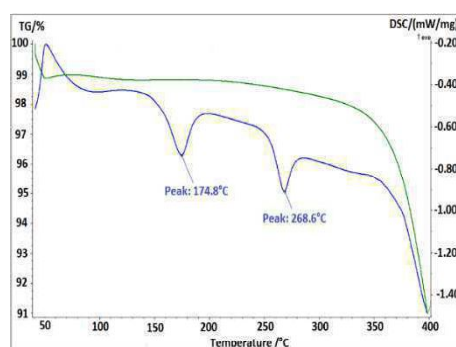


Fig. 4: Analyse par DSC du mélange 50%PPH/50%PA66 recyclé

La figure 3 montre que l'ajout de 50% de PA66 à la matrice PPC engendre une augmentation de 27% de contrainte maximale et une diminution de l'allongement à la rupture par rapport au PPH recyclé. La figure 4 représente les résultats de l'analyse par DSC du mélange 50%PPH/50%PA6.6 où on constate l'existence de deux pic correspondant aux températures de fusion de chacun des polymères, ce qui montre l'immiscibilité des deux polymères

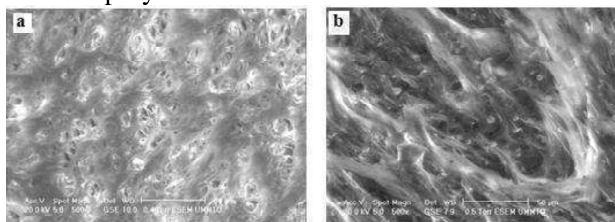


Fig. 4 : Observation au MEB des faciès de rupture du polymère 100%PA vierge et recyclé

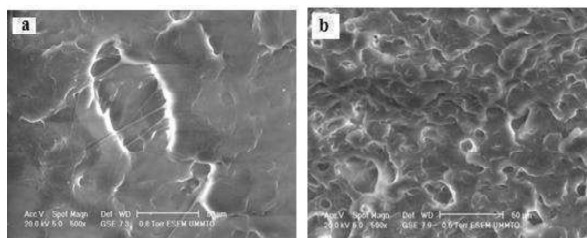


Fig. 12 : Observation au MEB des faciès de rupture du polymère 100%PP vierge et recyclé

L'observation au MEB des faciès de rupture a révélé le caractère fragile des polymères recyclés. La figure 4 montre bien le caractère ductile du PA6.6 vierge et recyclé et la figure 5 montre le caractère ductile du PP vierge et le caractère fragile du PP recyclé

Références

- [1] Rohan Muni Bajracharya , Allan C. Manalo , Warna Karunasena , Kin-tak Lau, *Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes: Coupon and full-scale investigation*. Waste Management 48 (2016) 72–80
- [2] Yanhong Zheng, Zhigang Shen, Chujiang Cai, Shulin Ma, Yushan Xing, The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropylene composites, *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 600–606
- [3] V. Sabin-Chiarilli, J. Pabiot, Transition ductile-fragile des mélanges incompatibles à faibles concentrations à base de polypropylène recyclé, *European Polymer Journal* 36 (2000) 1387-1399

La figure 3 montre que l’allongement à la rupture augmente de manière abrupte à partir de 40% de PPH dans la matrice PPC et le recuit affecte de manière significative la ductilité des mélanges à matrice PPC. Pour la résilience (fig. 4) elle diminue avec le taux de PPH dans la matrice PPC où on remarque que la PPC est trois fois plus résilient que le PPH. On constate aussi la diminution de cette résilience pour tous les mélanges sous l’effet du recuit.

TABLEAU 1 : Concentration des mélanges élaborés

Polymères	Mélanges (concentration en %)						
	1	2	3	4	5	6	7
PA6.6	100	20	40	50	60	80	100
PPC	0	80	60	50	40	20	0

A. Elaboration des éprouvettes

Des éprouvettes normalisées de traction, de résilience sont réalisées par injection. Les paramètres de la machine d’injection sont résumés dans le tableau 2.

a) Eprouvettes de traction

La géométrie et les dimensions des éprouvettes de traction (Schéma1) réalisées sont conformes à la norme **NF EN ISO 527-2**. La vitesse de traction est fixée à 10mm/mn.

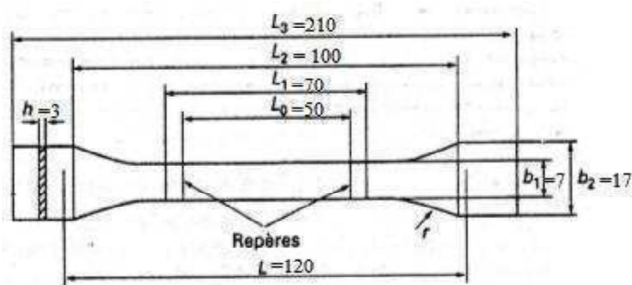


Schéma 1 Géométrie des éprouvettes de traction conforme à la norme **NF EN ISO 527-2**

b) Eprouvettes de résilience

Dans le cas des éprouvettes de résilience (entaille en V) pour essai Charpy (Schéma 2) leur géométrie et leurs dimensions sont conformes à la norme **NE 3.03.070** selon la Méthode **3A**. Nous avons utilisé un mouton pendule **ZWICK 5102** conforme à la norme **DIN 51222**

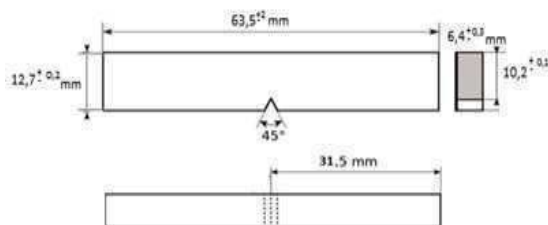


Schéma 2 Géométrie des éprouvettes de résilience

B. Caractérisation physique

• Température de fusion

L’analyse thermique différentielle (DSC) permet de déterminer la température de fusion de chacun des deux

polymères. Elle permet aussi de mettre en évidence la miscibilité ou l’immiscibilité des mélanges

• Indices de fluidité

L’indice de fluidité des échantillons est déterminé en utilisant un plastomètre selon la norme EN/ISO1133-2.2011. La température de fusion de chacun des polymères est fixée supérieure à celle donnée par la DSC pour s’assurer de la fusion totale des échantillons.

La masse de la charge appliquée sur le piston est de 2,16 kg. L’indice de fluidité est calculé suivant la formule :

$$I.F = \frac{s \cdot m}{t} [g/10min](1)$$

s : Temps de référence en seconde (s = 600 s).

m : Masse moyenne des extrudats obtenue en (grammes).

t : Intervalle de temps (s) entre deux coupes d’un extrudat

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Caractérisation physique

• Température de fusion

L’analyse thermique différentielle (DSC) du PPC (Fig. 1) a révélé une température de fusion égale à $T_f(PPC)=270,3^{\circ}C$

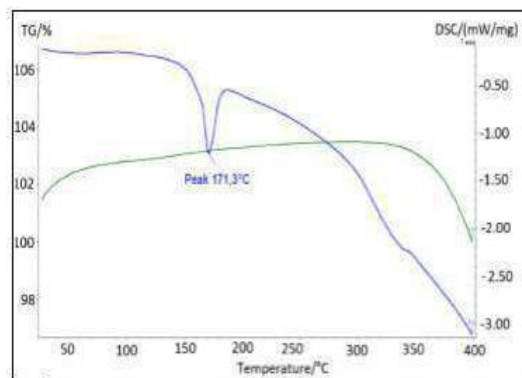


Fig. 1 : Analyse thermique différentielle (DSC) du PPC

L’analyse thermique différentielle (DSC) du PPA-6.6 (Fig. 2) a révélé une température de fusion égale à $T_f(PPA6.6)=270,3^{\circ}C$

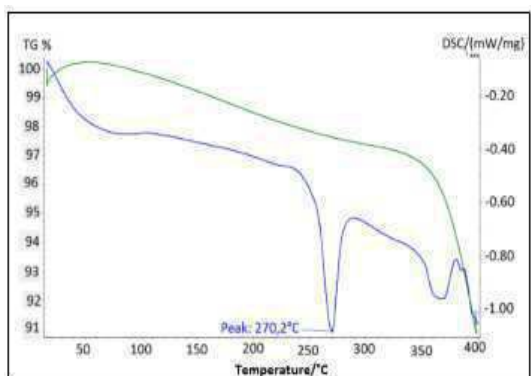


Fig. 2 : Analyse thermique différentielle (DSC) du PPA 6.6

L'analyse thermique différentielle (DSC) du mélange [50%PPC/50%PA6.6] révèle l'immiscibilité des deux polymères PPC et PA/66. En effet la figure 3 donne un spectre qui possède deux pics, le premier pic correspond à la température de fusion du PPC qui est au voisinage de 170°C et le second pic correspond à la température de fusion du PA6.6 et qui est de l'ordre de 270°C. Ceci montre qu'il n'y a pas eu de liaison chimique entre les deux éléments du mélange et que les liaisons se sont effectuées macroscopiquement.

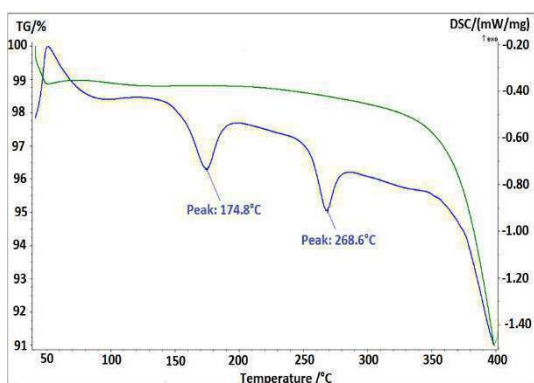


Fig. 3 : Analyse thermique différentielle (DSC) du 50%PPC/50%PA6.6

• *Indice de fluidité*

Pour le plastomètre nous avons réglé la température de fusion pour chacun des deux polymères supérieure à celles obtenues par DSC pour s'assurer de la fusion totale des échantillons et que nous avons fixée à:

$$T_f(\text{PPC})=200^{\circ}\text{C}$$

$$T_f(\text{PPA6.6})=300^{\circ}\text{C}$$

Et nous avons obtenu les indices de fluidité pour chacun des polymères suivants :

$$\text{Pour le PPC IF}(T.M)=15\text{g}/10\text{min}$$

$$\text{Pour le PA6-6 IF}(T.M)=7,2\text{g}/10\text{min}$$

B. Caractérisation et propriétés mécaniques

1) Courbes contrainte-déformation

La figure 4 montre que le polymère 100% PA devient très ductile lors du premier recyclage, il gagne environ 300% en allongement à la rupture. Lors du second recyclage il gagne

14% en module d'élasticité et 35% en allongement à la rupture.

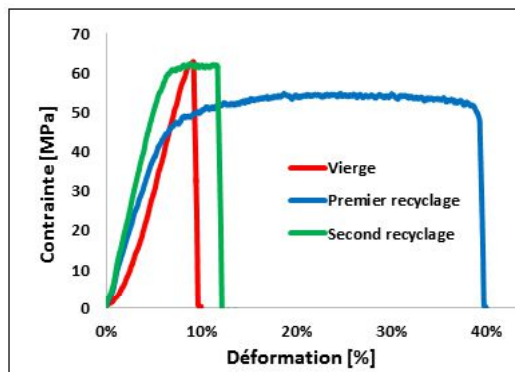


Fig. 4 : Relation Contrainte-Déformation du polymère 100% PA6-6

Dans la figure 5 on observe que le copolymère PPC est très ductile et que le recyclage améliore les caractéristiques de résistance mécanique au détriment de l'allongement à la rupture.

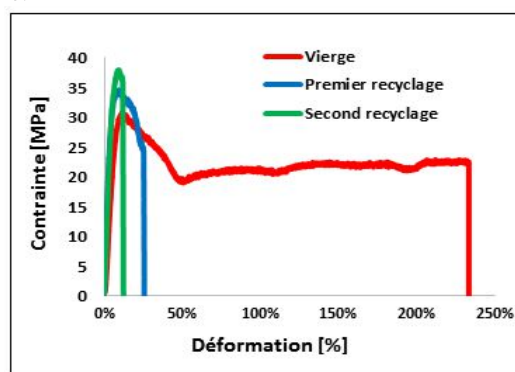


Fig. 5: Relation Contrainte-Déformation du polymère 100% PPC

Concernant le mélange 50%PPC/50%PA, on constate sur la figure 6 une nette amélioration de la contrainte au seuil d'écoulement et de l'allongement à la rupture lors du premier recyclage. Le second recyclage altère cet allongement à la rupture.

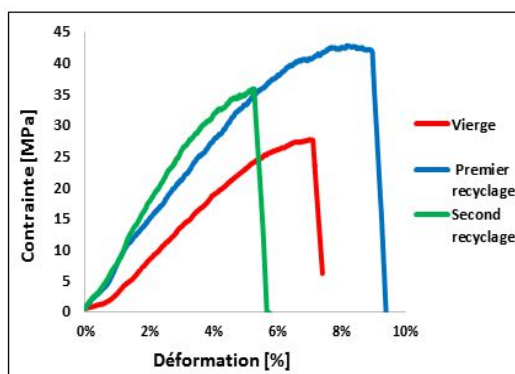


Fig. 6: Relation Contrainte-Déformation du polymère 50% PPC/50%PA6.6

2) Modules d'élasticité

La figure 7 montre que le module d'élasticité des mélanges augmente lors du premier recyclage et de manière plus prononcée lors du second recyclage.

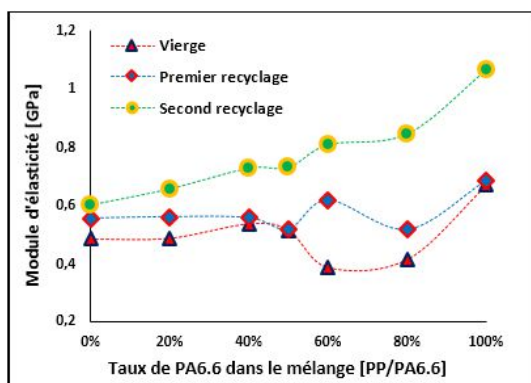


Fig 7 : Variation du module d'élasticité des mélanges vierge et recyclé en fonction du taux de PA6-6 dans la matrice PP

3) Allongement à la rupture

La figure 8 montre que l'allongement à la rupture diminue avec le recyclage pour le polypropylène PPC, par contre il augmente pour le polyamide PA6.6.

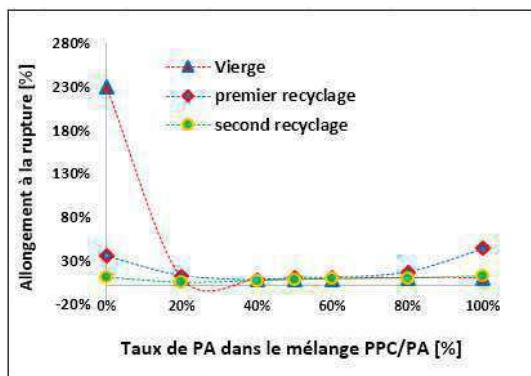


Fig.8 : Variation de l'allongement à la rupture des mélanges vierges et recyclés en fonction du taux de PA dans la matrice PP

4) Contrainte limite au seuil d'écoulement

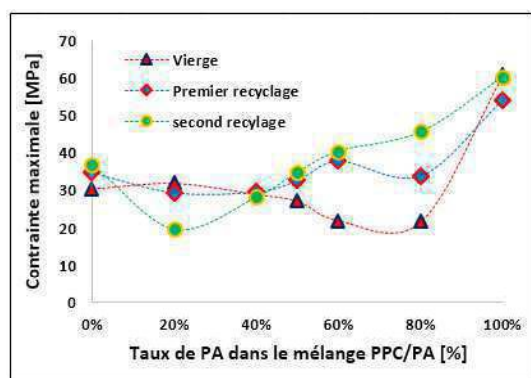


Fig.9 : Variation de la contrainte au seuil d'écoulement des mélanges vierge et recyclés en fonction du taux de PA6.6 dans le mélange PPC/PA6.6

La figure 9 montre que la contrainte au seuil d'écoulement des mélanges augmente lors du premier et du second recyclage sauf pour le mélange 20%PA/80%PPC où il ne perd que 11% de sa valeur par rapport au vierge.

5) La résilience

La résistance aux chocs donnée par la figure 10 montre que pour le PPC, la résilience diminue lors du premier recyclage puis augmente lors du second. Concernant le PA6.6 il chocs gagne environ 750% lors du premier recyclage et 450% lors du second. Pour les mélanges cette résilience diminue lors du premier et du second recyclage.

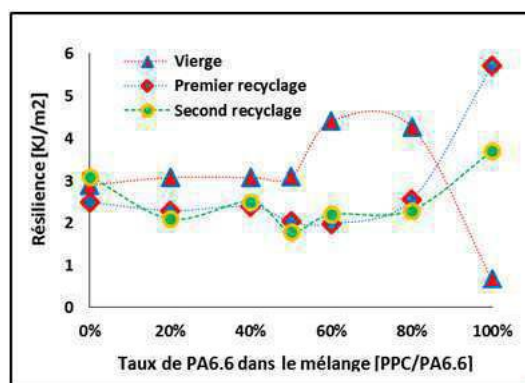


Fig. 10: Variation de la résilience des mélanges vierge et recyclés en fonction du taux de PA dans la matrice PP

C. Caractérisation morphologique

L'analyse des faciès de rupture au Microscope Electronique à Balayage (MEB) du polymère 100%PA6.6 illustre le caractère fragile de la rupture pour le vierge (fig.11.a). Par contre pour le PA recyclé la matière s'est allongée avant rupture, ce qui explique le gain en ductilité du PA recyclé qu'on observe sur la figure.11.b.

Ce qui est en concordance entre la structure de l'échantillon microscopique et son comportement mécanique à l'échelle macroscopique lors de l'essai de traction.

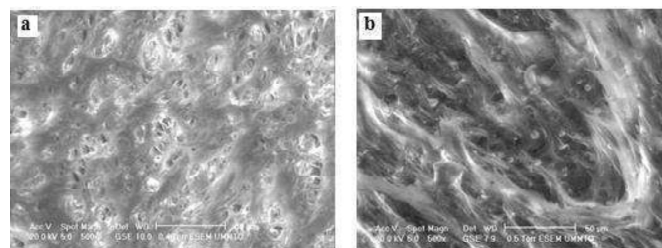


Fig. 11 : Observation au MEB des faciès de rupture du polymère 100%PA vierge et recyclé

Concernant le polymère 100%PPC vierge le faciès de rupture présente des filaments, caractéristiques d'une rupture ductile (fig. 12.a). Concernant le recyclé, le faciès de rupture présente un caractère très fragile. Ce qui est toujours en concordance avec les résultats de l'essai de traction.

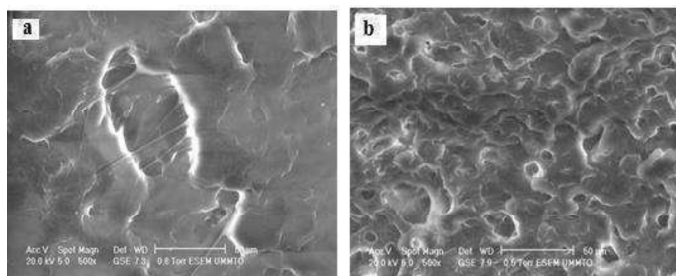


Fig. 12 : Observation au MEB des faciès de rupture du polymère 100%PP vierge et

V. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons procédé à la caractérisation de mélanges de deux polymères thermoplastiques incompatibles et immiscibles, le Polyamide PA/6.6 et Polypropylène Copolymère PPC. Ces mélanges sont élaborés sans additifs ni compatibilisant par procédé d'injection après mélangeage à froid dans un mélangeur électrique puis à chaud par extrusion.

La caractérisation physico-chimique a permis d'établir les indices de fluidité des polymères de base et l'analyse par DSC a permis de déterminer les températures de fusion de chacun des polymères et de confirmer leur immiscibilité. La caractérisation mécanique obtenue à partir des essais de traction a mis en évidence les effets de ce multirecyclage sur les propriétés mécaniques des produits obtenus et a montré que le module d'élasticité des mélanges augmente lors du premier recyclage et de manière plus prononcée lors du second recyclage au détriment de la résilience. La contrainte au seuil d'écoulement augmente aussi pour les mélanges à matrice PPC. L'analyse des faciès de rupture par traction a révélé le caractère ductile de la rupture du PPC vierge et le caractère fragile de son recyclé. Elle a aussi révélé le gain en ductilité du PA6.6 recyclé

REFERENCES

- [4] Rohan Muni Bajracharya , Allan C. Manalo , Warnakarunasena , Kin-tak Lau, *Characterisation of recycled mixed plastic solid wastes: Coupon and full-scale investigation*. Waste Management 48 (2016) 72–80
- [5] YanhongZheng, ZhigangShen, ChujiangCai, Shulin Ma, Yushan Xing, The reuse of nonmetals recycled from waste printed circuit boards as reinforcing fillers in the polypropylene composites, *Journal of Hazardous Materials* 163 (2009) 600–606
- [6] V. Sabin-Chiarilli, J. Pabiot, Transition ductile-fragile des mélanges incompatibles à faibles concentrations à base de polypropylène recyclé, *European Polymer Journal* 36 (2000) 1387-1399

Résumé — Cette étude a pour objectif la gestion par recyclage de déchets d'éléments divers en matériaux polymériques issus de l'industrie et qui est l'un des enjeux majeurs pour la préservation de l'environnement. Elle porte sur la caractérisation de mélanges de deux polymères incompatibles et immiscibles, le polyamide PA6.6 et le polypropylène copolymère PPC à l'état vierge puis à l'évolution de leurs caractéristiques mécaniques et morphologiques après un premier et un second recyclage.

L'élaboration des échantillons est réalisée sans compatibilisant ni additifs par injection après mélangeage à froid dans un mélangeur électrique puis à chaud par extrusion.

La caractérisation des échantillons a montré l'incompatibilité et l'immiscibilité ainsi que la complémentarité des propriétés mécaniques du Polyamide PA6.6 et du Polypropylène copolymère PPC. Elle a aussi montré que le PPC voit son module d'élasticité et sa contrainte au seuil d'écoulement augmentées lors du premier recyclage et encore plus lors du second, au détriment de sa résilience et de son allongement à la rupture. Pour le PA, le premier recyclage améliore la rigidité et de manière plus prononcée l'allongement à la rupture, le second recyclage engendre une augmentation importante de la rigidité toujours au détriment de la résilience. Concernant les mélanges à matrice PA le recyclage améliore considérablement la rigidité ainsi que la contrainte maximale.

Mots clé -Caractéristiques mécaniques, Immiscibles, Injection, Mélanges, Polyamide, Polypropylène, Recyclage

Traitement des eaux de rejet de l'industrie du textile par couplage de procédés d'adsorption et de la photocatalyse

Djilali Tassalita, Khadidja Ganibardia,c, Nadia Chekirb, Ouassila Benhabilesa, Nachida Kasbadji Merzouka, , Rachid Issaad

a Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES/Centre de Développement des Energies Renouvelables,

Email: tassalit2003@gmail.com

CDER, Bou-Ismaïl, 42415, W. Tipaza, Algeria

b Département de Génie des Procédés, Laboratoire des phénomènes de transfert, USTHB, BP32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111 Alger, Algeria

c Université Saad Dahlab Blida, USDB, Faculté de Génie des Procédés, BP 270, Blida, Algeria

Abstract

L'élimination des colorants des effluents aqueux de l'industrie textile est un véritable défi dans le traitement des eaux usées. Généralement, la photocatalyse et l'adsorption sont utilisées pour atteindre cet objectif. L'objectif de cette étude est l'élimination d'un colorant de l'industrie textile par photocatalyse en présence du rayonnement solaire d'une et la combinaison charbon actif/ZnO. L'influence de certains paramètres tels que la concentration du catalyseur et la quantité de charbon actif utilisée, la concentration initiale en polluant, pH et la vitesse d'agitation ont été étudiés. Deux types de support ont été utilisés, le gravier pour la fixation de l'oxyde de zinc (ZnO) et une plaque en aluminium pour fixer le catalyseur supporté sur le charbon actif dans un montage à l'échelle pilote en utilisant le rayonnement solaire comme source d'irradiation. Les deux supports ont montré leur efficacité pour dégrader ce type de polluants.

Keywords— Photocatalyse, lit fixe, colorants, ZnO.

1. I. INTRODUCTION

Nous vivons dans un monde où tout est coloré, nos vêtements, nos aliments nos produits cosmétiques, pharmaceutiques, etc. Ces colorants sont de plus en plus des colorants de synthèse, en raison de leur facilité et rapidité de production et de leur grande variété de couleurs si on les compare aux colorants naturels [1]. Les vêtements que nous portons sont fabriqués à partir de fibres textiles colorées à l'aide de différentes teintures qui sont autre que des molécules chimiques leur donnant leur couleur définitive. Nous sommes loin d'imaginer que la fabrication de ces mêmes vêtements engendre une pollution de plus en plus importante et dangereuse pour l'être humain causant de graves perturbations environnementales et des dommages à la santé [1].

Il existe plusieurs méthodes physiques, chimiques et biologiques pour traiter et décolorer des effluents pollués. Parmi ces méthodes on citera la coagulation et la floculation, la biodégradation, la filtration membranaire, l'oxydation chimique, l'ozonation, l'échange d'ions, les méthodes électrochimiques et l'adsorption [2]. Les traitements conventionnels (procédés membranaires, coagulation-floculation, oxydation chimique, etc.) ont l'inconvénient de transférer la pollution d'une phase aqueuse vers une nouvelle phase aqueuse et conduisent pour la plupart à la formation de boues concentrées, créant ainsi un problème de déchets secondaires ou à une régénération des matériaux souvent très coûteuse. On se limitera dans ce qui suit au développement des techniques d'adsorption et d'oxydation chimique par photocatalyse [2].

Les procédés de destruction des polluants organiques en solution aqueuse par photocatalyse solaire ont reçu ces dernières années beaucoup d'attention dans le cadre de la purification de l'eau en tant que procédé d'élimination de micropolluants organiques (solvants, pesticides, organochlorés,...). Les différents réacteurs solaires ont été classés suivant le niveau de concentration des photons obtenus à l'intérieur [3].

Le réacteur à lit fixe à couche mince est l'un des photo-réactifs solaires les plus utilisés qui a reçu un intérêt croissant en tant qu'application commerciale appropriée. Des expériences ont été réalisées pour optimiser divers paramètres influençant les performances des réacteurs à lit fixe à couche mince. Les résultats ont montrés une dépendance cinétique sur le débit, le chargement du catalyseur et la concentration initiale de colorant [4]

Différentes configurations de réacteurs photocatalytiques dédiés au traitement des eaux usées ont été testées dans la littérature. En ce qui suit je vais présenter quelques réacteurs qui ont été développés au niveau de l'unité de développement des équipements solaires UDES et utilisés pour le traitement de l'eau en présence des catalyseurs en suspension ou à lit fixe. Les figures suivantes représentent les différents photoréacteurs réalisés au niveau de l'UDES [3].

Afin d'assurer le traitement des eaux polluées par photocatalyse, un prototype de photoréacteur tubulaire figure 1 dimensionné pour le traitement de 30 litres d'eau polluées en circuit fermé a été réalisé au sein des ateliers de l'Unité de Développement des Equipements Solaires UDES. Ce dispositif a été conçu pour fonctionner à l'énergie solaire, ce qui lui assure son autonomie énergétique [3].



Fig.1. Photoreacteurs développés à l'UDES EPST CDER.

En 2009, zayani et al. [5]. ont réalisé des expériences photocatalytiques dans des conditions similaires. L'étude a montré les performances des pilotes solaires photocatalytiques équipés d'un réacteur à lit mince à couche fixe pour l'enlèvement de l'azocolorant choisi comme composé modèle. Les résultats montrent qu'il y a une quantité optimale de TiO_2 (10 g/m²), de débit (3 m³/h) ainsi qu'une valeur initiale de COT (30 mg/L) pour laquelle le processus est le plus efficace. Il convient également de noter que la décoloration simple de la solution de teinture pourrait être suffisamment pertinente pour le recyclage des eaux usées traitées, mais la conversion du carbone organique total (COT) en carbone inorganique est importante pour une application pratique étendue. En 2012, L.Bouna [6] a étudié la fonctionnalisation par TiO_2 d'une argile marocaine et l'évaluation de son activité photocatalytique pour l'élimination d'un colorant anionique l'orange G (OG), utilisé dans l'industrie textile. L'échantillon calciné à 600°C, dans lequel le TiO_2 est sous forme d'anatase, manifeste une activité photocatalytique remarquable vis-à-vis de l'élimination de l'OG en milieu aqueux. En 2018, Lucian Alexandru Cobstantin et al. [7] ont étudié l'élimination de Triclosan TCS qui est un agent antimicrobien utilisé pour les produits de soins personnels qui ne peuvent pas être éliminés par des procédés classiques. Les résultats trouvés montrent que l'appareil de photocatalyse hétérogène dans des conditions de travail

adéquate, représente une solution de rechange respectueuse de l'environnement pour le traitement des eaux usées avec contenu TCS, assurant la conversion des polluants cibles et sous-produits à des composés non toxiques tel que les acides carboxyliques et HCl.

En 2005, H.K.Shon et al. [7] ont étudié les effets du couplage de l'adsorption avec la photocatalyse dans le traitement des polluants organiques persistants dans les eaux usées. La photocatalyse seule a montré une réaction inverse initiale lorsque le TiO_2 a été utilisé dans la catalyse. Ils ont étudié l'effet du prétraitement de l'adsorption avec du charbon actif en poudre (PAC) sur la photocatalyse. Les résultats ont montré que lorsque PAC et TiO_2 ont été ajoutés simultanément, la réaction inverse a été éliminée. De plus, l'enlèvement organique a également été amélioré par des ajouts simultanés de PAC et de TiO_2 . En 2015, Maria Visa [7] propose un processus en une seule étape combinant la photocatalyse et l'adsorption. Un nouveau composite à base d'oxyde de tungstène et de cendres volantes a été synthétisé pour être utilisé comme substrat dans le traitement avancé des eaux usées avec une charge complexe résultant de l'industrie de textile. La capacité d'adsorption et les propriétés photocatalytiques du matériau testés sur des polluants contenant deux colorants. Les résultats indiquent une meilleure efficacité d'élimination en utilisant le nouveau matériau composite dans l'adsorption combinée et la photocatalyse par rapport aux processus séparés. En 2016, Alberto Sandoval et al. [8] ont étudié l'abattement du colorant commercial bleu de méthylène (MB) des solutions aqueuses sous irradiation UV en présence de nanotubes de titane avec différents teneurs en sodium. Les tests de décoloration ont montré que la capacité d'adsorption des nanotubes de titane était liée à leur teneur en sodium, les nanotubes titane ayant la teneur en sodium la plus élevée, présentant la plus haute capacité d'adsorption pour MB. En 2014, S.Chaabane [9] a étudié l'élimination d'acide benzoïque qui est un micropolluant récalcitrant par couplage adsorption/photocatalyse sur un film CA/TiO_2 . Cette étude a permis de tirer un certain nombre de renseignements ; une forte diminution de concentration de l'acide benzoïque en présence de la lumière et la vitesse de dégradation du polluant est plus au moins stable malgré l'augmentation de la concentration de polluant en solution.

Dans ce chapitre, nous présentons le matériel, le montage et les protocoles expérimentaux utilisés pour tester l'efficacité des procédés utilisés pour l'élimination de colorant bleu turquoise plus connu sous le nom de «TUBATIN». C'est un colorant synthétique de nature azoïque très utilisé dans l'industrie textile et particulièrement dans la fabrication de vêtements. La photocatalyse est mise en œuvre comme un procédé unique en utilisant l'énergie solaire, une source d'énergie direct et indirect, ou bien en couplé avec le procédé d'adsorption.

On étudiera en particulier les paramètres expérimentaux influençant la cinétique de dégradation du polluant parmi lesquels on citera : la concentration du polluant; le pH de la solution, le débit

d'alimentation, la masse de catalyseur utilisé et l'intensité du rayonnement solaire. Cette étude est faite dans un réacteur discontinu en batch.

Dans une deuxième étape, des essais en continu sont réalisés sur un pilote expérimental se trouvant au niveau de l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) de Bou-Ismaïl sous les conditions opératoires prédéfinies dans la partie de l'étude paramétrique avec un réacteur en batch.

2. II. MATERIEL ET METHODES

Les manipulations en batch sont menées suivant les étapes ci-dessous :

Préparer les solutions de tubatin avec les concentrations désirées : Des quantités de tubatin en poudre sont pesées et diluées avec l'eau distillée, dans une fiole jaugée, de volume relatif à la concentration désirée. Cette préparation est suivie d'une homogénéisation, sur une plaque à agitation magnétique, tout en évitant le contact avec la lumière du jour.

Ajuster le pH à la valeur voulue en utilisant des solutions de HCl ou NaOH 0,1N dans le cas des essais sur l'effet du pH. Pour cela, un multi-paramètre type Consort C3010 équipé d'une électrode combinée de marque WTW (pH électrode 41 STORE IN 3Moles/L) est utilisé.

Introduire une masse donnée de catalyseur ou bien de charbon actif dans la solution,

Allumer la lampe U.V et exposer la solution aux radiations UV,

Prélever des échantillons d'un volume de 3 ml à des intervalles de temps réguliers,

Centrifuger l'échantillon prélevé pour la séparation de phase entre solide et liquide (solution avec catalyseur ou bien avec charbon actif)

Analyser le filtrat par spectrophotomètre UV/visible.

La figure 2 permet d'apprécier la dégradation temporelle du colorant au cours de la photodégradation.



Fig.2. Décoloration temporelle du colorant au cours de la photodégradation.

1. 2.1. Pilote expérimental

Le pilote expérimental de photocatalyse est composé d'un photoréacteur ayant une forme de parallépipède rectangulaire inclinée fabriqué en plexiglass, d'une longueur de 500 mm, une largeur de 400 mm et une hauteur égale à 100 mm. Le photocatalyseur ZnO est fixé par imprégnation sur du gravier et installé sur la surface de réacteur exposé directement au rayonnement solaire.

Pour l'étude du couplage adsorption/photocatalyse, le catalyseur utilisé est ZnO supporté sur charbon actif.

Ce catalyseur est disposé en fine couche sur une plaque en aluminium de même dimension que la surface interne de ce réacteur.

Le volume d'eau à traiter à une concentration donnée de colorant se trouve dans un réservoir en verre de 2 litres. La solution progresse de celle-ci vers le réacteur via une pompe péristaltique dont le débit de recirculation est modulable. Le réacteur est alimenté par un système photovoltaïque avec stockage d'énergie. Des prises d'échantillons d'un volume de 3 mL sont prélevées à des intervalles de temps réguliers pour analyse par spectrophotométrie UV-Visible.



Fig.3.Schéma de l'installation expérimentale utilisée.

2. 2.2. Matériaux utilisés

• Charbon actif

Le charbon actif utilisé est un charbon actif commercial qui a été utilisé par une équipe de chercheur [31], dont les caractéristiques physico-chimiques sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du charbon actif utilisé.

Caractéristiques physico-chimiques	Charbon actif
Taille de particule (mm)	0,42-0,84
Surface spécifique (B.E.T) (m ² /g)	1050
Cendre (%)	15
Eau (%)	3

• Oxydes de métaux

Deux types d'oxydes métalliques sont utilisés comme photocatalyseurs :

- L'oxyde de zinc (ZnO) (produit Sigma Aldrich Chemical Company, SZBF2430V)
- Le dioxyde de titane (TiO₂) (produit Biochemchemopharma B 13463-67-7-0612-011)

Les caractéristiques de ces deux catalyseurs sont données par le tableau 2 qui suit :

Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques des deux catalyseurs utilisés.

Caractéristiques physico-chimiques	Oxyde de zinc	Dioxyde de titane
Formule chimique	ZnO	TiO ₂
Masse molaire (g/mol)	81,40	79.89
Etat physique	Poudre blanche	Poudre blanche
Masse volumique (g/cm ³)	5,61	3,8
Surface spécifique (m ² /g)	9	50

• **Fixation de ZnO sur gravier**

10 g de catalyseur ZnO sont mélangés avec 45 ml d'éthanol et agités pendant 2h. Cette solution est ensuite pulvérisée sur la surface du gravier. L'ensemble est ensuite calciné à une température de 500 °C pendant 3h. Le gravier est déposé, après refroidissement, sur la surface active de photoréacteur.

• **Fixation de ZnO/ charbon actif sur la plaque**

Sur une plaque en aluminium nous avons disposé en couche fine une quantité, du catalyseur ZnO supporté sur charbon actif. Cette couche est fixée à l'aide de silicone pré-étalé sur la plaque d'aluminium.

• **Méthodes d'analyse**

Le flux solaire est mesuré à des intervalles de temps de 5 minutes, entre 9 heures et 15 heures, en utilisant un *pyranomètre* couplé à un logiciel (KIPP & ZONZN, CMP11) monté sur une inclinaison de 36°.

Dans le cas des essais effectués en batch, des lampes UV de 24 W (marque Philips) ont été utilisées

Pendant un test de photodégradation, des échantillons d'eau polluée par le colorant sont prélevés à des intervalles de temps réguliers. Ces échantillons sont analysés par spectrophotomètre UV-Visible à double faisceau de marque Shimadzu UV1800 couplé à un logiciel d'acquisition des résultats UV PROB

L'évolution de la concentration du polluant en fonction du temps, est donnée par la mesure de l'absorbance à une longueur d'onde de 617 nm correspondant à l'absorbance maximale du colorant (figure 4).

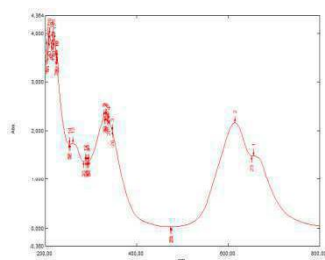


Fig.4. Spectre d'adsorption de la lumière du colorant.

Une courbe d'étalonnage est établie en traçant les valeurs d'absorbances en fonction de la concentration du colorant en milieu aqueux allant de

2,5 à 50 mg/L. Cette courbe d'étalonnage est présentée dans l'annexe N°01.

3. 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

4. 3.1. Combinaison adsorption/photocatalyse

Dans cette partie nous avons utilisé une combinaison entre le charbon actif et le semi-conducteur (ZnO) en batch, suivant différents rapports massiques dans le but d'augmenter le taux de dégradation et la vitesse de la cinétique de la réaction et de diminuer de ce fait, le temps d'abattement du polluant. Pour cela nous considérons deux paramètres opératoires à savoir : le rapport massique (CA/ZnO), la concentration initiale de polluant.

5. 3.1.1. Effet de rapport massique de (CA/ZnO)

Afin de déterminer l'influence de la composition en masse entre le charbon actif et l'oxyde de zinc (CA/ZnO) sur l'efficacité de ce procédé, des essais ont été effectués pour différentes compositions CA/ZnO (99,5/0,5 ; 99/1 ; 98/2 ; 97/3%) en utilisant une quantité de ce rapport massique égale à 1,25 g.L⁻¹ pour chaque expérience, une concentration initiale de 50 mg.L⁻¹ en polluant et un pH libre.

Les résultats obtenus en présence de matériaux préparés à différents rapports massiques sont illustrés sur la figure 5 et le tableau 3. Les courbes montrent que la composition optimale est celle obtenue pour le rapport massique de (98/2%).

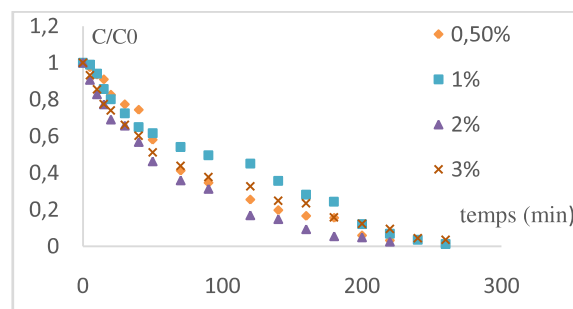


Fig.5. Evolution temporelle de la concentration réduite du tubatin pour différents rapports massiques (CA/ZnO) (C_{tubatin} =50 mg.L⁻¹, C_(CA/ZnO) =1,25 g.L⁻¹, pH libre)

Les vitesses de photodégradation obtenues par couplage des deux procédés sont d'une part, plus importantes que celles trouvées en utilisant le procédé d'adsorption seul. D'autre part ces valeurs augmentent dans le sens de diminution de la quantité de ZnO dans le rapport massique. Ce phénomène est expliqué par un recouvrement des pores du charbon actif par les particules de catalyseur ce qui défavorise l'adsorption du polluant.

Tableau 3. Valeurs des constantes cinétiques, temps de demi-réaction et vitesses initiales de dégradation des polluants pour des différents rapports massiques (CA/ZnO).

CA/ZnO (%)	C ₀ (mg.L ⁻¹)	X %	K _{app} (min ⁻¹)	r ₀ (mg.L ⁻¹)	t _{1/2} (min)	R ²
------------	--------------------------------------	-----	---------------------------------------	--------------------------------------	------------------------	----------------

				k_{app} (min^{-1})		
99,5/0,5	50	9	0,01	0,094	50	0,9
		7	4			
99/1		9	0,01	0,087	53	0,8
		8	3			
98/2	9	0,01	0,11	43	0,9	
	9	6				
97/3	9	0,01	0,073	63	0,9	
	7	1				

6. 3.1.2. Effet de la concentration initiale du polluant

Pour évaluer l'influence de la concentration initiale du tubatin sur le procédé (adsorption/photocatalyse) en utilisant le mélange (CA/ZnO), des essais ont été effectués pour différentes concentrations initiales en polluant (5, 20 et 50 mg.L^{-1}) pour une concentration de 1,25 g.L^{-1} du (CA/ZnO) et un pH libre.

Les résultats illustrés sur la figure 6 et le tableau 4 montrent que la dégradation de polluant en couplant ces deux procédés, est rapide lorsque la concentration initiale en polluant diminue. Un taux de dégradation de 98 et 97% est obtenu pour les concentrations de 5 et 20 mg.L^{-1} respectivement. Nous remarquons que pour une concentration en polluant de 50 mg.L^{-1} , le taux d'abattement et la constante de vitesse diminue considérablement.

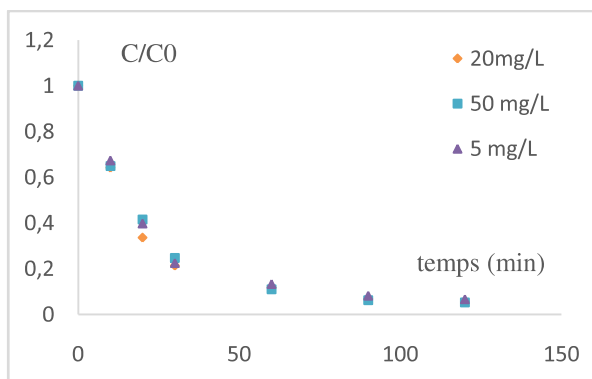


Fig.6. Evolution temporelle de la concentration réduite de tubatin

Tableau .4 Valeurs des constantes cinétiques, temps de demi-réaction et vitesses initiales de dégradation de polluant pour différentes concentrations initiales.

$C_0(\text{mg.L}^{-1})$	X %	$K_{app}(\text{min}^{-1})$	$r_0(\text{mg.L}^{-1}.\text{min}^{-1})$	$t_{1/2}(\text{min})$	R^2
5	98	0,025	0,13	25	0,93
20	97	0,023	0,12	30	0,91
50	95	0,02	0,1	35	0,9

La figure 6 représente l'évolution de la constante apparente de vitesse en fonction des concentrations initiales du polluant.

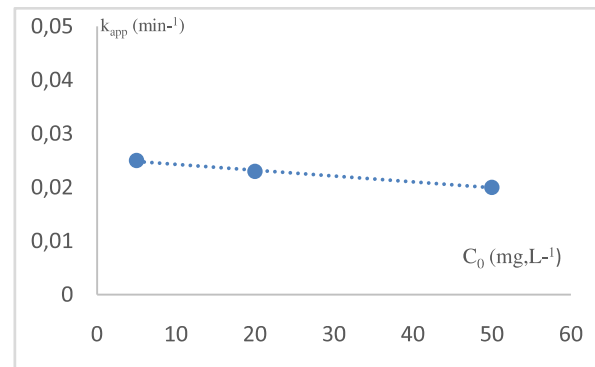


Fig. 7. Evolution de la constante apparente de vitesse en fonction des concentrations initiales du polluant.

Nous remarquons qu'en augmentant la concentration initiale en polluant, les constantes de vitesse diminuent. Plusieurs explications peuvent être considérées pour justifier la diminution de la constante de vitesse en augmentant la concentration du polluant. Il est possible que les sites du charbon actif soient saturés, ou bien que la photo-génération de trous h^+ et/ou de radicaux OH^\bullet à la surface du catalyseur soit réduite à cause du recouvrement des sites actifs par les polluants. Ainsi, lorsque la concentration initiale en polluant augmente, la surface du catalyseur nécessaire pour la décomposition doit augmenter [35].

7. 3.2. Utilisation d'un montage pilote

Dans cette dernière partie de notre travail nous avons utilisé un montage pilote en utilisant le rayonnement solaire comme source d'irradiation pour cela, deux types de support ont été utilisés, le gravier pour la fixation de l'oxyde de zinc (ZnO), et une plaque en aluminium pour fixer le catalyseur supporté sur le charbon actif

8. 3.2.1. Traitement photocatalytique sur ZnO fixé sur le gravier

❖ **effet de la concentration initiale de tubatin**

Dans le but d'étudier l'effet de la dégradation photocatalytique du tubatin à différentes concentrations allant de 5 à 50 mg.L^{-1} en présence de l'oxyde de zinc (ZnO) fixé sur le gravier, des expériences ont été effectuées à pH libre d'environ 6,5 avec un débit de recirculation de 50 mL/s. les courbes de la figure 8 montrent que la dégradation du colorant est assez rapide pour toute la gamme de concentration étudiée ou le taux d'abattement atteint 97% et 99% respectivement.

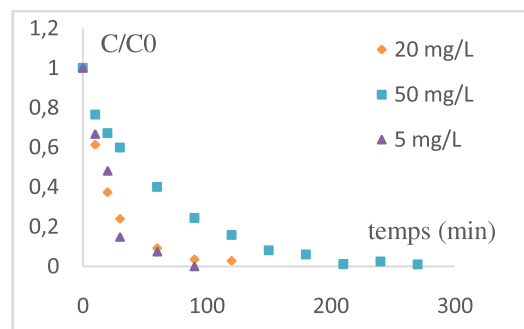


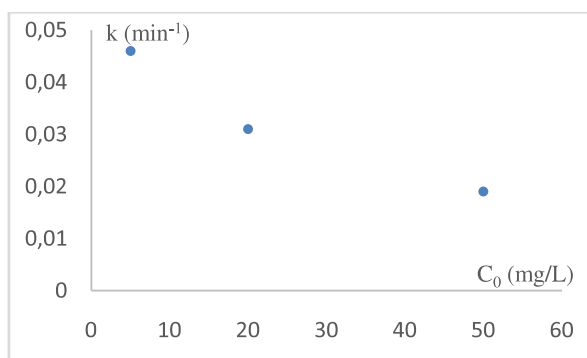
Fig.8. Évolution temporelle de la concentration réduite du tubatin pour différentes concentration initiales en polluant (Q=50 ml/s, pH=6,5)

L'allure exponentielle des courbes laisse présager une cinétique de pseudo-premier ordre. Les constantes de vitesses relatives à chaque concentration ont été déterminées par régression linéaire à partir du tracé de l'évolution de $-\ln(C/C_0)$ en fonction du temps. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 5.

Tableau 5. Valeurs des constantes cinétiques, vitesse initiale et les temps de demi-réaction pour les différentes concentrations en polluant.

$C_0(\text{mg.L}^{-1})$	$k(\text{min}^{-1})$	X %	$t_{1/2}$ (min)	$r_0(\text{mg.L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$
5	0,046	99	15	0,23
20	0,031	98	22	0,62
50	0,019	99	36	0,95

Le tableau 5 montre que la constante de vitesse diminue avec l'augmentation de la concentration initiale en polluant pour toute la gamme des concentrations étudiées. Cette constante passe de 0,046 au 0,019 min^{-1} pour les concentrations de 5 et 50 mg/L respectivement. L'augmentation de la concentration initiale de polluant fait diminuer la constante de vitesse k_{app} d'une façon remarquable. La figure 9 regroupe les constantes de vitesse apparente relative à chaque concentration en tubatin.



La figure 9. Évolution de la constante apparente de vitesse en fonction de la concentration en tubatin (Q=50 ml/s, pH=6,5)

La courbe représentée dans la figure 9 montre une diminution logique de ces constantes qui est inversement proportionnelle à la concentration initiale en tubatin.

9. 3.2.2. Traitement photocatalytique sur catalyseur supporté sur le charbon actif fixé sur une plaque

❖ effet de la concentration initiale de tubatin

Dans le but d'étudier l'effet de la dégradation photocatalytique du tubatin par couplage des deux procédés (adsorption/photocatalyse) à différentes concentrations allant de 5 à 50 mg.L^{-1} en présence de l'oxyde de zinc (ZnO) supporté sur le charbon actif fixé sur une plaque en aluminium, des expériences ont

été effectuées à pH libre avec un débit de recirculation de 50 mL/s. Les courbes de la figure 10 montrent que la dégradation du colorant est assez rapide pour une concentration de 5 mg.L^{-1} avec un taux de dégradation égale à 100 %.

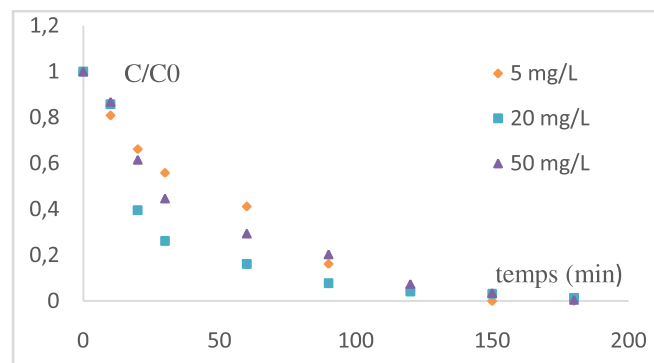


Fig.10. Évolution temporelle de la concentration réduite du tubatin pour différentes concentration initiales en polluant (Q=50 ml/s, pH=6,5)

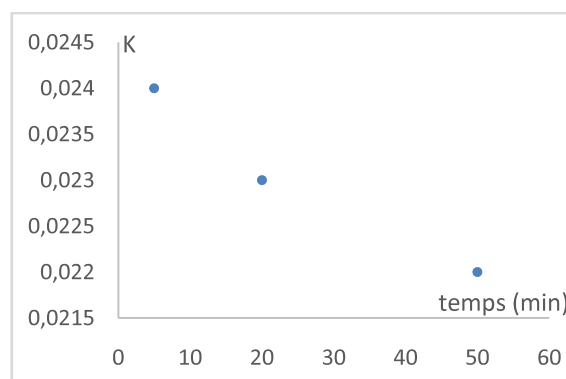
Les constantes de vitesses relatives à chaque concentration ont été déterminées par régression linéaire à partir du tracé de l'évolution de $-\ln(C/C_0)$ en fonction du temps (annexe). Ces résultats sont regroupés dans le tableau 6.

Tableau 6. Valeurs des constantes cinétiques, vitesse initiale et les temps de demi-réaction pour les différentes concentrations en polluant.

$C_0(\text{mg.L}^{-1})$	K (min^{-1})	X%	$t_{1/2}$ (min)	$r_0(\text{mg.L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$
5	0,024	100	29	0,12
20	0,023	99	30	0,46
50	0,022	99	32	1,1

Le tableau 6 montre que la constante de vitesse diminue légèrement avec l'augmentation de la concentration initiale en polluant pour toute la gamme des concentrations étudiées. Cette constante passe de 0,024 au 0,022 min^{-1} pour les concentrations de 5 et 50 mg/L respectivement. L'augmentation de la concentration initiale de polluant fait diminuer la constante de vitesse k_{app} d'une façon remarquable.

La figure 11 regroupe les constantes de vitesse apparente relative à chaque concentration en tubatin.



La fig. 11 Évolution de la constante apparente de vitesse en fonction de la concentration en tubatin (Q=50 ml/s, pH=6,5)

La courbe représentée dans la figure 11 montre une légère diminution remarquable de ces constantes qui est inversement proportionnelle à la concentration initiale en tubatin.

10. VI. CONCLUSION GENERALE

Le présent travail a porté sur la dégradation d'un colorant de textile « tubatin » par action combinée de la photocatalyse solaire et l'adsorption. Deux types de support ont été utilisés, le gravier pour la fixation de l'oxyde de zinc (ZnO), et une plaque en aluminium pour fixer le catalyseur supporté sur le charbon actif dans un montage à l'échelle pilote en utilisant le rayonnement solaire comme source d'irradiation. Les deux supports ont montré leur efficacité et la possibilité de dégrader un tel polluant.

Une étude comparative entre les différents procédés d'élimination de tubatin, l'adsorption, la photolyse et la photocatalyse a montré que le procédé UV/ZnO s'avère être le plus performant pour l'élimination de la molécule.

L'influence des principaux facteurs à savoir, la concentration en catalyseur ou bien le charbon actif, la concentration en polluant, le pH de la solution et la vitesse d'agitation :

- L'effet le plus important sur la dégradation est la concentration de tubatin suivi de l'effet du catalyseur et charbon actif ;
- Il existe une légère interaction entre les différents paramètres ;
- Les résultats expérimentaux sont accord avec les résultats obtenus par le plan d'expérience.

L'étude effectuée nous a permis de conclure que la photocatalyse solaire s'avère être utile comme technique de traitement pour réduire la toxicité des eaux polluées par des colorants tout en réduisant le coût énergétique de traitement.

Références

[1] Ben Mensour.H, Boughzala.O, Dridi.D, Barillier.D, Chekir.L, Mosrati.R, les colorants textiles sources de contamination de l'eau : criblage de la toxicité et des méthodes de traitement, revue des sciences de l'eau, 24, 2018.

[2] Bebamraoui.F, élimination des colorants cationiques par des charbons actifs synthétisés à partir des résidus de l'agriculture, mémoire de magistère, université Ferhat Abbas Sétif, 2014.

[3] M.Bekbolet, M.Lunder, D.Weichgrebe and D.W.Bahnemane, photocatalytic detoxification with the thin-film fixed-bed reactor (TFFBR) : clean-up of highly polluted land fill effluents using a novel TiO₂ photocatalyst, Solar Energy 56, 455-496.1996.

[4] Zayani.G, Bousselmi.L, Mhenni.F, Ghrabi.A, solar photocatalytic degradation of commercial textile azo dyes: performance of pilot plant scale thin film fixed-bed reactor, ELSEVIER, 246, 344-352, 2009.

[5] Bouna.L, fonctionnalisation des minéraux argileux d'origine marocaine par TiO₂ en vue de l'élimination par photocatalyse des micropolluants organiques des milieux aqueux, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2012.

[6] Bouna.L, fonctionnalisation des minéraux argileux d'origine marocaine par TiO₂ en vue de l'élimination par photocatalyse des micropolluants organiques des milieux aqueux, thèse de doctorat, université de Toulouse, 2012.

[7] Constantin.L.A,Nitoi.I,Cristea.N.I, Constantin.M.A, possible degradation pathways of triclosan from aqueous systems via TiO₂ assisted photocatalytic, journal of industrial and engineering chemistry, 3623, 8, 2017.

[8] Shon.H.K, Vigneswaran.S, Ngo.H.H, Kim.J.-H, Chemical coupling of photocatalysis with flocculation and adsorption in the removal of organic matter, Water Research 39, 2549–2558. 2015.

[9] CHAABANE.S, Élimination d'acide Benzoïque par Adsorption/Photocatalyse sur un Film Catalytique CA/TiO₂, Université Ferhat, Algérie, 2014.

[10] Sandoval.A, Hernández-Ventura.C, E. Klimova.T, Titanate nanotubes for removal of methylene blue dye by combined adsorption and photocatalysis, Fuel, 2016.

[11] Maria Visa Cristina Bogatu Anca Duta, Tungsten oxide – fly ash oxide composites in adsorption and photocatalysis, Journal of Hazardous Materials, S0304-3894(15)00064-3.2017.

Etude et Optimisation des Facteurs de Dégradation des Polluants Pharmaceutiques

Djillali Tassalit^{#1}, Nachida Kasbadji Merzouk^{#2}, Nadia Chekir^{*3}, Ouassila Benhabiles^{#4},
Manel Bradai^{4*}, Hakim Kissarli^{5*}

[#] *Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES/EPST, Centre de Développement des Energies Renouvelables, Route Nationale n°11, BP386, Bou Ismail, 42400, Tipaza, Algeria.*

¹tassalit2003@gmail.com

²nkmerzouk@gmail.com

⁴benhabiles.ouassila@gmail.com

^{*} *Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Laboratoire des Phénomènes de Transfert,*

Bab-Ezzouar, 16111 Algiers, Algeria

³nchekir@yahoo.fr

⁴bradai-manel@hotmail.com

⁵kissarli.hakim@outlook.fr

Abstract—La présente étude porte sur l'étude et l'optimisation des facteurs de dégradation des polluants récalcitrants dans les eaux usées. La méthode des plans d'expérience est utilisée pour l'analyse de trois facteurs dominants sur le rendement de la dégradation à savoir : la concentration en polluant (mgL^{-1}), la concentration en catalyseur (gL^{-1}) et le pH. L'influence de ces facteurs a permis de conclure que la concentration du catalyseur affecte d'une manière prépondérante la dégradation et que l'augmentation du pH de la solution favorise sa dégradation. En effet, ce dernier, combiné avec le procédé photocatalytique influe positivement sur l'efficacité de dégradation du produit pharmaceutique Ibuprofène.

Keywords— Photocatalyse, Polluants, Plans d'expérience

I. INTRODUCTION

La pollution des eaux et le coût de son traitement, sont des problèmes auxquels les scientifiques consacrent le plus de temps et d'efforts, [1]. Ils se doivent de trouver des méthodes peu coûteuses, bénignes et efficaces, pour faire face à ces défis, [2,3]. Parmi les stratégies de dépollution, la photocatalyse semble être une solution intéressante pour le traitement des eaux usées, [4]. En effet, depuis la découverte du pouvoir photocatalyseur du TiO_2 par Honda et Fujishima, un énorme intérêt est porté à la photocatalyse pour le traitement des eaux usées [5,6].

Le but du présent papier est d'optimiser les facteurs de dégradation du produit Ibuprofène, dont les résidus sont récalcitrants dans les eaux de rejet. Pour cela une série de tests ont été menés, à l'aide d'un photoréacteur monté localement pour déterminer les facteurs prépondérants sur la dégradation. Les résultats ont été analysés par la méthode des plans d'expérience, [7,8].

II. METHODOLOGIE

A. Dispositif expérimental et conditions de test

La photodégradation du polluant organique (Ibuprofène pour ce cas-là) est effectuée dans un système à circulation fermée utilisant une nouvelle conception à géométrie particulière, composée d'un ensemble de sphères en verre superposées les unes sur les autres, [9]. Le photoréacteur est rotatif et favorise ainsi le contact du polluant avec le catalyseur appliqué sur la paroi interne des sphères. Le tout repose sur un bassin récoltant la solution déversée sur le support catalytique. L'eau est récupérée dans un réservoir d'une capacité volumique de 5 litres. La circulation du fluide se fait à l'aide d'une pompe alimentée par des panneaux solaires photovoltaïques. La photocatalyse est renforcée par l'existence d'une lampe à UV installée au centre des sphères.

Le photoréacteur est représenté sur la figure 1.



Fig. 1 Photoreacteur expérimental

B. Les Plans d'Expérience

L'analyse des résultats et l'expérimentation peuvent être fortement simplifiées par l'utilisation de la méthodologie des plans d'expérience. Cette dernière permet de créer un modèle statistiquement significatif d'un phénomène qui intègre les interactions entre les variables tout en optimisant le nombre d'essais. La méthodologie de la recherche expérimentale est particulièrement adaptée lorsque les objectifs sont les suivants, [10] :

- isoler les facteurs qui pourraient avoir de l'influence sur le phénomène étudié (poids des facteurs) parmi un très grand nombre de facteurs,
- étudier l'influence de différents facteurs en tenant compte de l'existence éventuelle d'effets d'interaction entre ces facteurs ;
- élaborer un modèle descriptif ou prévisionnel, relatif au phénomène étudié (modélisation) ;
- et rechercher l'optimum d'une ou de plusieurs réponses.

Cette méthodologie repose sur la mise en place d'une situation particulière qui comporte autant de ligne que d'expériences et autant de colonnes que de variables. On obtient ainsi une matrice représentant un tableau où chaque point de la matrice d'expérience correspond à un point du plan d'expérimentation.

Le processus est alors représenté par un modèle empirique polynômial de second ordre, tel que :

$$Y = A_0 - A_1X_1 + A_2X_2 + A_3X_3 + A_{12}X_1X_2 - A_{13}X_1X_3 + A_{23}X_2X_3 - A_{11}X_1^2 - A_{22}X_2^2 + A_{33}X_3^2 \quad (1)$$

où le A_0 est le coefficient d'interception ; les A_{11} , A_{22} et A_{33} sont les termes quadratiques, les A_{12} , A_{13} et A_{23} sont les coefficients d'interaction et les X_1 , X_2 et X_3 sont les variables indépendantes étudiées, [10].

Un total de n expériences est jugé suffisant pour calculer les coefficients du modèle de régression polynomiale du second ordre pour trois variables. Chaque variable peut être étudiée à trois niveaux: -1, 0, +1.

L'étude est complétée par l'analyse statistique d'ANOVA qui est une technique statistique qui subdivise la variation totale dans un ensemble de données en composants associés à des sources spécifiques de variation dans le but de tester des hypothèses sur les paramètres du modèle [9, 10].

L'effet des paramètres du modèle et de leurs interactions sont déterminé grâce au niveau de confiance (R) qui est utilisé pour déterminer la signification statistique de toutes les analyses. Les résultats sont évalués avec diverses statistiques descriptives telles que la valeur de p (la probabilité), F -valeur et le degré de liberté. Les carrés moyens sont obtenus en divisant la somme des carrés de chaque source de variation par leur degré de liberté

$$Carrémoyen = \frac{Somme\ des\ carrées}{deg\ rés\ deliberté} \quad (2)$$

Le facteur (R^2) de chaque paramètre de l'équation est déterminé à l'aide du test F et des valeurs de probabilité de Fisher, qui lorsqu'il augmente, la probabilité diminue. Pour une probabilité inférieure à 0.001 ($p < 0.001$), on peut déduire que le modèle prédit la réponse exacte.

Le coefficient de corrélation (R^2) qui évalue quantitativement la corrélation entre les données expérimentales et les réponses prédites, ainsi que l'adéquation du modèle est calculé et évalué par une représentation graphique des résidus qui représentent la différence entre la valeur observée et la valeur prédit.

$$Résidus = valeur_{prédites} - valeur_{observée} \quad (3)$$

Pour connaître la contribution de chaque effet ainsi que leurs interactions sur la réponse on effectue l'analyse de Pareto. Elle détermine les effets en pourcentage de chaque facteur sur la réponse et fournit une information plus significative pour l'interprétation des résultats [9]. Pareto se calcul comme suit:

$$P_i = \left(\frac{A_i^2}{\sum A_i^2} \right) * 100 \quad (i \neq 0) \quad (4)$$

C. Paramètres Etudiés et Domaine Expérimental

La performance de la photocatalyse dépend de diverses variables telles que, la concentration en polluant, la concentration en catalyseur et le pH de la solution. Pour simplifier l'analyse expérimentale, le rôle de ces variables sur la dégradation des polluants doit être analysées. Il a été démontré dans la littérature, que l'augmentation de la concentration en polluant entraîne l'augmentation de la réaction entre les molécules et les espèces oxydantes et l'amélioration de la vitesse de dégradation [12]. Par ailleurs, pour une concentration élevée en polluant, la vitesse de dégradation atteint un maximum qui peut être expliqué par l'occupation de tous les sites du catalyseur par le polluant. Mais ceci entraîne une stabilisation de la vitesse initiale de dégradation qui par conséquent diminue le rendement de la dégradation [12]. Sachant que les polluants pharmaceutiques se trouvent à l'échelle de trace dans l'environnement, les proportions de la concentration du polluant ont été fixées entre 5 et 15 mgL^{-1} .

La quantité de catalyseur est un autre paramètre qui influence le processus de photocatalyse. Il a été démontré que l'augmentation de la concentration du catalyseur augmente l'opacité de la surface photosensible empêche ainsi la lumière d'y pénétrer [14, 15]. Pour ces raisons, la quantité de catalyseur a été fixée à 0.1 et 0.5 gL^{-1} .

Le pH de fonctionnement affecte l'efficacité du procédé photocatalytique de dégradation et dépend de la nature des charges de surface, portées par le catalyseur TiO_2-P25 , de l'état ionique des molécules d'ibuprofène à l'adsorption et de la concentration en radicaux hydroxyles produits. Pour bien

analyser tous ces facteurs le Ph a été choisi entre 3 et 8 pour qu'il puisse couvrir tous les états ioniques du catalyseur et de la molécule étudiée, sachant que le pKa (ibuprofène)=4.9 et que le pH (catalyseur)=6.5.

D. Facteurs, Plan et Réponses Expérimentales Choisies

Le plan Box-Behnken a été choisi pour sa propriété de séquentialité et pour sa capacité à entreprendre une étude des premiers facteurs en se servant de la possibilité d'ajouter de nouveaux résultats sans perdre les essais déjà effectuées. Ceci convient lorsque la réponse est unique.

La réponse attendu dans le cas présent est le rendement de la dégradation de l'ibuprofène (%), elle est donnée par :

$$Y(\%) = \frac{C_o - C_f}{C_o} \quad (5)$$

avec C_o la concentration initiale en polluant et C_f la concentration finale en polluant

Le domaine d'étude et l'identification des variables indépendantes sont résumés au tableau 1.

TABLE I
GAMMES ET NIVEAUX EXPERIMENTAUX DES VARIABLES D'ESSAIS

Domaine d'étude			
Variable indépendante	-1	0	+1
X_1 , Concentration du polluant ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	5	10	15
X_2 Concentration du catalyseur ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),	0,1	0,3	0,5
X_3 Valeur du pH.	3	5,5	8

III. RÉSULTAT ET DISCUSSION

Les résultats des expériences du plan de Box- Behnken représentés par la matrice d'expériences définissant les combinaisons statistiques des variables étudiés (la concentration en polluant ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), la concentration en catalyseur ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) et le pH) avec les réponses sont affichés au tableau 2.

TABLE II
MATRICE DU PLAN EXPERIMENTAL

N° EXP	X_1 (Cpolluant)	X_2 (Cca talyseu r)	X_3 , (P H)	Rendement (%)	
				Obs.	Préd.
1	5	0,1	5,5	20,7	19,19
2	15	0,1	5,5	9,32	3,81
3	5	0,5	5,5	64,89	70,40
4	15	0,5	5,5	19,87	21,38
5	5	0,3	3	53,2	49,21
6	15	0,3	3	30,21	30,22
7	5	0,3	8	81,04	81,03
8	15	0,3	8	31,64	35,62
9	10	0,1	3	16	21,50
10	10	0,5	3	37,16	35,64
11	10	0,1	8	18,33	19,85
12	10	0,5	8	80	74,50
13	10	0,3	5,5	31,9	32,24
14	10	0,3	5,5	32,25	32,24
15	10	0,3	5,5	32,58	32,24

Le tableau indique que 15 expériences ont été effectuées. Toutes les combinaison possibles entre les trois facteurs de dégradation ont été considérées. Afin d'éliminer l'influence du

temps de traitement sur la dégradation, les test se sont tous déroulés pour un temps similaire égale à 210 mns.

L'équation polynomiale de second ordre décrivant la photodégradation de l'ibuprofène est donnée par l'équation suivante:

$$Y = 32.25 - 16.1X_1 + 17.2X_2 + 9.3X_3 + 3.8X_1X_2 - 7.3X_1X_3 + 12.9X_2X_3 - 8.4X_1^2 - 6.6X_2^2 + 10.1X_3^2 \quad (6)$$

L'analyse des valeurs monômes des coefficients du modèle de régression de l'équation, indique que le coefficient de la concentration du catalyseur ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) (X_2) est supérieur à la concentration du polluant ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (X_1) et est supérieur à la valeur du pH (X_3).

Au tableau III, sont résumés les résultats de l'analyse de la variance (Anova) qui permettent le test de la solidité du modèle et pour examiner son adéquation

TABLE III
ANOVA POUR LA REPOSE DE SURFACE DU MODELE QUADRATIQUE.

Source	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré moyen	Rapport F	Prob >F	Rem.
Modele	6923.12	9	769.24	23.67	<0.001	Sign.
A_1	2073.45	1	2073.4	63.82	<0.001	Sign.
A_2	2365.7	1	2365.7	72.82	<0.001	Sign.
A_3	692.66	1	692.66	21.32	<0.001	Sign.
A_{12}	282.91	1	282.91	8.71	0.03	Sign.
A_{13}	174.37	1	174.37	5.37	0.07	Sign.
A_{23}	410.26	1	410.26	12.62	0.01	Sign.
A_{11}	53.34	1	53.34	1.64	0.025	-
A_{22}	199.42	1	199.42	6.14	0.05	-
A_{33}	621.92	1	621.92	19.14	<0.001	Sign.
Résidus	162.42	5	32.48	-	-	-
Err. pure	0.23	2	0.115	-	-	-
Total	7085.54	14				
-			$R^2 = 0.977$			$R^2_{\text{adj}} = 0.935$

Les résultats du Tableau III, permet de conclure que les variables indépendantes du modèle quadratique, à savoir la concentration du polluant (X_1), la concentration du catalyseur (X_2), le pH (X_3), l'interaction entre la concentration du polluant et l'effet du second ordre du pH (X_3^2) ont un effet très significatif sur le rendement de la dégradation.

En outre, la valeur de l'interaction de la concentration du catalyseur à celle du pH (X_{23}) ainsi que celle de l'interaction entre la concentration du polluant et la concentration du catalyseur (X_{12}) sont moins significantes car p est inférieure à 0.05.

Sachant que lorsque p est supérieur à 0.05, les termes du modèle sont insignifiants, on déduit que les interactions entre la concentration du polluant et la valeur du pH (X_{13}), l'effet du second ordre de la concentration du polluant (X_1^2) ainsi que l'effet du second ordre de la concentration du catalyseur (X_2^2) et la valeur du pH (X_3) sont négligeables.

On remarque que l'analyse du résidu indique un très bon accord entre les valeurs expérimentales et celles prédites car le coefficient de corrélation est de $R^2 = 0.977$. Cette valeur de R^2 signifie que le modèle est bon, indiquant ainsi une haute fiabilité du modèle dans la prévision du rendement de la

dégradation de l'ibuprofène. Ceci indique aussi que 97.7% des résultats prédit sont fiables et que le modèle décrit bien les résultats. La valeur de R^2 ajusté (0.935) consolide le résultat précédent et confirme que le modèle représentatif est bon.

En figure 2, sont tracé les valeurs des réponses prédites par le modèle en fonction des valeurs observées. On remarque que les points sont bien représentés autour de la droite de regression.

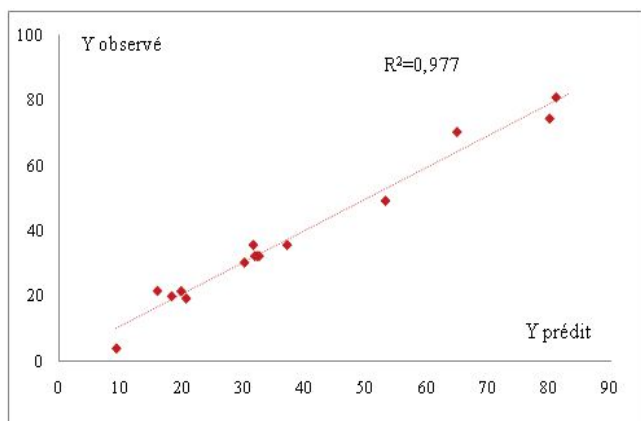


Fig. 2 Tracé des valeurs de réponse prédites par le modèle en fonction des valeurs observées

La figure 3 représente le tracé des résidus observés en fonction des valeurs prévues. Les valeurs des réponses prédites sont en abscisses et les résidus en ordonnées.

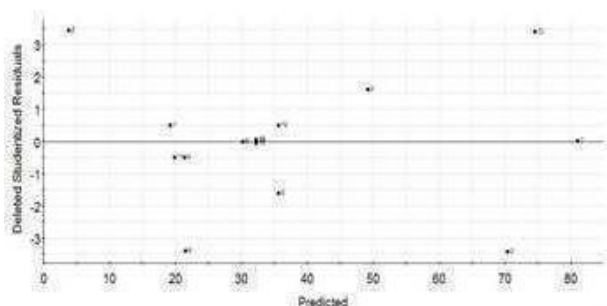


Fig. 3 Tracé des résidus observés en fonction des valeurs prévues.

Les points regroupés autour de la ligne indiquent que la prévision est exacte alors que les points au-dessus de la ligne (les valeurs positives des résidus) révèlent une surestimation tandis que les points en dessous de la ligne (les valeurs négatives) révèlent une sous-estimation.

On remarque aussi que les points expérimentaux observés sont dispersés de façon aléatoire autour de la ligne. Ceci indique que le diagramme des résidus laisse apparaître une relation certaine entre les valeurs prédites et les résidus et que la différence entre les valeurs prédites et les valeurs observées est négligeable.

L'analyse graphique des effets et des interactions des différents facteurs ainsi que leurs interactions sont représentés dans la figure 4. On en déduit que la concentration du polluant a un effet important mais négatif sur le rendement de

dégradation. Plus la concentration du polluant est moindre plus le rendement est meilleur.

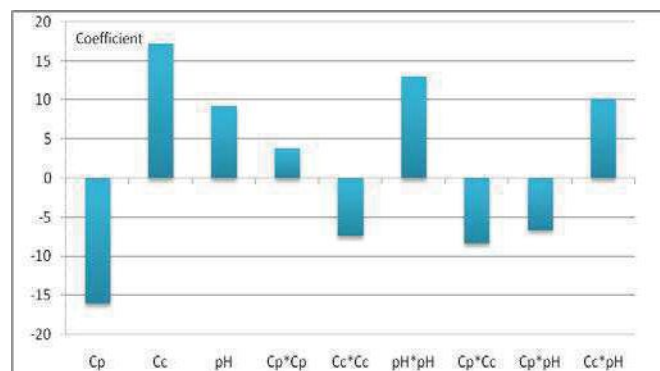


Fig. 4 Analyse des effets de différents facteurs sur la photodégradation de l'ibuprofène.

Par ailleurs, la concentration du catalyseur a un effet important positif, ce qui indique que l'augmentation de la concentration du catalyseur entraîne l'amélioration du rendement.

Le pH de la solution ainsi que l'effet du second ordre de la valeur du pH ont un effet significatif sur le rendement de la dégradation. Cet effet influe positivement sur l'efficacité du processus photocatalytique de dégradation. En effet, son augmentation favorise la dégradation de la molécule.

L'interaction entre la concentration du polluant et la concentration du catalyseur présente un effet positif sur le rendement de la dégradation mais il reste toujours inférieur à celui enregistré dans le cas de l'influence de la concentration du catalyseur et le pH de la solution.

Enfin, l'interaction entre la concentration du catalyseur et le pH présente un effet positif considérable sur la réponse alors que l'interaction entre la concentration du polluant et le pH présente un effet négatif négligeable sur le rendement de la dégradation.

L'analyse graphique de Pareto concernant l'estimation en pourcentage des différents effets sur le rendement de la photodégradation de l'ibuprofène est représentée sur la Figure 5.

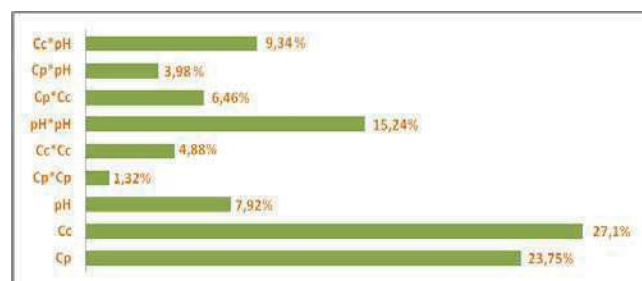


Fig.5 Analyse graphique de Pareto

La figure indique que :

- la concentration du catalyseur ($g \cdot L^{-1}$) à une influence de plus de 27% ;

- la concentration initiale du polluant (mgL^{-1}) à une influence de plus de 23% sur le rendement de la réaction de disparition du polluant ;
- l'effet du second ordre de la valeur du pH influe sur la dégradation avec un taux supérieur à 15%.

Avec une influence moindre on note que :

- la valeur de l'interaction de la concentration du catalyseur (gL^{-1}) avec la valeur du pH sur la dégradation est de l'ordre de 9% ;
- le pH a une influence de plus de 8% ;

Enfin avec une influence négligeable, on note :

- l'effet du second ordre de la concentration du polluant (mgL^{-1}) avec 1.32%
- l'effet du second ordre de la concentration du catalyseur (gL^{-1}) avec 4.88%
- et l'effet de l'interaction de la concentration du catalyseur avec le pH qui ne dépasse pas 3.98%.

IV. CONCLUSIONS

Afin d'étudier l'influence des différents paramètres ainsi que leurs interactions sur la dégradation de l'ibuprofène, nous avons procédé à une étude par plan d'expérience en utilisant le modèle de box-behnken.

L'influence des principaux facteurs à savoir, la concentration du catalyseur, la concentration du polluant et le pH de la solution sur la dégradation de l'ibuprofène a été étudiée.

Les résultats ont montré que la concentration du catalyseur est celle qui influe le plus sur la dégradation du polluant suivi du pH de la solution. En effet, l'augmentation de ce dernier favorise la dégradation du polluant et influe positivement sur l'efficacité du procédé photocatalytique de dégradation de l'ibuprofène.

Par ailleurs, l'interaction entre la concentration du catalyseur et le pH ainsi que celle de la concentration du polluant et du catalyseur ont un effet positif sur la dégradation.

Le model choisi pour ce travail a prouvé son efficacité en indiquant un très bon accord entre les résultats expérimentales obtenus et celles prédites par le modèle avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0.977$.

A l'instar de ces résultats, nous avons pu déterminer les conditions optimales pour le traitement avec une dégradation complète de l'ibuprofène, à savoir :

$$C_p = 5 \text{ mgL}^{-1}$$

$$C_c = 0.5 \text{ gL}^{-1}$$

$$\text{pH} = 8.$$

REFERENCES

- [1] FAO, Nation unies, World Resources Institute (WRI), United Nations Environment Programme, Le Monde diplomatique, 2012..
- [2] S. Richards, E. Cole. "A toxicity and hazard assessment of fourteen pharmaceuticals to *Xenopus laevis* larvae". *Ecotoxicology*. 15(8),647-656, 2006.
- [3] M. Gomez, M. Martinez, S. Lacorte, A. Fernandez-Alba, A. Aguera, Pilot survey monitoring pharmaceuticals and related compounds in a sewage treatment plant located on the Mediterranean coast. *Chemosphere*. 66, 993-1002, 2007.
- [4] M.A. Behnajady, N. Modirshahla, N. Daneshvar, M. Rabbani, "Photocatalytic degradation of an azo dye in a tubular continuous-flow

- photoreactor with immobilized TiO_2 on glass plates", *Chemical Engineering Journal*. 127, 167-176, 2010.
- [5] Tassalit D., N. Chekir, O. Benhabiles, O. Mouzaoui, S. Mahidine, N. Kasbadji Merzouk, F. Bentahar, A. Khalil, "Effect and interaction study of acetamiprid photodegradation using experimental design", *Journal Water Science and Technology* Volume 74 Issue 8 Pages 1953-1963, 2016.
- [6] Tassalit D., N. Chekir, O. Benhabiles, S. Dechir, S. Lebouachera, N. Kasbadji Merzouk, 310 F Bentahar, "Use of Packed Bed Photocatalyst and Sun Light Radiation for the Removal of Emerging Contaminant Dyes from", *Water International Journal of ChemTech Research* volume 9/08, 366-373. (2016).
- [7] J. Goupy. Introduction aux Plans d'expériences. Dunod. Paris. 303. 2001
- [8] G.E. P. Box, W.G.Hunter, J. S Hunter. Statistics for Experimenters. deuxième édition. John Wiley and Sons. New-York. 633. 2005.
- [9] M. Bradai, H. Kissarli, "Conception, réalisation et mise au point d'un nouveau photoréacteur solaire pour le traitement de polluants bio-récalcitrants", Mémoire de Master, USTHB/UDES, 2016
- [10] A. Lamure, Methodologie des plans d'expérience, Edition inpeniacet 2006
- [11] J. J. Pignatello, E. Oliveros, A. MacKay, "Advanced oxidation processes for organic contaminant destruction based on the Fenton reaction and related chemistry" *Critical Review in Environmental Science and Technology*, 36, 1-84. 2006
- [12] A. K. Sinha, M. Basu, S. Sarkar, M. Pradhan, T. Pal:, "Synthesis of gold nanochains via photoactivation technique and their catalytic applications". *Journal of Colloid and Interface Science*, 398,13-21, 2013.
- [13] M. S. Alim, S. Ait Saada. "Dégradation d'un colorant textile par photocatalyse hétérogène" thèse master, Ecole Nationale Polytechnique, 2013.
- [14] R. Djellabi. Contribution de la photocatalyse à l'élimination des polluants industriels, Doctorat-LMD en Chimie, Université Badji Mokhtar – Annaba. 2015
- [15] Y. Chen, S. Yang, K. Wang, L. Lou. "Role of primary active species and TiO_2 surface characteristic in UV-illuminated photodegradation of Acid Orange 7". *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 172, 47-54, 2005.

Eléments d'évaluation de la capacité d'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution électrique basse tension

KHELIF Messaoud , M'RAOUI Abdelhamid , HASSAINE Linda

*Centre de Développement des Energies Renouvelables,
CDER, 16340, Bouzaréah, Alger.*

Résumé - Le travail présenté, a pour objectif d'éclairer un volet important des contraintes techniques pouvant limiter localement la capacité d'accueil du réseau électrique des productions décentralisées, notamment à base de ressources renouvelables. Dans cette optique, l'élévation de la tension au point de raccordement, suite au fonctionnement inhérent de ces dernières en tant que sources de puissance, reste un élément déterminant. En effet, le maintien de la tension dans une fourchette de valeurs imposées autour de celle nominale, fait partie des engagements réglementaires les plus en vue du gestionnaire du réseau en matière de qualité d'énergie desservie. Partant de ce constat, une étude analytique préliminaire de la situation est menée sur la base d'un modèle simple illustrant les échanges d'énergie mis en jeux et les modes de contrôle associés. Une évaluation quantitative des contraintes évoquées est alors menée à travers une simulation détaillée en adoptant des topologies simples mais assez représentatives du réseau de distribution basse tension. L'option qu'offre l'interface de puissance qu'est l'onduleur de générer de l'énergie réactive, conjointement au transit de celle active, est également considérée. Ceci étant en vue d'évaluer l'apport de cette alternative quant à l'amélioration du taux d'intégration au réseau électrique des productions distribuées à base de ressources renouvelables, sans pour autant transgresser le plan de tension imposé par la réglementation en vigueur.

Mots clés - Réseau électrique ; Puissance réactive ; Plan de tension; Onduleur ; facteur de puissance.

I- Introduction

Les réseaux électriques dont la topologie a été façonnée jusqu'ici sur la base d'un mode de production assez centralisé, sont entrain de subir une mutation profonde avec l'avènement des énergies renouvelables. En effet, le recours à ces dernières comme source primaire dans la production d'électricité, met en avant des capacités unitaires de production allant de seulement quelques KW (essentiellement PV résidentiel) à plusieurs centaines de MW pour les grandes centrales solaires ou éoliennes (hors Hydro-électricité). De fait, un élargissement remarquable du profil des producteurs potentiels est entrain de s'opérer sous la pression qu'impose la nouvelle dynamique de développement durable à l'échelle mondiale, stimulée par le lancement de nombreux programmes nationaux audacieux dans ce sens [1]. Ainsi, la dernière décennie a vu les capacités installées raccordées à certains réseaux électriques nationaux, dépasser déjà celles des principales ressources conventionnelles. Il reste cependant à souligner que cette transition n'aurait pas eu lieu en si peu de temps si en parallèle, les challenges techniques et organiques prévisibles dès le début [2][3][4], n'avaient pas trouvé des solutions fiables. Ainsi, les appréhensions légitimes quant aux problèmes induits sur le réseau en termes de stabilité, protection et qualité de l'énergie, suite à une intégration massive de ces ressources, ont été amplement atténuées à plusieurs niveaux. Mieux encore, des prestations de services techniques utiles, auxquelles les gestionnaires du réseau

allouent des avantages certains, sont désormais proposées grâce aux progrès accomplis, notamment au niveau de l'onduleur comme interface de contrôle des flux d'énergie échangés. Ce sont justement ces dernières qui constituent aujourd'hui un domaine de recherche appliquée assez fécond aux confins du génie électrique et des énergies renouvelables. Une des issues les plus visibles de ces dernières étant l'élaboration des standards techniques (Grid codes) [5], permettant une intégration optimale des énergies renouvelables au réseau tout en sauvegardant sa stabilité et la qualité de l'énergie desservie.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail présenté, initié par l'étude analytique d'une cellule de base d'un réseau électrique AC, afin d'évaluer les puissances active et réactive pouvant y être échangées tout en identifiant les paramètres permettant de les contrôler. Une topologie radiale élargie à plusieurs récepteurs (charges) est alors adoptée et étudiée à travers une simulation détaillée afin de mieux illustrer le problème typique d'élévation de la tension. Ainsi, la capacité d'intégration au point de raccordement considéré, à travers un onduleur à facteur de puissance unitaire, est évaluée selon la réglementation spécifique au réseau national de distribution basse tension [7]. Dans le même contexte mais en adoptant un onduleur à facteur de puissance inductif spécifique, le plan de tension est réévalué avant de quantifier la capacité supplémentaire de puissance active pouvant être injectée par rapport au cas précédent, sans transgresser la réglementation en vigueur. Enfin, l'emplacement du point de raccordement est également étudié comme élément de choix pouvant aider à optimiser la capacité d'intégration en présence des mêmes données de départ.

II- Nouvelles contraintes du réseau de distribution

Toutes les analyses et autres projections technico-économiques, convergent vers le fait que c'est le réseau de distribution qui est appelé à devenir le réceptacle le mieux approprié à l'intégration d'une grande partie de la production électrique à base de ressources renouvelables. En effet, avec des paliers de tensions caractéristiques favorables (BT et HTA) et une couverture territoriale étendue, il est naturellement prédestiné à la collecte de la production des Générateurs Electriques Distribués (GED) de petites et moyennes capacités typiques aux ressources renouvelables. Le développement de ces dernières à grande échelle, induirait donc de fait, une mutation structurelle profonde ainsi qu'un élargissement significatif du plan de charge du Gestionnaire du Réseau de Distribution (GRD). Celui-ci passerait, entre autres, du rôle de simple client à celui d'un partenaire majeur du Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité (GRTE) en matière de contrôle global des flux d'énergie et de coordination des services auxiliaires qui relevaient jusqu'ici exclusivement des prérogatives de ce dernier.

III- Analyse des échanges d'énergie électrique

Une configuration simple mais assez représentative des échanges d'énergie électrique dans un réseau, peut être matérialisée par une cellule regroupant un générateur donné de tension V_r , connecté à une charge passive ou un autre générateur de tension E à travers une ligne d'impédance Z (Fig-1). En considérant les effets capacitifs négligeables le long d'une ligne de distribution, l'impédance caractéristique de cette dernière peut être modélisée par la mise en série d'une résistance R et une inductance L de valeurs globales représentatives [6].

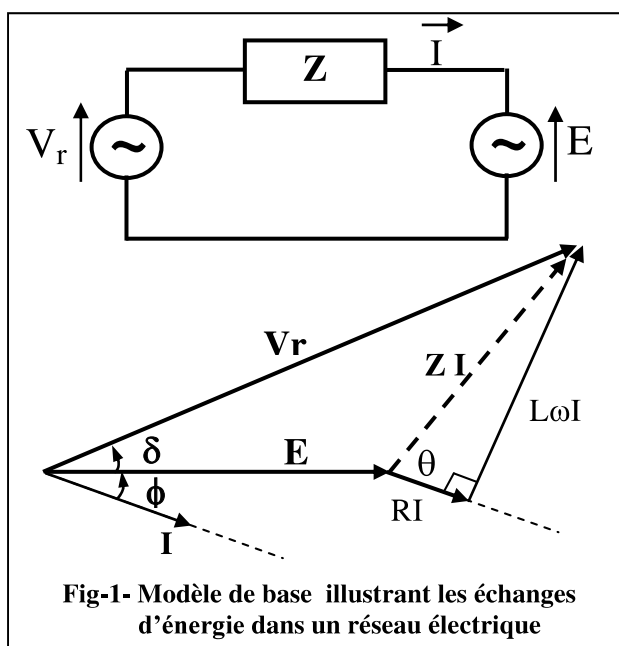


Fig-1- Modèle de base illustrant les échanges d'énergie dans un réseau électrique

En appliquant les lois classiques régissant les circuits électriques à courant alternatif et les outils appropriés permettant d'étudier le modèle retenu, les expressions finales des puissances active P et réactive Q échangées au nœud de tension E (supposé être récepteur) sont établies comme suit:

$$P = \frac{EV_r}{Z} \cos(\delta - \theta) - \frac{E^2}{Z} \cos \theta \quad (1)$$

$$Q = \frac{EV_r}{Z} \sin(\delta - \theta) - \frac{E^2}{Z} \sin \theta \quad (2)$$

$$\text{avec : } Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}, \quad \theta = \arctg \frac{L\omega}{R},$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (f : \text{fréquence du réseau})$$

Dans le but de mener une analyse explicite des transits de puissance directement à partir de (1) et (2), l'hypothèse assez représentative d'une ligne sans pertes est adoptée ($R=0$, $\theta = \pi/2$), soit une impédance caractéristique Z qui se résume à une réactance ($Z=X=L\omega$).

$$P = \frac{EV_r}{X} \sin \delta \quad (3)$$

$$Q = \frac{E}{X} (V_r \cos \delta - E) \quad (4)$$

Les expressions ainsi simplifiées de P et Q (3,4), permettent en effet une quantification plus rapide des conditions

d'échange ainsi qu'une vision plus directe quant aux possibilités de contrôle de ces derniers.

En considérant la tension V_r comme étant celle imposée par le réseau, deux situations assez distinctes peuvent être considérées selon que le récepteur raccordé au nœud de tension E situé à l'autre bout de la ligne soit passif (consommateur) ou actif (lui-même générateur). Dans le premier cas, considérant une charge passive caractérisée par son facteur de puissance F_p ($\cos \phi$), utilisé comme paramètre, les résultats mettent en évidence l'existence prévisible d'une limite théorique de la capacité de transit en termes de puissance active P de la ligne. L'expression analytique de cette dernière P_{\max} pour une charge de facteur de puissance unitaire ($P_{\max} = V_r^2/2X$), pouvant être quantitativement validée à titre d'exemple (Fig-2).

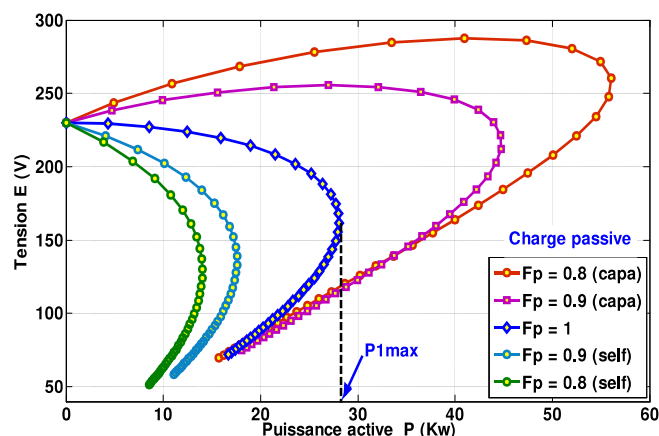


Fig-2- Variation de E en fonction de P . Cas d'une charge passive de facteur de puissance FP donné et $X=0.943 \Omega$

Dans le second cas, la charge passive est remplacée par une source pouvant illustrer un générateur d'électricité distribuée (GED), imposant au nœud de raccordement correspondant une tension dont l'amplitude E et la phase δ par rapport à V_r (Fig-1) peuvent être contrôlées. Ainsi, les transits de puissance qui restent régis par les mêmes relations (3) et (4), obéissent dans ce cas à une nouvelle approche qui laisse entrevoir de nouvelles perspectives quant à la gestion de l'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution.

Dans cette optique, une analyse des échanges de puissance entre le réseau imposant V_r et le GED fixant E , est menée en gardant les mêmes conventions pour le nœud de raccordement de ce dernier (récepteur). Cela étant afin d'illustrer au mieux les modifications fonctionnelles qui s'imposent à la ligne de distribution avec l'introduction d'une source d'énergie distribuée autre que celle conventionnelle généralement prélevée sur le réseau de transport et ce au niveau du poste de départ.

Considérant le cas général d'un GED réversible (avec stockage), deux situations particulières sont analysées selon que ce dernier soit apte ou pas à générer de la puissance réactive Q_{pv} tout en assurant le transit effectif de la composante active P_{pv} . Ces deux alternatives de fonctionnement, exclusivement assurées au niveau du convertisseur DC-AC (onduleur), permettent d'entrevoir des perspectives réelles quant à l'optimisation de l'intégration au réseau de la production d'électricité à base de solaire photovoltaïque et d'éolien.

Dans le cas général, P_{pv} étant imposé par la source de production (ensoleillement, vent...), le contrôle de Q_{pv} se fait selon une stratégie de fonctionnement préalablement fixée par le gestionnaire du réseau et élaborée entre autres afin d'aider au réglage du plan de tension [5]. Ainsi, hormis celle qui consiste à maintenir $Q_{pv}=0$ ($Fp=1$), initialement adaptée pour sa simplicité, mais qui a tendance à disparaître même pour les faibles puissances, la génération contrôlée d'énergie réactive au niveau des onduleurs connectés au réseau est devenue quasi systématique. Cette option contribue en effet à un réglage assez fin du plan de tension local et augmenter en conséquence les limites en termes de capacité d'accueil. C'est dans l'optique d'illustrer au mieux les principaux effets de l'énergie réactive, dont justement la possibilité de contribuer au réglage local de la tension, que les étapes ultérieures d'analyse et essais sont menés.

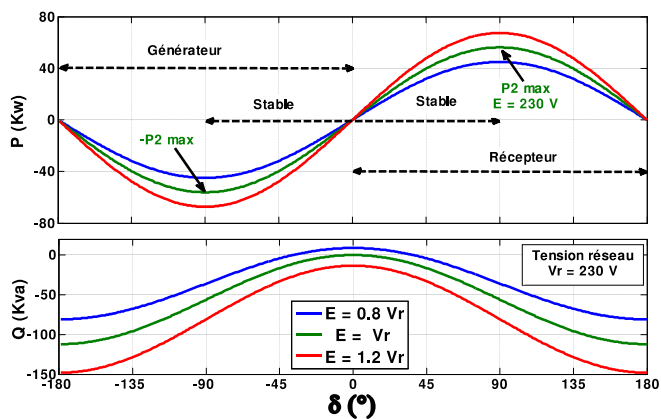


Fig-3- Variations de P et Q fournies par le réseau en fonction de δ . Cas d'une ligne sans pertes ($R=0, L=3$ mH), GED avec stockage (réversible) et imposant une tension E donnée.

Il apparaît que pour une amplitude fixée de la tension E du GED, le déphasage δ de cette dernière par rapport à celle du réseau, devient l'unique paramètre de réglage des échanges en termes de puissance active P avec dans ce cas une limite théorique pour $\delta = \pi/2$ ($P_{max} = EV_r/X$) (Fig-3), soit le double du cas où E n'est pas imposée (Fig-2). Ainsi, le contrôle également recherché de la puissance réactive Q au niveau du GED peut être mené à travers l'amplitude de la tension de sortie E de l'onduleur au point de connexion avec le réseau.

IV- Plan de tension et capacité d'intégration locale

En pratique et faute de stockage, le fonctionnement de l'onduleur en tant que source de puissance s'impose afin de permettre l'injection en temps réel de la totalité de la production du GED (au fil du soleil ou du vent). De ce fait, l'élévation induite de la tension au point de raccordement se heurte à la limite réglementaire imposée par le gestionnaire du réseau dans le cadre de ses obligations contractuelles en matière de qualité de l'énergie fournie. A ce sujet, il est en effet tenu d'assurer le maintien de la valeur efficace de la tension en tout point du réseau dans une fourchette fixe autour d'une valeur nominale. Concernant le réseau national de distribution basse tension (BT), la valeur efficace nominale de cette dernière est fixée à 230 V pour la tension simple et 400 V entre phases. Il est également spécifié que les fluctuations de celle-ci doivent être circonscrites dans une fourchette de valeurs ne dépassant pas $\pm 5\%$ dans les zones urbaines et $\pm 10\%$ dans celles rurales [7].

En se basant sur cette contrainte, une illustration quantitative de la situation est menée sur la base d'une configuration assez simple de distribution BT, comportant six nœuds équidistants dont un seul associe un GED à base d'énergie solaire photovoltaïque (Fig-4-5-6). Les charges passives connectées à ces derniers, sont supposées présenter les mêmes seuils de consommation minimale et maximale en termes de puissance active P_{ch} et réactive Q_{ch} et ce pour des raisons évidentes de simplification. Ces données sont enfin complétées par des caractéristiques réalistes d'une ligne de distribution en milieu rural (Tab-1). Le modèle d'étude d'une telle configuration est reproduit de très près à l'aide des outils du toolbox Simpower-Systems sous Matlab/Simulink. Ainsi une évaluation quantitative par simulation du plan de tension le long de la ligne de distribution considérée, est menée dès la sortie du poste de départ, matérialisé par le transformateur abaisseur alimentant la ligne.

	Puissance active	Facteur de puissance
Charge max. totale	$P_{ch} = 5*8$ KW	0.85
Charge min. totale	$P_{ch} = 5*4$ KW	
Caractéristiques Linéiques /Km	$R = 0.328 \Omega$, $L = 0.307$ mH $C = 10^{-5}$ μF	

Tab-1- Données de simulation

IV-1- Eléments d'analyse du plan de tension

Sachant que l'insertion d'une production décentralisée se traduit par une élévation de la tension dans une zone plus ou moins étendue autour du point de connexion, l'objectif ici est d'évaluer cette dernière afin de vérifier si les règles contractuelles (normes) relatives à cela sont toujours respectées. D'un autre côté, les fluctuations de tension pour une charge donnée étant essentiellement liées à la puissance active injectée par le GED ainsi que les impédances de ligne, plusieurs cas d'analyse sont menés afin de bien illustrer le rôle de l'énergie réactive générée en imposant un facteur de puissance Fp spécifique au GED à travers l'onduleur. En effet, malgré le fait que c'est la puissance active (P_{pv}) générée par le GED qui définit son premier rôle, il reste néanmoins à considérer également sa capacité de générer ou pas de la puissance réactive (Q_{pv}). Cette dernière pouvant être justement un élément déterminant quant à l'optimisation de la puissance utile (P_{pv}) pouvant transiter sans altérer les nombreuses règles définissant la qualité requise de l'énergie échangée. Dans la même optique, sachant que cette dernière peut aussi dépendre de manière notable de la distribution des impédances de ligne autour du GED, l'emplacement de celui-ci, le long de la ligne de distribution, est également considéré. De ce fait, prenant le facteur de puissance Fp du GED ainsi que l'emplacement de son point de raccordement comme paramètres, plusieurs cas d'études sont menés avant de présenter les résultats les plus significatifs.

IV-2- Cas d'un GED à facteur de puissance unitaire

La principale spécificité des lignes de distribution d'énergie électrique en milieu rural, réside dans le fait que les distances entre les différents nœuds sont assez importantes comparées à celles observées en milieu urbain [8]. De ce fait et afin de

simplifier la présentation des résultats relatifs à la configuration étudiée, une distance constante de 1 Km entre nœuds successifs a été adoptée. Un profil simple d'injection d'une puissance croissante par gradins respectifs de 12.5 Kw à partir de zéro (sans GED) et allant jusqu'à 75 Kw a été introduit (Fig-4-5-6). Ces derniers étant maintenus constants sur une durée suffisante pour permettre l'établissement du régime permanent et autoriser les mesures caractéristiques du plan de tension tel que défini par les différents standards correspondants.

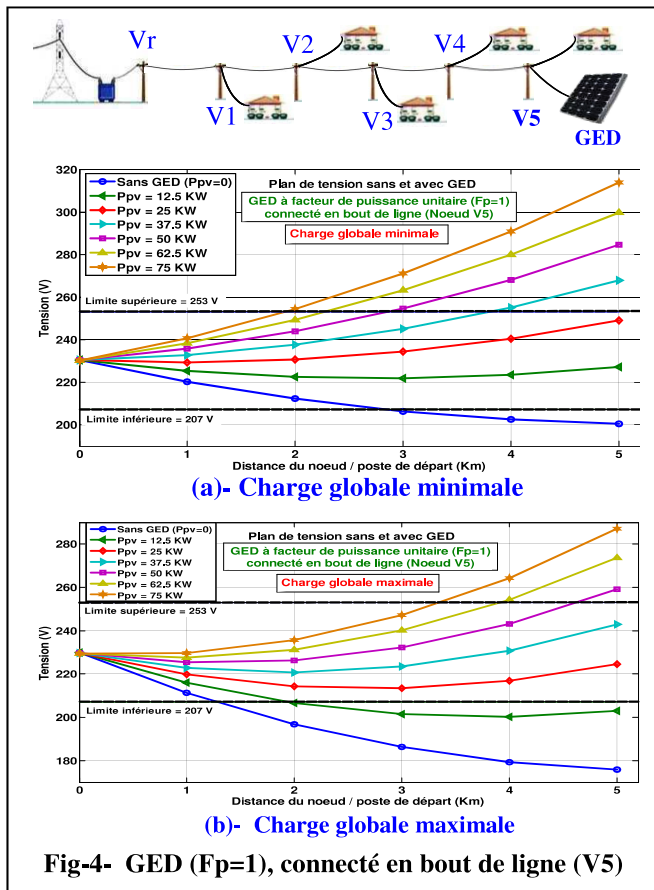


Fig-4- GED (Fp=1), connecté en bout de ligne (V5)

Les résultats obtenus dans ce cas (Fp=1), permettent une appréciation significative des effets escomptés quant à l'introduction du GED considéré. Ainsi, il apparaît bien que c'est le cas avec charge globale minimale qui induit le maximum d'élévation de la tension au point de raccordement (Fig-4-5-6). Donc, c'est à partir de ce cas de figure que doit être évaluée la puissance maximale du GED (Ppv-max), injectée sans transgression de la limite réglementaire imposée (253 V). Une analyse simple des résultats obtenus dans ce contexte précis (Fig-4-a, 5-a, 6-a), permet de déduire quantitativement les seuils suivants (Tab-2) :

Nœud de raccordement	V5	V3	V1
Capacité d'injection autorisée (KW)	25	37.5	75

Tab-2- Capacité d'accueil selon le nœud de raccordement

Ce sont les impédances de ligne relativement élevées entre nœuds successifs assez distants (cas rural), qui expliquent le fait que la limite de la capacité d'accueil peut varier de manière significative selon l'emplacement du point de raccordement du même GED.

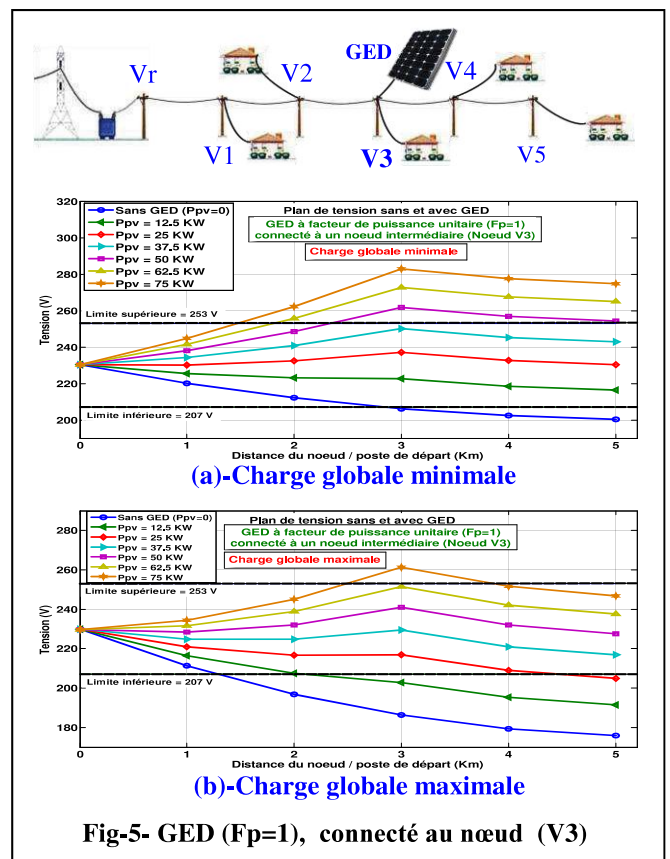


Fig-5- GED (Fp=1), connecté au nœud (V3)

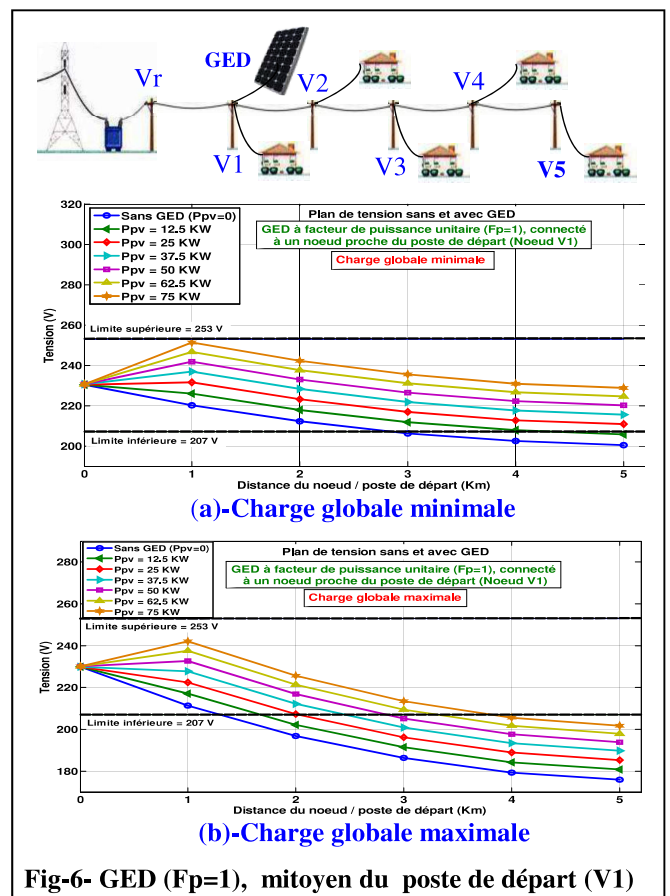


Fig-6- GED (Fp=1), mitoyen du poste de départ (V1)

En présence d'une charge globale maximale, il est notable que c'est plutôt le problème typique de baisse de tension, qui trouve sa solution dès que l'apport de puissance active du GED dépasse un seuil donné (Fig-4-b, 5-b). Il reste

cependant entièrement posé dans le cas du GED placé tout près du poste de départ (Fig-6-b). A noter que cette remarque peut être avantageusement mise à profit pour régler les problèmes récurrents de baisse excessive de tension pour les clients les plus éloignés du poste de départ de la ligne. Ceci est notamment le cas au niveau national, lors des pics de consommation en phase avec l'ensoleillement d'été et essentiellement dû au recours excessif à la climatisation.

IV-3- Cas d'un GED avec réglage de puissance réactive

La puissance active P_{pv} injectée en temps réel par le GED étant strictement liée à la source renouvelable primaire (au fil du soleil ou du vent), le réglage de la puissance réactive reste à priori la seule alternative permettant de pallier au problème induit de l'élévation de la tension. En effet, l'objectif ici est de faire chuter la tension au point de raccordement au dessous du seuil imposé afin d'autoriser plus de puissance active à transiter, tout en respectant le plan de tension réglementaire. Ainsi, en plus du contrôle de P_{pv} , le réglage de la puissance réactive Q_{pv} au niveau de l'onduleur de connexion est également devenu une option incontournable. Dans ce contexte, ce sont plusieurs approches liées à la caractéristique même de réglage de Q_{pv} qui ont vu le jour dans le but de satisfaire les exigences spécifiques imposées par le gestionnaire du réseau concerné. Ce sont justement les deux alternatives les plus utilisées parmi ces dernières, qui sont analysées ici en vue de valider leur apport effectif quant à l'amélioration de la capacité d'accueil, comparativement au cas précédent avec onduleur à facteur de puissance unitaire.

IV-3-1- GED avec facteur de puissance imposé

Selon les résultats obtenus précédemment avec un onduleur à facteur de puissance unitaire (Fig-4-5-6), seuls les deux premiers cas (GED raccordé à V3 et V5) nécessitent le réglage de Q_{pv} afin d'augmenter le taux de puissance P_{pv} active injectée par rapport à celle disponible (75 KW). Ainsi, en imposant au GED un fonctionnement avec un facteur de puissance inductif ($F_p=0.9$), les seuils de puissance active injectée P_{pv} n'induisant pas un dépassement de la tension limite, passent respectivement à l'échelon supérieur (Fig-7):

- 50 KW au lieu de 37.5 KW (GED connecté au nœud V3)
- 37.5 KW au lieu de 25 KW (GED connecté au nœud V5)

IV-3-2- GED avec facteur de puissance variable

Dans le cas précédent, l'objectif initial d'augmenter le seuil de la puissance active injectée est atteint grâce à l'adoption d'un facteur de puissance F_p exclusivement inductif. Si la baisse de tension désirée reste favorable dans ce cas en présence d'une charge globale minimale, elle peut cependant aggraver la situation en cas de charge globale maximale. En effet, c'est la limite inférieure de la tension imposée par la réglementation (207 V) qui est doublement transgressée dans ce cas, notamment par l'effet inductif supplémentaire introduit ($F_p=0.9$ inductif). Afin de pallier à un tel inconvénient, une seconde alternative, réalisant un réglage plus ciblé de Q_{pv} en fonction de la tension au point de raccordement, est adoptée. En effet, le principe d'un facteur de puissance variable (P_{pv} imposé) étant toujours maintenu, cette approche permet d'ajuster Q_{pv} en signe (inductif ou capacitif) et en amplitude en fonction de l'écart de la tension par rapport à sa valeur nominale V_n (Fig-8).

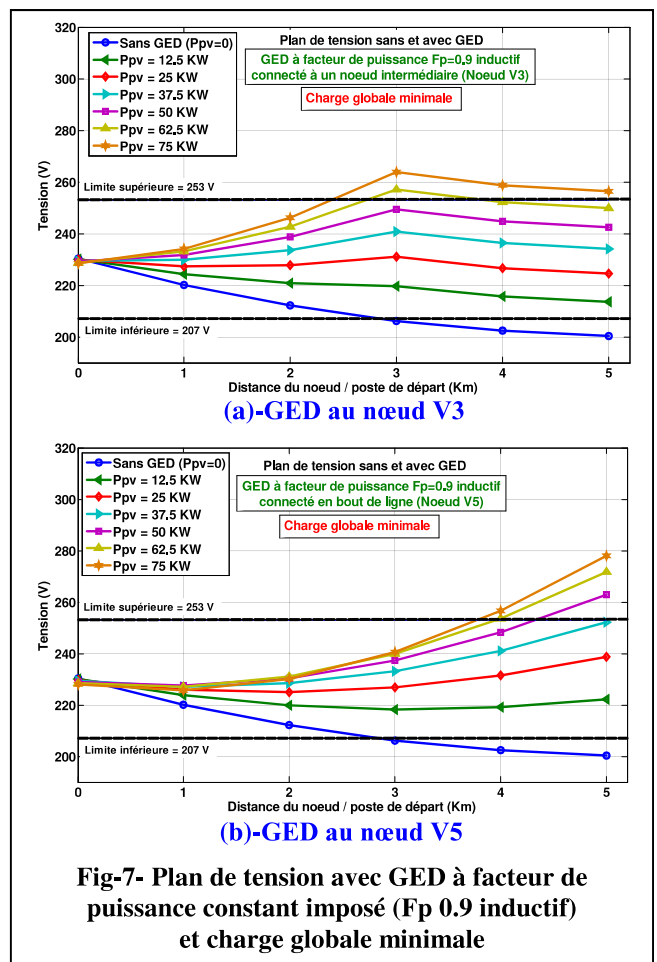


Fig-7- Plan de tension avec GED à facteur de puissance constant imposé (F_p 0.9 inductif) et charge globale minimale

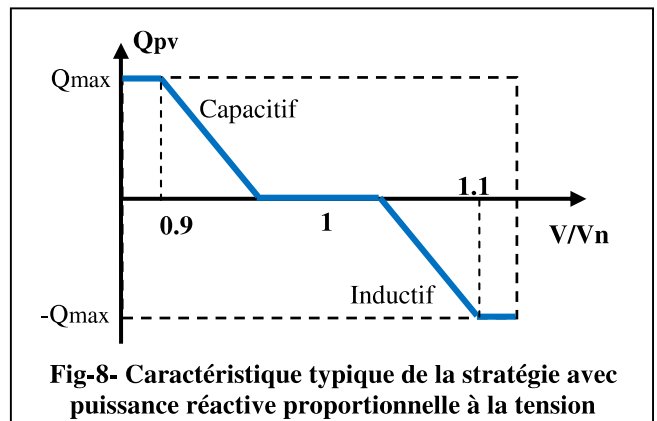


Fig-8- Caractéristique typique de la stratégie avec puissance réactive proportionnelle à la tension

Suite à l'implémentation de la stratégie ainsi définie, deux essais sont menés avec charge globale minimale puis maximale afin de solliciter les deux zones de fonctionnement avec puissance réactive inductive et capacitive (Fig-9-a et c). En adoptant une évolution linéaire de P_{pv} entre 0 et 75 KW (Fig-9-a) et non par paliers de 12.5 KW comme précédemment, une évaluation assez fine de l'amélioration attendue peut être menée. Comme résultat, la plage permise à l'injection de puissance active P_{pv} par le GED, est plus étendue dans ce cas (10 à 35 KW). Ceci étant que ce soit avec charge globale maximale ou minimale, au lieu de 15 à 28 KW avec, $F_p=1$ ($Q_{pv}=0$; Fig-9-b). Quant aux résultats montrant l'évolution de Q_{pv} en fonction de la tension au point de raccordement (V5) du GED, ils illustrent bien le fait que la caractéristique de contrôle de la puissance réactive adoptée (Fig-8), a été efficacement implémentée (Fig-9c).

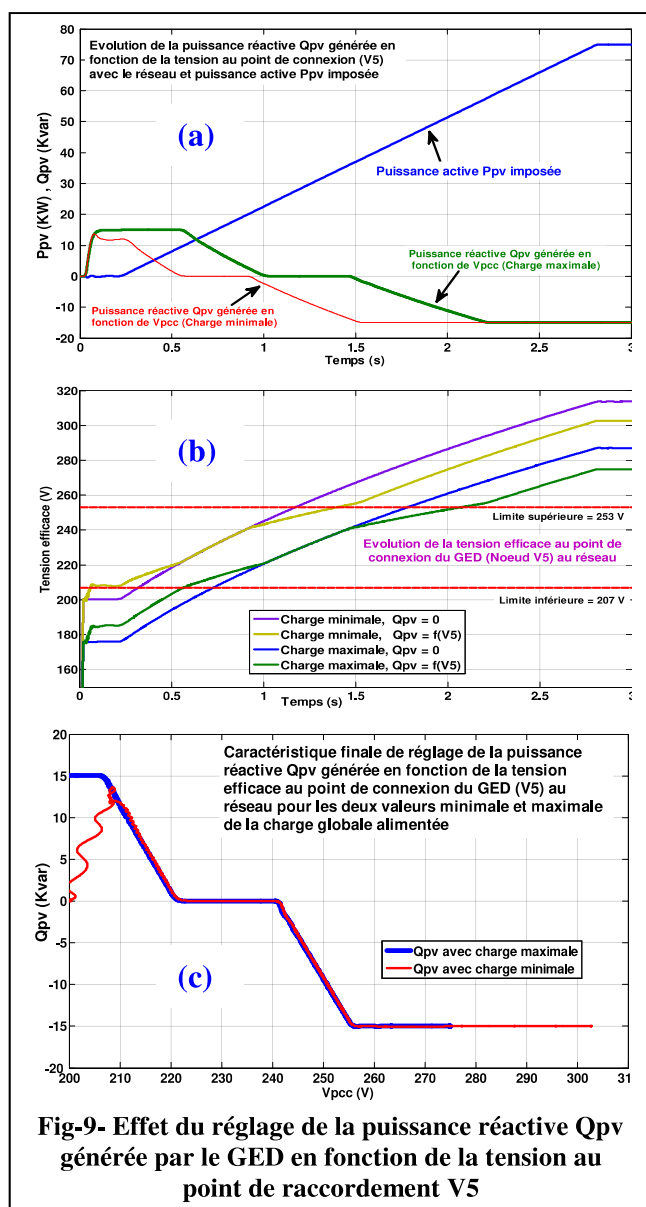


Fig-9- Effet du réglage de la puissance réactive Q_{pv} générée par le GED en fonction de la tension au point de raccordement V_5

V- Conclusion

Une démarche assez simple a été suivie afin d'illustrer une des nombreuses contraintes techniques qui peuvent à priori limiter l'accès au réseau de distribution des productions réparties notamment à base de ressources renouvelables. Les conséquences de l'inhérente élévation locale de la tension autour du point de raccordement des GED, fonctionnant en source de puissance et non de tension, ont ainsi été mises en évidence et analysées. En utilisant comme support une configuration radiale simple mais assez représentative du réseau de distribution, plusieurs cas d'étude ont été menés. A cet effet, ce sont l'emplacement du point de raccordement du GED et la stratégie spécifique à celui-ci en matière de génération d'énergie réactive, qui ont servi de paramètres. Dans ce contexte, le premier scénario a consisté à mener des simulations en présence d'un onduleur à facteur de puissance unitaire. Une évaluation quantitative du seuil maximum de puissance active pouvant être injecté conformément à la réglementation du plan de tension en vigueur, a ainsi été menée. Les résultats, prévisibles dans ce cas, ont surtout donné lieu à une évaluation quantitative des seuils admissibles selon l'emplacement considéré du point de

raccordement du GED. Ces derniers, servant de référence, ont ainsi permis de quantifier l'avantage d'un réglage simultané de la puissance réactive en vue d'améliorer la capacité d'accueil de celle active, tout en respectant le plan de tension réglementaire. Dans cette perspective, deux alternatives ont été considérées et analysées selon le choix de la stratégie de contrôle adoptée. Ainsi, en optant en premier pour un onduleur assurant un facteur de puissance inductif constant, une augmentation notable de la puissance active injectée a pu être observée. Toutefois, sachant que cela engendrait de fait une baisse de tension supplémentaire préjudiciable en cas d'une charge élevée, une deuxième approche a été introduite. Celle-ci repose en effet sur une caractéristique de réglage permettant d'ajuster la puissance réactive échangée en signe (inductif ou capacitif) et en amplitude en fonction de l'écart de la tension, mesurée au point de raccordement, par rapport à sa valeur nominale. Les résultats obtenus et présentés dans ce cas, illustrent bien le fait qu'un tel réglage répond, dans une certaine mesure, à l'ensemble des problèmes de plan de tension, typiques à l'intégration des productions décentralisées d'électricité au réseau, notamment celles à base de ressources renouvelables.

Bibliographie

- [1]-REN21. 2017, "Renewables 2017 Global Status Report". ISBN 978-3-9818107-6-9.
- [2]- Jens. C. Boemer et al, "Overview of German Grid Issues and Retrofit of Photovoltaic Power Plants in Germany for the Prevention of Frequency Stability Problems in Abnormal System Conditions of the ENTSO-E Region Continental Europe", 1st International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems, 24 October 2011, Aarhus, Denmark
- [3]- M. Crappe, "Contraintes techniques de l'intégration de la production décentralisée aux réseaux électriques", Revue Evtuijedschrift N°2/2002, pp.,37-41 de la Société Royale Belge des Électriciens
- [4]- H. Colin, C. Duvauchelle, G. Moine, Y. Tanguy, B. Gaidon (HESPUL), T. Tran-Quoc, "Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension", Rapport ESPRIT, ADEME, Avril 2010.
- [5]- Thomas Ackermann et al. "Scaling up variable renewable power: The role of Grid Codes", IRENA Report 2016.
- [6]- Jean-Louis LILIE, "Transport et Distribution de l'Énergie Électrique – Manuel de travaux pratiques", Cours_Université de Liège, Belgique, 2000.
- [7]- "Art. 5 .du décret exécutif n° 10-138 du 28 du13/05/2010, fixant les règles techniques de conception, d'exploitation et d'entretien des réseaux de distribution de l'électricité et du gaz", Journal Officiel de la RADP, N° 33 du 19 mai 2010
- [8]- Rita Pinto, Sílvio Mariano, Maria do Rosário Calado and José Felipe de Souza, "Impact of Rural Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems on Power Quality", Energies 2016, 9, 739; doi:10.3390/en9090739.

Conception, élaboration des matériaux céramiques transparents dopés de terres rares optimisées pour amélioration du rendement dans des dispositifs photovoltaïques

C. Bensalem^{#1}, E. Boulma^{#2}, M. Diaf^{#3}, S. Khiari^{*4}

[#]Laboratoire de Physique des Matériaux Lasers et de Spectroscopie Optique
Département de Physique, Université d'Annaba, BP 12, 23000 Annaba (Algérie)

^{*}Université Chadli Bendjedid d'El-Tarf

¹bensalemww@yahoo.fr

Abstract:

Glass-ceramics (50GeO₂ – 40PbO – 10PbF₂ with xEuF₃, x = [0.5; 1; 1.5; 2]) and polycrystalline ceramics with composition 100PbF₂:yEuF₃ with different Eu³⁺ ion concentrations have been prepared and characterized through photoluminescence and decay times. For each material, the photoluminescence spectrum and the photoluminescence lifetimes of the ⁵D₀, ⁵D₁ and ⁵D₂ Eu³⁺ levels are measured. The phase β-PbF₂:Eu³⁺ and the nanocrystallites in the glass-ceramics are confirmed. In the β-PbF₂:Eu³⁺ ceramics and glass-ceramics, Eu³⁺ ions replace Pb²⁺ in their regular cubic site, but they interact together to form dimers and higher nuclearity clusters. For the EuF₃ rates investigated here, there are no isolated Eu³⁺ ions in the PbF₂ lattice. A preliminary investigation of the optical properties of co-doped β-PbF₂:Gd³⁺-Eu³⁺ ceramics was also performed. It shows that efficient Gd³⁺ → Eu³⁺ energy transfer occurs in these ceramics. The Pb²⁺ ions of the lattice may also be involved in the energy transfer process.

Keywords—oxyfluoride glasses, glass-ceramic, europium, fluorescence, thermal analysis, crystallisation

I. INTRODUCTION

Les cristaux fluorures et les verres fluorés ont été largement étudiés dans le domaine de l'amplification optique. Ils servent de matrices hôtes pour les ions de terre rare à cause de leur transparence, leur basse énergie de phonons et de leur grande solubilité vis à vis des ions de terre rare. Les matériaux vitrocéramiques transparents offrent une alternative aux monocristaux et aux verres en combinant les avantages respectifs de ces deux types de matrice ; ce sont des matériaux composites constitués d'une phase amorphe dans laquelle sont réparties des cristallites de taille nanométrique, qui offrent des sites de substitution aux ions de terre rares.

Notre travail est axé principalement sur les verres de fluorogermanates de plomb dopés par des ions Europium (Eu³⁺) et Gadolinium (Gd³⁺) qui après un traitement thermique (la dévitrification) on obtient des vitrocéramiques fluorescentes transparentes contenant des nanocristaux de PbF₂ dans lesquels sont insérés les ions Eu³⁺ et Gd³⁺ [1–7]. L'ion Gadolinium est connu par son absorption du rayonnement UV, son diagramme énergétique ne présente pas de niveaux d'énergie dans le domaine visible et ses niveaux sont situés dans l'UV [8]. Dans le cas d'un codopage par les ions de terre rare (Eu³⁺) (Gd³⁺), il y aura un transfert d'énergie entre les deux ions permettant d'avoir deux transitions dans le domaine visible. Ce phénomène est connu

sous l'appellation transfert d'énergie par division de photons (energy transfer by dividing photons). Un tel mécanisme est utile pour la conversion du rayonnement UV du faisceau solaire en rayonnement visible afin d'augmenter le rendement des photopiles solaires.

II. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

A. Synthèse et caractérisation thermique des phases élaborées

Nous voulons élaborer les systèmes verriers oxyfluorés à base de germanates dans le but d'obtenir la phase verre transparente à partir d'un mélange des poudres suivantes : GeO₂, PbO, PbF₂ et TRF₃ (TR=Terre rare : Eu et Gd) dans les proportions 50GeO₂ – 40PbO -10PbF₂ et xTRF₃ (avec x = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0). A l'aide d'un four d'élaboration, ce mélange est porté à une température de 1050°C. Cette étape nous permet d'obtenir généralement les phases verres [9-13]. Le verre obtenu est transparent et bien consolidé.

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés aux codopages avec xEu - yGd avec (x, y) = [(0.5, 0.5); (0.5, 1.0); (1.0, 0.5); (1.0, 1.0)] pour les céramiques fluorogermanates de plomb. Nous avons choisi le couple EuF₃/GdF₃ à cause de son intérêt dans le domaine des transferts d'énergie par division de photons.

La vérification de la phase cristallisée a été faite par un diffractogramme à rayons X sur poudre model Siemens D 5000 à deux cercles avec un monochromateur secondaire opérant en géométrie focalisante par réflexion de type Bragg-Brentano. La source de rayons X est fixe et provient d'une anticathode de cobalt ($\lambda_{\text{K}\alpha 1} = 1.7889 \text{ \AA}$, $\lambda_{\text{K}\alpha 2} = 1.79285 \text{ \AA}$). Des mesures d'ATD ont été effectuées en utilisant un analyseur symétrique Setaram (TAG 24) pour étudier tous les effets thermiques apparentés à cette phase vitreuse: température de transition vitreuse, température de fusion et de cristallisation. A l'aide d'un four de recuit, les échantillons sont chauffés jusqu'à 850°C avec une vitesse de 10°C/min pour obtenir les phases vitrocéramiques.

Nous avons synthétisé des pastilles céramiques de PbF₂ monodopées europium et codopées Eu/Gd avec des concentrations équivalentes aux concentrations dans les vitrocéramiques monodopées europium et codopées Eu/Gd **figure 1**.

Des spectres de diffraction de rayons X sont aussi réalisés pour les pastilles élaborées.

B. Utile de la caractérisation par DRX

Les diagrammes DRX correspondant aux compositions vitrocéramiques sont superposés sur la **figure 2**. Tous les échantillons présentent une cristallisation de la phase β -PbF₂. L'exploitation de ces diffractogrammes a permis de déduire le paramètre de maille (Eq 1), la taille des cristallites (Eq 2) ainsi que le taux de cristallisation (Eq 3). Les résultats de cette analyse sont regroupés dans le **Tableau I**.

A titre d'exemple, la **figure 3** représente le diffractogramme de la céramique dopée 15% europium et qui montre nettement la phase cubique des PbF₂.

III. ETUDE SPECTROSCOPIQUE

A. Introduction

Des spectres de luminescence ont été enregistrés à température ambiante sous une excitation en longueur d'onde de 393 ou à 467 nm dans les niveaux ⁵L₆ ou ⁵D₂ de l'ion europium respectivement. Une source d'excitation pulsée (OPO pompé par la 3^{ème} harmonique d'un laser YAG:Nd) et une caméra CCD interfacée avec un ordinateur nous ont permis l'enregistrement des déclin de la fluorescence. Les durées de vie des niveaux fluorescents ⁵D₀, ⁵D₁, ⁵D₂ de l'ion Eu³⁺ ont été déterminées et ainsi que des émissions issues des niveaux ²D₂, ⁵D₁ et ⁵D₀ ont été observées.

B. Etude spectroscopique des céramiques codopées

Nous avons enregistré les spectres d'excitation de la luminescence rouge (612nm) des ions Eu sur deux matrices céramiques de PbF₂. La première monodopée Europium à 15% et la deuxième codopée Europium à 5% et Gadolinium à 10%. Le spectre a été enregistré dans le domaine spectral UV-Visible (200 nm – 500 nm). La comparaison des deux spectres montre bien l'absorption des niveaux UV du gadolinium aux positions $\lambda_1 = 273.5$ nm, $\lambda_2 = 305.3$ nm et $\lambda_3 = 311.6$ nm (**Figure 4**). Ces bandes d'absorption des ions Gd³⁺ sont associées respectivement aux transitions ⁸S_{7/2} → ⁶I₇, ⁸S_{7/2} → ⁶P_{5/2} et ⁸S_{7/2} → ⁶P_{7/2}. On peut confirmer qu'il y a un transfert d'énergie des ions Gd³⁺ vers les ions Eu³⁺. Ce comportement a été déjà observé sur les échantillons vitrocéramiques plus riches en europium; ceci peut s'expliquer avec l'idée que le transfert Gd → Eu s'estompe **Figure 5** lorsque la concentration en europium vis-à-vis de celle du gadolinium est importante.

IV. CONCLUSION

La synthèse des phases vitrocéramiques transparentes 50GeO₂ – 40PbO – 10PbF₂ codopées Eu³⁺, Gd³⁺ a été réalisée. Nous avons élaboré aussi des phases céramiques avec le même rapport de la concentration du dopant. La caractérisation par DRX marque bien l'évolution du paramètre de maille avec la concentration accuse l'insertion du dopant dans la phase cristallisée.

L'étude spectroscopique a montré qu'il y a un transfert d'énergie efficace entre les ions Gd³⁺ et Eu³⁺ dans la la matrice céramique β -PbF₂: EuF₃: GdF₃ où les ions actifs

gadolinium et europium ont tendance à former des dimères mixtes.

V. EQUATION

“Eq. (1)” : Paramètre de maille a.

“Eq. (2)” : Formule de Scherrer pour la taille des cristallites

“Eq. (3)” : Taux de cristallisation.

$$a = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \cdot \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \quad (1)$$

$$L = K \frac{\lambda_{\alpha 1}(Co)}{\Delta(2\theta) \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

$$R_{DRX} = \frac{\text{Aire des quatre pics de la phase cristalline}}{\text{Aire totale du diagramme de DRX}} \cdot 100 \quad (3)$$

VI. TABLEAUX et FIGURES

Tableau I : Données de la simulation des pics de diffraction des diagrammes DRX relatives aux vitrocéramiques GPbFxEuYgD

Echantillon	R%	L (nm)	a (Å)
GPbFx0.5Eu0.5Gd	6	18.1 ± 1.7	5.875 ± 0.002
GPbFx1.0Eu0.5Gd	15	16.7 ± 1.4	5.879 ± 0.002
GPbFx0.5Eu1.0Gd	14	14.4 ± 1.3	5.867 ± 0.002
GPbFx1.0Eu1.0Gd	14	14.4 ± 1.6	5.867 ± 0.002

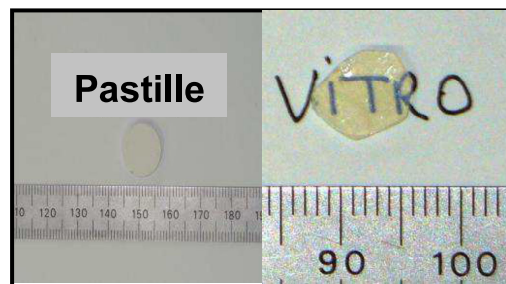


Fig 1 ; Vitrocéramique codopée (1Eu³⁺/0.5Gd³⁺) et pastille frittée de PbF₂:Eu³⁺ (15% mol.).

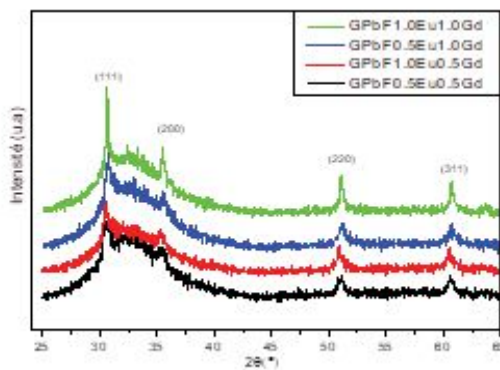


Fig 2 : Diagramme DRX des vitrocéramiques GPbFxEu_yGd

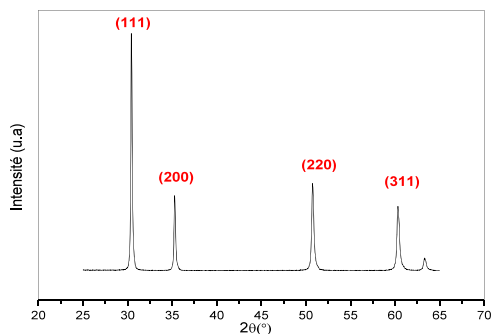


Fig 3 : Diagrammes DRX de la céramique dopée 15% europium

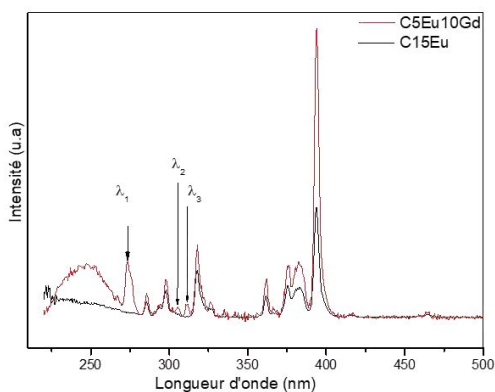


Figure 4: Comparaison entre le spectre d'excitation de la luminescence à 612 nm de la céramique C5Eu10Gd et le spectre d'excitation de la céramique C15Eu

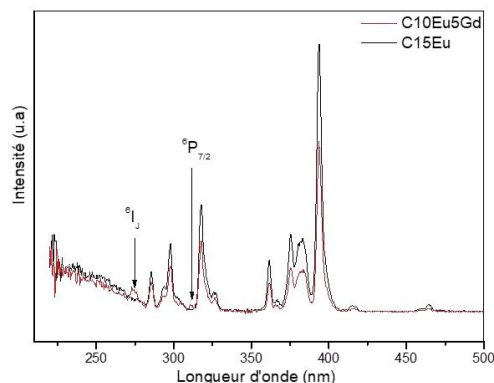


Figure 5 : Comparaison entre le spectre d'excitation de la luminescence à 612 nm de la céramique C10Eu5Gd et le spectre d'excitation de la céramique C15Eu

REFERENCES

- [1] S. J. L. Ribeiro, O. L. Malta, G. F. de Sá, J. Dexpert-Ghys, B. Piriou, H. Dexpert, V. R. J. Alloys and Compounds 180 (1992) 117-124
- [2] B. Klimesz, G. Dominiak-Dzik, P. Solarz, M. Zelechower, W. Ryba-Romanowski. J. Alloys Comp. 403 (2005) 76-85.
- [3] S. J. L. Ribeiro, Y. Messaddeq, L. A. Bueno, J. Dexpert-Ghys, A. S. Gouveia-Neto, C. C. Tambelli, J. P. Donoso, C. Magon . Materials Science Forum 514-516 (2006) 1299-1304.
- [4] L. A. Bueno, A. S. Gouveia-Neto, E. B. da Costa, Y. Messaddeq, S. J. L. Ribeiro. J. Phys.: Condens. Matter. 20 (2008) 145201 p7.
- [5] J. Méndez-Ramos, V. Lavin, I. R. Martin, U. R. Rodriguez-Mendoza, V. D. Rodriguez, A. D. Lozano-Gorin, P. Nuñez. J. Appl. Phys. 89 (2001) 5307-5310.
- [6] J. Méndez-Ramos, V. Lavin, I. R. Martin, U. R. Rodriguez-Mendoza, V. D. Rodriguez, A. D. Lozano-Gorin, P. Nuñez. J. Appl. Phys. 94 (2003) 2295-2301.
- [7] K. Driesen, V. K. Tikhomirov, C. Görrler. J. Appl. Phys. 102 (2007) 024312-1 to 6.
- [8] R. Rolli, G. Samoggia, M. Bettineli, A. Speghini, M. Wachtler. J. Non-Crystalline Solids 288 (2001) 114-120
- [9] M. Mortier, F. Auzel, *J. Non Cryst. Solids* 256-257 (1999) 361.
- [10] M. Mortier, G. Patriarche, *J. Mater. Sci.* 35 (2000) 4849.
- [11] M. Mortier, A. Monteville, G. Patriarche, *J. Non Cryst. Solids* 284 (2001).
- [12] M. Mortier, *J. Non Cryst. Solids* 318 (2003) 56.
- [13] M. Mortier, C. Chateau, M. Génotelle, N. Gardant, *J. Non Cryst. Solids* 326-327(2003).

Energies Renouvelables, Energies Non Renouvelables et Croissance Economiques en Tunisie. Cas d'Electricité

KARMI Houcine^{#1}, BEN ZINA Naceur^{*2}

Laboratoire de Recherche Interdisciplinaire en Discours, Art, Musique et Economie, Université de Sfax
Tunisie

¹karmihoucine@yahoo.fr

²nas.benz@fsegs.rnu.tn

Résumé— En raison de la préoccupation croissante concernant les dangers écologiques qui pèsent sur notre planète dont notamment, le réchauffement climatique et la dépendance énergétique, les sources énergétiques renouvelables sont perçues depuis plusieurs années comme solution à cette problématique car elles pourraient se substituer aux sources d'énergie fossile. Le présent article a pour objectif d'analyser la substitution énergétique et ses effets sur la croissance économique en Tunisie. Pour se faire, on utilise la méthode VAR et le test de causalité de Granger afin d'étudier la relation dynamique entre la génération d'électricité d'origine non renouvelable, la génération d'électricité d'origine renouvelable et la croissance économique tunisienne pour la période 1992-2016. Les résultats suggèrent que le développement d'énergies renouvelables favorise l'économie tunisienne en améliorant une croissance économique compatible à l'environnement et au bien être sociale, voire assurer le développement durable.

Mots clés— Croissance économique, Sources énergétiques renouvelables, Sources énergétiques non renouvelables, Substitution énergétique, Tunisie, VAR.

I. INTRODUCTION

Le réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre (CO₂) et la dépendance énergétique, sont les nouveaux défis que doit affronter l'humanité aujourd'hui, et auxquels elle doit trouver une réponse pour assurer un développement durable. C'est le nouveau modèle de développement qui « répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins »¹ et consiste à lier trois domaines qui

sont à la fois complémentaires et souvent rivaux : le développement économique, la protection de l'environnement et le bien-être social. Dans ce contexte, la communauté internationale a pris conscience, depuis la fin des années 60, que la forte croissance démographique conjuguée avec une croissance économique basée sur l'expansion de l'industrie et l'utilisation intensive de l'énergie fossile et que par conséquent, outre l'économique et le social, l'aspect environnemental avait été omis [1] C'est pour cette raison et vu de la préoccupation croissante concernant les dangers écologiques qui pèsent sur notre planète, les sources énergétiques renouvelables sont perçues depuis plusieurs années comme solution à cette problématique car elles pourraient se substituer aux sources d'énergie fossile.

La Tunisie n'est pas restée en marge de cette vague de changement. Elle doit à son tour relever le défi de la transition énergétique dont l'objectif est de parvenir à concilier un développement socio-économique durable et la maîtrise de ses besoins en énergie. Puisqu'il pose à la fois la question de l'approvisionnement énergétique et celle de la protection de l'environnement, l'enjeu est de taille. De ce fait, la question énergétique est centrale et elle constitue l'une des problématiques majeures de la Tunisie.

La lutte entre les sources énergétiques ne date pas d'hier. Cela a toujours été au centre de grand débat entre nombreux chercheurs multidisciplinaires. Cependant, La littérature n'est pas encore parvenue à un accord général sur la nature des relations de cause à effet entre l'énergie et la croissance économique qui fait l'objet de plusieurs travaux empiriques distingués par trois volets. Le premier volet a étudié le rapport causal entre la consommation d'énergie et le produit intérieur brut PIB ([2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9] [10], [11], [12], etc.) ; le deuxième volet a étudié le rapport causal entre consommation d'énergies renouvelables et croissance économique ([13], [14],[15], [16], [17], [18], etc.) ; et le troisième volet a étudié le rapport causal entre consommation d'énergies renouvelables, consommation d'énergies non-renouvelables et croissance économique ([19], [20], [21], etc.)

Notre étude s'inscrit dans le contexte du troisième volet de recherche (énergies renouvelables, énergies non-renouvelables et croissance économique), mais avec une analyse qui s'est fait en termes de production. On se propose de tester la relation

¹ Notre avenir à tous Brundtland, 1987

dynamique entre croissance économique et les sources énergétiques renouvelables et non renouvelables utilisées dans la production de l'électricité en Tunisie. En connaissant le sens de causalité entre ces variables, il devient facile de choisir la mise en œuvre de la politique énergétique appropriée afin d'éviter les politiques de la maîtrise de l'énergie et/ou de déploiement de l'énergie renouvelable qui peuvent retarder l'activité économique dans ce pays.

A ce titre, la structure du reste de ce document est organisée autour de trois sections. La deuxième section décrit le contexte économique et énergétique de la Tunisie. La troisième section sera consacrée à l'estimation économétrique et à l'analyse des résultats empiriques. Enfin, la quatrième section amène la conclusion et les recommandations de politiques économiques.

II. ENERGIE EN TUNISIE : ETAT DES LIEUX ET ENJEUX

Depuis sa Révolution, la Tunisie a connu une phase transitoire marquée par une cascade de crises (politique, sociale, économique, énergétique, etc.) conjuguée aux crises régionales et internationales. En plus, comme le soulignent tous les observateurs nationaux et internationaux, l'avenir sera plus difficile en absence de mesures efficaces et urgentes sur tous les niveaux. L'une des questions centrales qu'au quelle la Tunisie doit trouver une réponse, c'est la question énergétique. En effet, le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (EE et EE) sont les premiers jalons de l'économie verte et les deux piliers de la politique énergétique tunisienne.

Cette section va donner une brève description du contexte énergétique tunisienne en discutant ses enjeux économiques et les marges de manœuvre de la Tunisie en termes d'énergies.

A. Aperçu sur le secteur d'énergie

Le secteur énergétique qui assume un rôle vital dans l'économie et la société tunisienne est aujourd'hui paralysé au niveau de la prospection, de la production et de l'exploitation. Ce qui aggrave le déficit énergétique enregistré depuis l'année 2000 dans le sens où le pays est absolument importateur en la matière sachant qu'il était excédentaire jusqu'au milieu des années 90. A partir de cette période et sur la base des données du graphique ci-dessous (fig1), on remarque une consommation d'énergie explosive de plus de 450% en 33 ans, tandis que la production n'a augmenté que de 70% pour la même période.

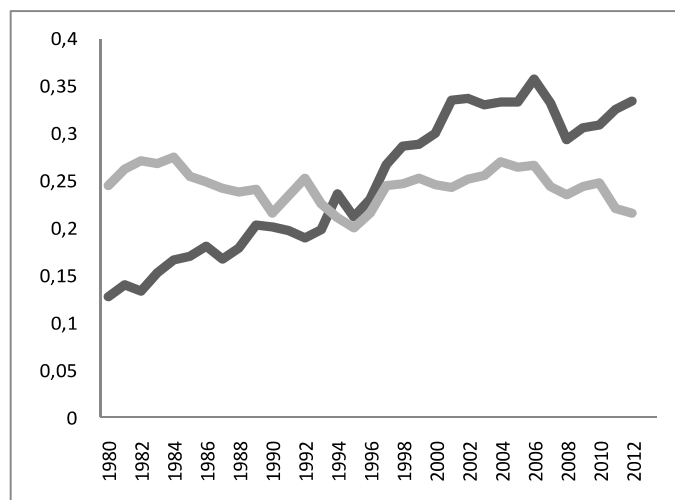


Fig1. Production vs Consommation d'énergie en Tunisie (1980 – 2012)

En plus, l'Agence nationale de maîtrise de l'énergie prévoit une multiplication par trois du niveau de la consommation d'énergie primaire à l'horizon 2030 [22]. Par ailleurs et selon les statistiques de l'agence internationale d'énergie [23], La Tunisie s'appuie à 98 % sur les combustibles fossiles, et particulièrement sur le gaz naturel, pour produire l'électricité nationale en 2013. Alors que le mix renouvelable qui regroupe l'hydraulique, l'éolien et le solaire photovoltaïque n'en représente que 2 %.

B. Equation énergétique nationale difficile

Depuis que la Tunisie est passée du statut exportateur à celui d'importateur net d'hydrocarbures, les débats font rage entre les optimistes et les pessimistes, pour qui il est urgent de prendre au sérieux le dossier national d'énergie. Les optimistes qui font confiance aux ressources naturelles, à la capacité d'innovation et à l'ingéniosité technologique de l'homme tunisien pour surmonter ces obstacles, ont confirmé que le pays est riche en matières pétrolières et gazières. Alors que les pessimistes, qui se veulent néanmoins réalistes, nous en rappellent de l'instant à l'autre de la rareté des ressources naturelles.

Entre abondance et rareté, le cas tunisien des sources énergétique est devenu plus inquiétant. Ceci s'explique par le fait que: disposant d'un potentiel très important de sources non renouvelables (pétrole, gaze, etc.) et renouvelables (soleil, vent, biomasse, etc.), la Tunisie est diversifiée mais n'arrive toutefois pas à développer un secteur capable de s'auto-suffire, dont la consommation ne cesse à augmenté d'une année à l'autre.

Cette situation est conjuguée avec un vrai handicap pour le pays lorsque l'on sait que les prix des combustibles fossiles ont quintuplé en l'espace d'une dizaine d'années en Tunisie et que l'Etat subventionne la filière en continu afin de garantir un prix accessible pour les consommateurs. Ainsi, un dilemme difficile à résoudre entre allègement des enjeux sociaux et

environnementaux et la précarité énergétique et la qualité de vie. Les dépenses énergétiques qui affectent de plus en plus la compétitivité de l'économie nationale, rendant les subventions publiques à l'énergie de plus en plus lourdes, soit environ 10.7% du budget de l'Etat et 4% du PIB pour l'année 2013 [24], accentuent les pressions sur les systèmes énergétiques et les risques sur l'économie tunisienne. Ces risques se présentent sous plusieurs formes : dépendance accrue vis-à-vis des énergies fossiles, aggravation du déficit énergétique, vulnérabilité par rapport à l'augmentation des prix internationaux de l'énergie, alourdissement de la facture énergétique nationale, mise en péril des équilibres du budget de l'Etat du fait du soutien aux prix de l'énergie, etc.

C. Transition énergétique

De nombreux spécialistes et chercheurs de différentes disciplines scientifiques, politiques et économistes ont exprimé l'intérêt particulier que présente ce sujet, notamment, la réalisation d'une transition énergétique, même si cette expression a fait récemment son apparition dans la communication gouvernementale. En optant à de nouvelles sources d'énergie, qui prennent en considération les richesses naturelles et les spécificités régionales et nationales, et au transfert de la technologie, il s'agit d'un nouveau modèle économique qui vise à : créer la richesse, promouvoir l'emploi, respecter l'environnement et en trouver des solutions adéquates aux problèmes de l'inflation croissante de la subvention accordée au secteur énergétique.

Selon les spécialistes, la production de l'énergie verte en Tunisie dépassera celle de l'énergie fossile à l'horizon de 2030 [25]. À cet horizon, la consommation nationale d'énergie primaire devrait diminuer de 34 % et la production d'électricité d'origine renouvelable doit atteindre 30% [22]

Nous semble claire que l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables constituent les deux piliers principaux de la transition énergétique tunisienne, et que la mise en œuvre de cette dernière repose en grande partie sur la substitution entre les ressources énergétiques. Par conséquent, les décideurs politiques ont besoins de savoir le sens de causalité entre ces types de ressources et la croissance de PIB afin d'éviter des scénarios qui peuvent retarder l'activité économique dans ce pays.

Ce type d'étude empirique sera l'objectif principal de ce qui suit en choisissant le cas de l'électricité, pierre angulaire de l'économie tunisienne, comme un exemple.

III. INVESTIGATION ECONOMETRIQUE

A. Spécification du modèle utilisé

Le cadre théorique de notre modèle s'inscrit dans celui de l'approche de l'économie écologique développé par Georgescu-Roegen (1978) [26]. Contrairement aux économistes néoclassiques, cette approche a incité de nombreux économistes [27], d'intégrer l'énergie comme facteur essentiel de production autre que les facteurs traditionnels (travail et capital) de Solow (1956).

S'inspirant de ces travaux, la production (Y) dépend d'énergie (E), de travail (L) et de capital (K) et elle est présentée par la fonction mathématique suivante :

$$Y = f(K, L, E) \quad (1)$$

Etant donné que la capacité de production d'un pays est mesurée par le taux de croissance de son PIB réel, et que l'énergie regroupe les sources renouvelables et non renouvelables (Liao et al. (2010), Arbex et Perobelli (2012)), on peut écrire la forme fonctionnelle de notre modèle de base comme suit:

$$PIB = f(SENR, SER, K, L) \quad (2)$$

B. Collectes des données

En couvrant la période de 1990-2012, notre étude porte sur des données annuelles de 5 séries temporelles de la Tunisie, formulées par l'équation (2).

Avec:

- PIB : est la variable expliquée qui donne une idée sur l'évolution du taux de la croissance économique en Tunisie ;
- SENR et SER : sont des variables explicatives qui donnent une idée sur l'évolution des sources énergétiques respectivement non renouvelables et renouvelables ;
- K et L : Sont des variables explicatives qui donnent une idée sur l'évolution respectivement, de la formation brute de capital fixe et de la quantité de main d'œuvre.

Les données de cette étude proviennent de la Banque Mondiale [28] pour ce qui concerne le PIB, K et L et de l'Agence Internationale d'Energie [23] pour ce qui concerne les sources utilisées dans la production d'électricité (SENR et SER). Toutes les variables sont prises en terme réels. Le logiciel utilisé pour l'estimation est l'Eviews 6.

C. Tests d'intégration et de stationnarité des séries

Dans la littérature économétrique, il existe plusieurs stratégies des tests de racines unitaires (par exemple: Dickey-Fuller (1979) ; Enders (2004) ; Ertur (1998), Jobert (1992), Perron (1993), etc.). Le logiciel Eviews que nous avons utilisé dans notre étude nous facilite la mise en œuvre de la stratégie de Jobert. Donc on va subir cette stratégie en utilisant les deux tests de stationnarité ADF (Dickey-Fuller) et PP (Phillips-Perron).

Les résultats du test de racine unitaire de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) et celui de Phillips-Perron (PP) montrent que les variables PIB, SER, SENR et K sont stationnaires en différence première (en présence de constante et de tendance), alors que la variable L est stationnaire en niveau (en présence de constante). Selon la théorie économétrique, ces variables ne peuvent pas être cointégrées au sens de Granger puisque elles ne sont pas intégrées de même ordre. Ceci nous amène à choisir un modèle vectoriel autorégressif (VAR). Ce modèle semble être alors la meilleure approche permettant de suivre et étudier une telle interaction entre la croissance économique et

la substitution des sources non-renouvelables d'énergie par des sources renouvelables.

D. Stationnarité du modèle VAR

D'après le graphique ci-dessous, on remarque que les inverses des racines du polynôme caractéristique sont tous situés à l'intérieur du cercle unité, ce qui veut dire que toutes les valeurs propres sont de module supérieur à l'unité 1. Ainsi, les p-values de la statistique de Fisher sont inférieures à 0.05 et les R2 sont acceptables. Par conséquent, le modèle estimé est stationnaire et est globalement acceptable.

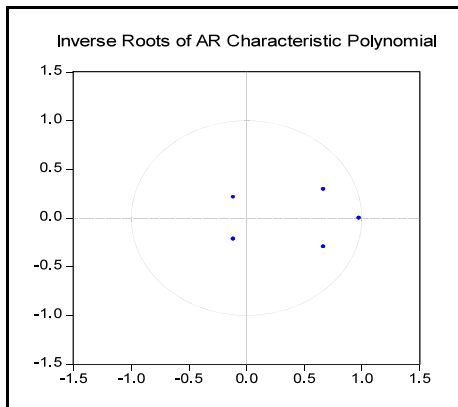


Fig2. Stationnarité du modèle

La statistique de Fisher dans le tableau 1 est supérieure à celle lue dans la table de Fisher, alors le modèle est globalement significatif. Au niveau individuel, chaque variable du modèle est aussi significative. On peut représenter le VAR (1) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \text{PIB}(t) \\ \text{SER}(t) \\ \text{SENR}(t) \\ \text{K}(t) \\ \text{L}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3.721922 \\ 0.045854 \\ -63.39331 \\ -17.07784 \\ 0.918453 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.052635 & -0.114654 & -0.046449 & -0.103167 & 0.576926 \\ 1.000000 & 2.05\text{E}-10 & 4.83\text{E}-11 & 3.97\text{E}-11 & -4.94\text{E}-10 \\ -2.724945 & -0.218754 & -0.205813 & 0.146034 & 10.58064 \\ 1.625275 & -0.985430 & -0.313515 & 0.323607 & 1.613599 \\ -0.107876 & 0.101140 & -0.002010 & 0.024636 & 0.916878 & 0.918453 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{PIB}(t-1) \\ \text{SER}(t-1) \\ \text{SENR}(t-1) \\ \text{K}(t-1) \\ \text{L}(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{U1}(t) \\ \text{U2}(t) \\ \text{U3}(t) \\ \text{U4}(t) \\ \text{U5}(t) \end{bmatrix}$$

D'où le PIB peut s'écrire sous la formule suivante :

$$\text{PIB}(t) = -3.721922 + 1.052635\text{PIB}(t-1) - 0.114654\text{SER}(t-1) - 0.046449\text{SENR}(t-1) - 0.103167\text{K}(t-1) + 0.576926\text{L}(t-1) + \text{U1}(t) \tag{3}$$

E. Tests sur les résidus

Il s'agit des tests de normalité, d'hétéroscédasticité et d'autocorrélation des erreurs :

1) Test de normalité

L'hypothèse de normalité des termes d'erreurs précise la distribution statistique des estimateurs. C'est donc, grâce à cette hypothèse que l'inférence statistique peut se réaliser. Cette hypothèse peut être testée sur les variables du modèle ou sur les termes d'erreurs du modèle. Ce test est réalisé grâce à la statistique de Jarque-Bera (1980) et suit une loi du khi-deux à deux degrés de liberté au seuil de 5% égale à 5,99. Il permet de savoir si les variables du modèle suivent ou non une loi normale. Les résultats de notre test prouvent que les résidus sont normaux car les statistiques de Jarque-Bera sont toutes inférieures à 5,99 (voir en annexe).

2) Test d'hétéroscédasticité des résidus

Afin de qualifier les séries qui n'ont pas une variance constante, il est nécessaire de vérifier l'existence d'hétéroscédasticité. Pour se faire, on peut utiliser soit le test de Breusch-Pagan (B-P) soit le test de White. Dans notre modèle, c'est le dernier qui est utilisé dont l'idée générale est de vérifier si le carré des résidus peut être expliqué par les variables du modèle. Dans ce cas, les résidus sont homoscedastiques avec une probabilité (0,1616) supérieure à 5% (voir annexe). D'où l'optimalité des estimations obtenues.

3) Test d'auto corrélation des erreurs

Pour mieux commenter la validité du modèle et les tests statistiques, il est nécessaire de vérifier si les erreurs ne sont pas corrélées. Ce qui implique la détection de l'autocorrélation des erreurs en utilisant le test de Durbin-Watson. Dans le cas de cette étude, il y a absence d'autocorrélation car la probabilité associée est supérieure à 5% (voir en annexe).

4) Conclusion des tests sur les résidus

Les différents tests économétriques effectués montrent la spécification et la stabilité (structurellement et conjoncturellement) du modèle. En effet, l'absence d'autocorrélation, l'homoscédasticité des erreurs et la normalité de la distribution permettent de conclure que ce modèle peut-être utilisé à des fins de prévisions économétriques.

F. Test de causalité

La notion de causalité au sens de Granger est une approche théorique de la causalité qui renvoie non seulement au caractère théorique de la causalité (cause-effet) mais au caractère prédictif de l'éventuelle cause sur l'effet. En effet, selon Granger, une variable X cause une variable Y si et seulement si les valeurs passées et présentes de X permettent de mieux prédire les valeurs de la variable Y. Autrement dit, une variable X cause une variable Y si la connaissance des valeurs passées et présentes de X rend meilleure la prévision de Y.

Le test de causalité de Granger revient à examiner si la valeur contemporaine de Y est liée significativement aux valeurs retardées de cette même variable et des valeurs retardées de X que l'on considère comme la variable causale.

L'analyse de la causalité nous a indiqué que les informations antérieures sur le niveau des sources énergétiques ne permettent pas une meilleure prévision du niveau de croissance économique. L'application du test de non-causalité au sens de Granger à ces variables prises deux à deux pour un retard optimal d'une période, indique qu'à chaque cas, il existe un seul sens de relation (relation unidirectionnelle).

La figure ci-dessous récapitule les résultats obtenus en ce qui concerne la direction de la relation entre les variables étudiées.

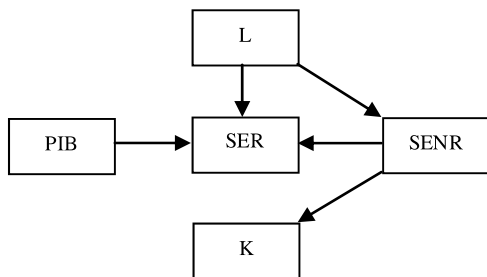


Fig3. Récapitulatif des sens de causalité entre les variables

IV. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Après avoir estimé le modèle VAR et testé la non-causalité au sens de Granger, les résultats obtenus sont les suivants :

- L'existence d'une relation de causalité unidirectionnelle allant, respectivement, de la croissance du produit intérieur brut (PIB), de la production d'électricité à partir des sources énergétiques non renouvelables (SENR) et de la quantité de la main d'œuvre utilisée dans la productivité (L) vers la production d'électricité à partir des sources énergétiques renouvelables (SER). Ce résultat, suggère que toute politique de valorisation des sources énergétiques renouvelables et de développement des technologies en la matière, peut être suivie sans affecter notre croissance économique, sans destruction de nos postes de travail et sans compromettre notre accès à l'électricité.
- L'absence de relation de causalité entre la croissance du PIB et les sources énergétiques non renouvelables (SENR). Ceci, stipule que l'économie tunisienne est moins « énergivore ». Dans la mesure où les politiques dans le secteur de l'électricité - produite par des sources non renouvelables - n'ont aucune influence sur la croissance économique, elles peuvent donc être mises en œuvre sans qu'elles aient des répercussions sur celle-ci. Par ailleurs, cette absence de causalité entre le taux de croissance de PIB et les SER laisse affirmer que la Tunisie doit prévoir des réformes structurelles du secteur de l'électricité afin qu'il puisse avoir une grande influence sur l'activité économique comme dans les pays industrialisés.

- L'absence de relation de causalité entre la formation de capital fixe (K) et les sources énergétiques renouvelables (SER). Ceci, stipule que l'investissement dans les technologies d'énergies renouvelables n'a aucun effet sur les investissements publics et/ou privés.
- L'absence de relation de causalité entre la croissance du PIB et les deux facteurs traditionnels de la production (K et L). Ceci permet de comprendre que l'énergie, toute chose égale par ailleurs, puisse être un autre facteur essentiel de production dans l'activité économique de la Tunisie.
- L'existence d'une relation de causalité unidirectionnelle allant de la production d'électricité à partir des sources non renouvelables (SENR) vers la production d'électricité à partir des sources renouvelables (SER). Ce type de relation entre les différents types de sources énergétiques utilisées dans la production d'électricité, favorise les énergies renouvelables dans le processus de la substitution énergétique, qui présente la pierre angulaire de l'indépendance énergétique en Tunisie.

V. CONCLUSIONS

Depuis le début de vingt-unième siècle, la Tunisie est devenue un pays vulnérable énergétiquement, car, dépendant de plus en plus de l'étranger pour son approvisionnement en énergies primaires. Une situation qui alourdit sa facture énergétique et approfondisse son déficit budgétaire. Le défi se résume dans une transition énergétique sérieuse. L'un des piliers de cette transition est la substitution énergétique. Donc il est indispensable d'analyser les effets de cette dernière sur l'activité économique tunisienne, ce type d'analyse est aussi utile aux décideurs politiques.

Cette étude a eu pour objectif principal d'analyser le lien dynamique entre les sources énergétiques (renouvelables et non renouvelables) et la croissance économique en Tunisie. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle VAR pour nos différents tests : stationnarité, causalité, fonction de réponse d'impulsion, décomposition de la variance et les résidus. A partir de ces tests, nous sommes parvenus à des résultats importants. Le test de stationnarité a révélé que les variables ne sont pas tous stationnaires en niveau et ont dû être différenciées pour être stationnaires. Mais elles sont toutes significatives, le modèle aussi est globalement significatif, les résidus sont non auto corrélés, homoscédastiques et normalement distribués. Donc le modèle est acceptable et peut être utilisé pour la prévision.

Les résultats de l'analyse suggèrent l'existence d'une relation de causalité unidirectionnelle allant de toutes les variables (sauf la formation de capital fixe (K)) vers la production d'électricité à partir des sources énergétiques renouvelables (SER) ; et l'absence de relation de causalité entre le taux de croissance de PIB et toutes les autres variables (SENR, K et L).

Ces résultats impliquent que toute transition énergétique orientée vers les sources énergétiques renouvelables, peut être

sui vie sans affecter notre croissance économique, sans destruction de nos postes de travail et sans compromettre notre choix et accès à l'électricité. Par ailleurs, l'investissement dans les technologies d'énergie renouvelable n'a aucun effet néfaste sur les investissements publics et/ou privés, mais aussi, présente une condition favorable pour l'économie tunisienne afin d'améliorer une croissance économique compatible à l'environnement et au bien être sociale, voire assurer le développement durable.

De cette conclusion, il devient facile de choisir la mise en œuvre de la politique énergétique appropriée afin d'éviter les réformes qui peuvent retarder l'activité économique de notre pays. Au-delà, il convient d'étudier l'impact d'énergies renouvelables sur les trois piliers du développement durable. Elle sera la problématique des prochains travaux de recherche, dans lesquels, on tentera d'analyser les effets exercés sur quelques indicateurs économiques, sociales et environnementales.

REFERENCES

- [1] H. Karmi, A. Chkir, « Croissance économique et développement durable : cas de la Tunisie », *International Journal of Economics & Strategic Management of Business Process*, vol.2, pp.58-63, 2014.
- [2] J. Kraft, A. Kraft, "on the relationship between energy and GNP", *Journal of Energy and Development* 3, 401-403, 1978.
- [3] E. Yu, J. Choi, "The causal relationship between energy and GNP: an international comparison". *Journal of Energy and Development* 10, 249-272, 1985
- [4] Y. Yang, "A note on the causal relationship between energy and GDO in Taiwan", *Energy Economics* 3, 309-31, 2000.
- [5] C.C. Lee, "The causality relationship between energy consumption and GDP in G-11 countries revisited", *Energy Policy* 34 (9), 1086-1093, 2006.
- [6] M. Al-Iriani, "Energy-GDP relationship revisited: An example from GCC countries using panel causality", *Energy Policy* 34 (17), 3342-3350, 2006
- [7] M. Belloumi, "Energy consumption and GDP in Tunisia: cointegration and causality analysis", *Energy Policy* 37 (7), 2745-2753, 2009.
- [8] N.Apergis, J.E. Payne, "Energy consumption and economic growth: Evidence from the Commonwealth of Independent States", *Energy Economics* 31(5), 641-647, 2009a.
- [9] N.Apergis, J.E. Payne, "Energy consumption and economic growth in Central America: Evidence from a panel cointegration and error correction model", *Energy Economics* 31(2), 211-216, 2009b.
- [10] N.Apergis, J.E. Payne, "The renewable energy consumption-growth nexus in Central America", *Applied Energy* 88, 343-347, 2010.
- [11] V. Costantini, C. Martini, "The causality between energy consumption and economic growth: A multi-sectoral analysis using non-stationary cointegrated panel data", *Energy Economics* 32 (3), 591-60, 2010.
- [12] N.S Ouedraogo, "Energy consumption and economic growth: Evidence from the economic community of West African States (ECOWAS)", *Energy Economics* 36, 637-647, 2013.
- [13] P. Sadorsky, "Renewable energy consumption and income in emerging economies", *Energy Policy* 37 (10), 4021-4028, 2009.
- [14] N.Apergis, J.E. Payne, "The renewable energy consumption-growth nexus in Central America", *Applied Energy* 88, 343-347, 2010.
- [15] N.Apergis, J.E. Payne, "Renewable energy consumption and growth in Eurasia", *Energy Economics* 32 (6), 1392-1397, 2010e.
- [16] A.N. Menegaki, "Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis", *Energy Economics* 33, 257-263, 2011.
- [17] U. Al-mulali, H.G. Fereidouni, J.Y Lee, C.N. Binti, S. Che, "Examining the bi-directional long run relationship between renewable energy consumption and GDP growth", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 22, 209-222, 2013.
- [18] B. Lin, M. Mubarak, "Renewable energy consumption – Economic growth nexus for China", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40, 111-117, 2014.
- [19] H.A. Ghorashi, R. Rahimi, "Renewable and non-renewable energy status in Iran: Art of know-how and technology-gaps", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (1) 15, 494-499, 2011.
- [20] R.A. Salim, S. Shafiei, "Urbanization and renewable and non-renewable energy consumption in OECD countries: An empirical analysis", *Economic Modelling* 38, 581-591, 2014.
- [21] CH. Boluk, M. Mert, "Fossil & renewable energy consumption, GHGs (greenhouse gases) and economic growth: Evidence from a panel of EU (European Union) countries", *Energy* 74, 439-449, 2014.
- [22] ANME (2014), Stratégie nationale de maîtrise de l'énergie : Objectifs, moyens et enjeux. [Online]. Available <https://giz.de/en/downloads/giz2014-fr-strategie-energie-tunisie.pdf> .
- [23] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*, IEA, Paris, 2013
- [24] B. Hugo, Laurence, R., V. Eric, *Transitions énergétiques multiples et contradictoires à Sfax (Tunisie)*, Flux 3 (N° 93 - 94), 77-90, 2013.
- [25] F. Ghaddab, *Energies Renouvelables en Tunisie : Réalité ou Utopie ?*, N° 85, Revue tunisienne de l'énergie, 2013.
- [26] N. Georgescu-Roegen., *Les Éditions Sang de la terre, La décroissance. Entropie- Ecologie-Economie*, Paris, Nouvelle édition, 254 pp, 1995.
- [27] J. Percebois, « L'apport de la théorie aux débats énergétiques », *Revue de l'énergie* 509, 473-488, 1999.
- [28] World Bank, *World Development Indicators 2012*, Washington, 2013.

Etude et caractérisation d'une tôle d'acier émaillée

S. Mendil⁽¹⁾, S. Amirouche⁽²⁾, H. Messaoudi⁽¹⁾, M. Hadjazi⁽¹⁾, S. Azem⁽¹⁾,

⁽¹⁾Département de Génie Mécanique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Hasnaoua
BP17, 15000. Algérie,

⁽²⁾Centre de recherche scientifique et technique en analyses physico-chimique (CRAPC),
BP384, Zone Industrielle Bou-Ismaïl RP42004, 42004 Bou-Ismaïl, Tipaza, Algérie,

smendil@yahoo.fr

Amirouche.saifi@crapc.dz

Résumé

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude de l'émaillage d'une tôle d'acier décarburée, et à sa caractérisation par Microscopie optique, Microscopie électronique à Balayage (MEB) et résistance au choc d'un point de vue mécanique. L'opération d'émaillage s'est réalisée à une température de cuisson de l'ordre de 830°C sous air. Les résultats obtenus ont montré la formation de différentes couches d'émail à savoir une couche d'autonettoyant, une couche de masse et une couche de couverture qui s'adhèrent sur la surface de la tôle d'acier, grâce à des liaisons chimiques, comportant ainsi des bulles d'hydrogènes emprisonnées à l'intérieure de la couche d'émail.

Mots-clefs : Emaillage, acier décarburé, bulles d'hydrogène, Microscopie Electronique à Balayage (MEB).

1. Introduction

Les traitements et revêtements de surface constituent actuellement un des moyens essentiels pour améliorer les propriétés fonctionnelles des métaux, notamment la résistance à l'oxydation et à la corrosion, la tenue à la fatigue, la résistance au frottement et à l'usure [1], sans oublier la couleur et l'aspect esthétique. [2]

Parmi ces revêtements, l'émaillage sur des tôles d'aciers qui consiste à déposer sur une surface d'acier de qualité adéquate et préalablement préparée une ou plusieurs couches d'email, l'email qui est un mélange de matières non organiques naturelles de la famille des verres, et de fondants ,coloré avec divers oxydes métalliques.

L'opération d'émaillage comprend généralement plusieurs étapes, préparation de la surface et préparation de la barbotine d'email, application de l'email sur la surface, séchage et enfin cuisson à haute température.

Aujourd'hui, l'opération d'émaillage sur acier est devenue un procédé de haute technologie nécessitant l'utilisation de produits de base très sophistiqué associé à des moyens de mise en œuvre élaborés. L'acier émaillé est donc un matériau répondant aux critères de la modernité : longévité, esthétique et hygiène [3].

3. Résultats et discussion

3.1.Analyse par Microscopie Optique

2. Procédure expérimentales

Dans ce travail, on a utilisé des tôles d'aciers décarburés émaillables de nuances **NF EN 10209 DC04 EK,m**, et de la poudre pour émaillage électrostatique.

Avant émaillage, les tôles d'aciers ont subit au préalable un traitement de surface, soit un dégraissage, un décapage et un rinçage, suivi d'un séchage.

Après la préparation de surface, les pièces sont suspendues sur la chaîne en traversant une chambre qui contient des pistolets électrostatiques.

Un champ électrique est formé entre la buse et la pièce à émailler. Les particules d'email propulsées en dehors des pistolets par un flux d'air qui est chargé négativement (négative par rapport au générateur), migrent vers la pièce qu'est chargé positivement, après il y'aura un dépôt d'email sur la pièce. Et le surpoids de l'email conduit la poudre sur mailleur a tomber. Ensuite les pièces sont destinées vers un four de cuisson. L'opération d'émaillage dépend de l'usage de la pièce : soit de l'email masse ou bien de l'email de couverte.

Une fois que les pièces sont émaillées, on procède à leur découpage, polissage, attaque chimique puis à leur caractérisation par microscopie optique, électronique et tester l'adhérence entre le métal et la couche d'email formée.

L'analyse par Microscope optique des tôles d'aciers émaillées nous a permis d'obtenir les différentes micrographies présentées ci-dessous,

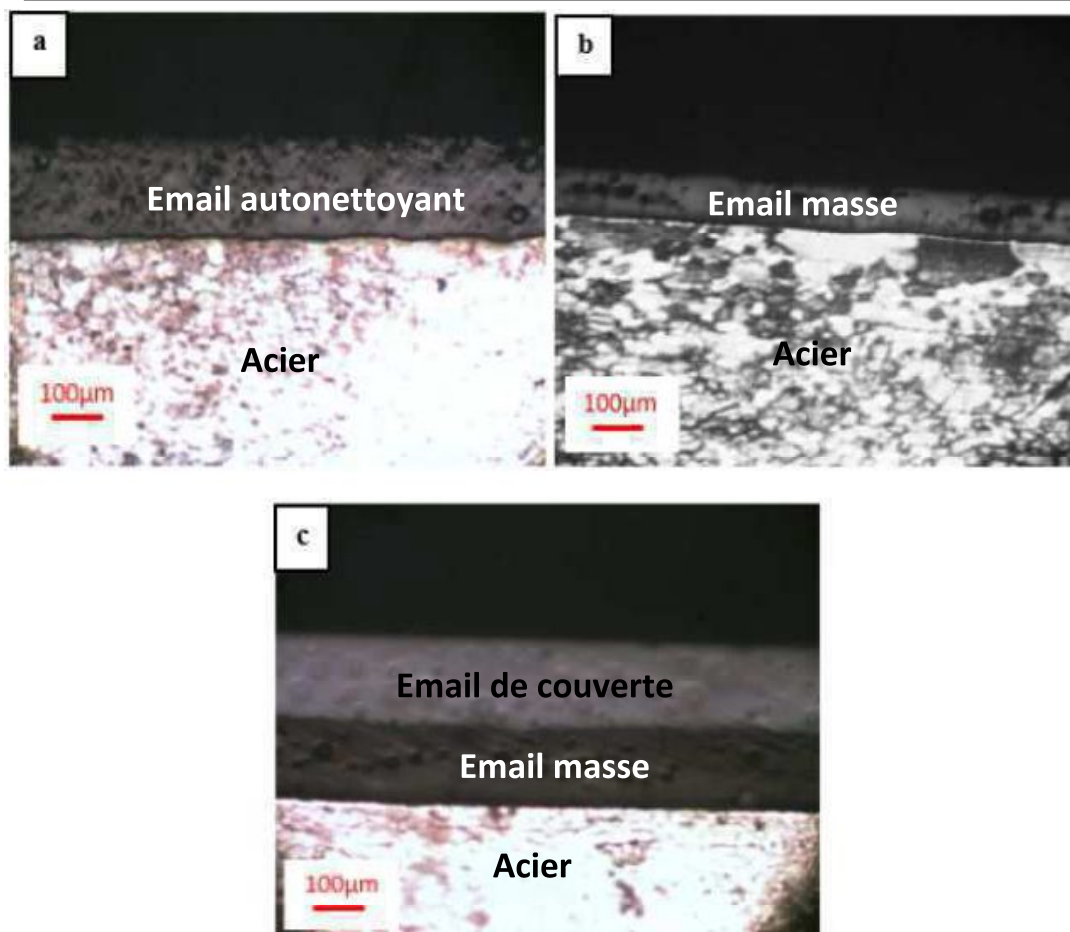


Figure.1. Micrographies optique des tôles d’aciers émaillées. (a) autonettoyant, (b) masse et (c) couverte.

Suivant les micrographies obtenues, on peut distinguer :

La couche d’acier,

Les couches d’email, à savoir :

- ✚ L’email autonettoyant
- ✚ L’email masse
- ✚ L’email de couverte

Ces couches d’email sont accompagnées par des bulles d’hydrogènes de différents diamètres. Elles sont réparties à travers toute la surface des couches d’email autonettoyant, masse et couverte.

D’après la bibliographie, une couche réactive à l’interface acier / email se forme, ce qui n’est pas le cas dans nos résultat, cela est dû probablement au temps de chauffage insuffisant de l’email.

La formation de ces différentes couches d’email est réalisée suite à un mécanisme de réactions d’oxydation et de diffusion des éléments contenus dans l’email et l’acier. Ce mécanisme se résume comme suit :

En premier lieu : Oxydation du fer :

En premier lieu, à environ 500°C à 550°C, il se produit une oxydation du fer à



En outre, l'hydrogène atomique provenant de l'humidité H₂O diffuse dans l'acier et remplit les pièges présents dans l'acier. Cette solubilité de H₂ dans la ferrite augmente avec la température.

En deuxième lieu : Fusion de l'émail et formation d'une couche semi perméable de l'émail

Durant cette étape, entre 550 °C et 830 °C, l'émail passe à l'état liquide en formant une couche semi perméable ce qui conduit à la diminution des échanges gazeux avec l'atmosphère du four. Cette dernière provoque le piégeage d'hydrogène à l'interface métal/émail, ce qui conduit à la formation des bulles d'hydrogène qu'on qualifié de défauts appelé Coups d'Ongles.

En troisième lieu : Adhérence de l'émail

Dans cette étape, qui se déroule autour de 830 °C, une réaction d'adhérence se produit par réduction et précipitation des oxydes métalliques qui favorise l'adhérence à l'interface acier/émail. Cette adhérence est aussi favorisée par la rugosité de l'acier.

l'interface émail / acier provoquée par l'humidité et l'oxygène de l'atmosphère du four, par leur pénétration dans l'émail poreux suivant la réaction :

En quatrième étape : Refroidissement et solidification de l'émail

Dans cette dernière étape, un refroidissement de l'émail se produit. Il s'agit d'une solidification complète de l'émail, ce qui implique un arrêt total d'échanges gazeux et des réactions chimiques à l'interface acier/émail.

C'est durant cette étape de refroidissement que la solubilité de l'hydrogène (H₂) dans la ferrite diminue, ce qui implique une sursaturation d'hydrogène dans l'acier, et qui ainsi provoque une accumulation de contraintes de compression dans l'émail, qui peut arriver à provoquer des éclats d'émail (déformations de la pièce).

3.2. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage

L'analyse par MEB en mode électrons rétrodiffusés de la tôle d'acier émaillée de cuivre est représentée sur la figure qui suit :

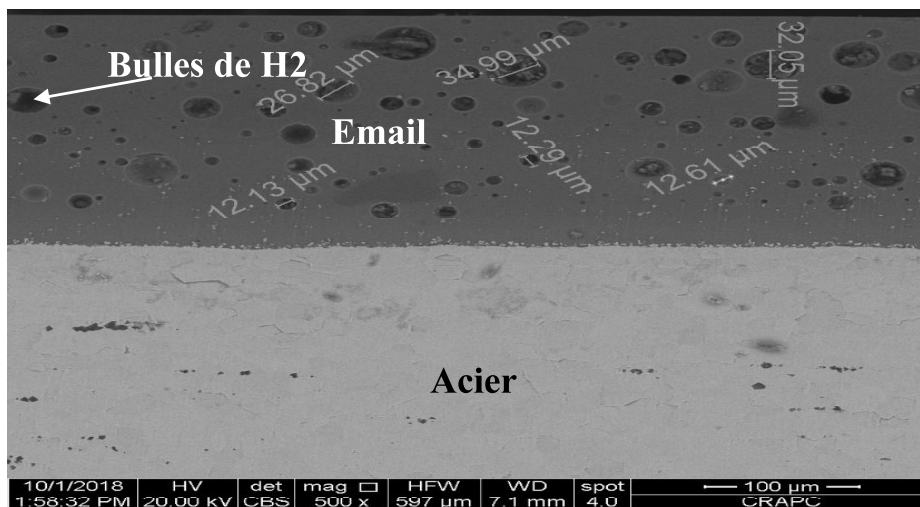


Figure.2.Micrographie MEB au mode électrons rétrodiffusés de l'émail couvert montrant les bulles d'hydrogène dans la couche d'émail.

Suivant cette micrographie, on constate :

1. Deux couches avec deux contrastes différents :

Une couche avec un contraste clair, elle semble très brillante par rapport à son enrichissement en éléments lourds. Cette couche correspond à la phase de fer.

Une couche sombre moins brillante par rapport à celle du fer, cela laisse penser que cette couche est composée d'éléments légers. Il est impératif de signaler que cette couche sombre se subdivise en deux sous-couches, à savoir une sous-couche de masse et une autre de couverture. Ceci n'a pas pu être observé dans l'analyse par MEB en électrons rétrodiffusés. Et comme l'électron rétrodiffusé se base sur le contraste d'image en fonction de la composition chimique des éléments, les deux sous-couches possèdent probablement la même composition en éléments chimiques vu qu'elles sont apparues avec le même contraste.

2. Des bulles d'hydrogène au niveau de la couche d'émail :

On constate une accumulation de bulles d'hydrogène qui se trouvent dispersées d'une manière homogène sur toute la surface de l'émail avec différents diamètres. Elles se trouvent beaucoup plus concentrées au niveau de l'extrémité de l'émail toute en essayant de se dégager au cours du refroidissement ; mais elles restent emprisonnées à ce niveau-là. Les interactions entre l'hydrogène et l'acier peuvent conduire à la formation de sautes d'émail appelées **coups d'ongle**. La mesure du diamètre des bulles d'hydrogène ont été effectuées par Microscopie Electronique à balayage. Elles sont d'un diamètre variable et hétérogène allant de 12.13 µm à 34.99 µm, avec une moyenne de 21.82 µm à l'échelle de 100 µm.

3.3.Mesure d'adhérence

Après l'essai de choc sur les trois tôles émaillées, on a pu récupérer les différentes

empreintes de l'essai présentées en **figure.3.**

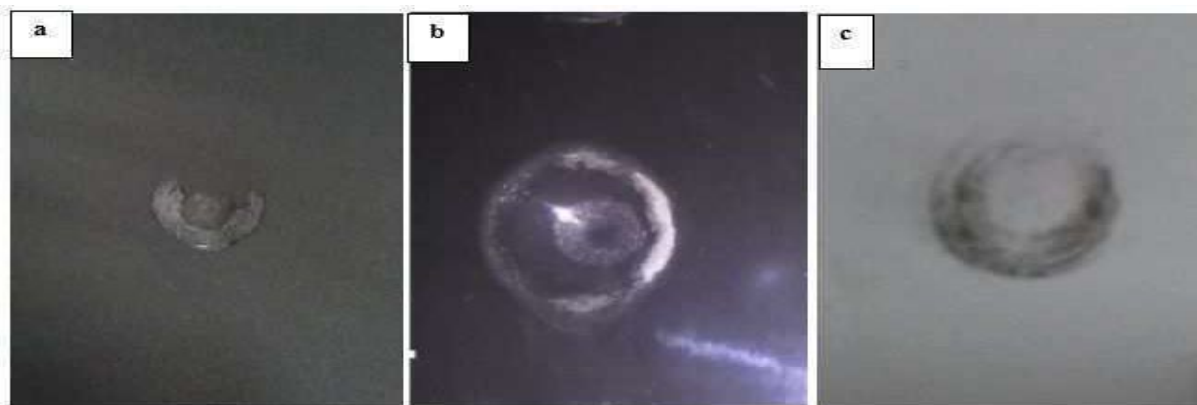


Figure.3. Empreintes de teste d'adhérence réalisé après l'impact. (a) email masse. (b) email autonettoyant et (c) email de couverture.

En comparant l'aspect de l'impact réalisé sur les tôles émaillées aux images de référence, on peut conclure que les niveaux d'adhérence dans les figure (a) et (b) est de la **classe 2** qui correspond à une très bonne adhérence, la surface d'impact est presque complètement recouverte avec de l'email fracturé avec quelques petits traces du substrat visibles. La figure (c) est de la **classe 3**, elle correspond à une bonne adhérence, la surface d'impact est encore recouverte avec de l'email fracturé, mais des zones importants du substrat sont visibles.

4. Conclusion

L'opération d'émaillage est conçue pour obtenir un revêtement sur la surface des tôles d'aciers décarburées dans le but de les protéger contre les agressions extérieur

à savoir l'oxydation et la corrosion, voir même le coté esthétique.

Ces tôles d'aciers émaillées comprennent deux couches différentes après leur analyse microstructurale optique qu'elle soit ou électronique. Une couche d'acier et une autre couche d'email. Cette dernière semble saturée de bulles d'hydrogène qui se trouvent emprisonnées et piégées à l'intérieur au cours du refroidissement des tôles d'email. Ceci qui crée des contraintes de compression interne et provoque par la suite des éclats et des sautes d'email.

Des tests d'adhérence ont été réalisés sur les surfaces des aciers émaillés. Les résultats ont montré que les niveaux d'adhérence sont bons et de meilleur classe.

5. Références bibliographiques

[1] : Afnor, Produits sidérurgique, Aciers pour construction, Recueil de normes françaises, 1988.

[2] : Madeleine Durand-Charre : la microstructure des aciers et des fontes, Genèse et interprétation, SIRPE éditeur, Paris(2003)

[3] : William D. Callister, Jr, Science et génie des matériaux, MODULO, Canada 2001.

[4] : Mir, métallographie et traitements thermiques des métaux, 3ième édition 1982.

[5] : Colombier : les aciers à outils et leur traitement thermique(1971), pyc-édition, Paris.

[6] : J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques, 2007.

[7] : Hache André : corrosion des métaux.

[8] : H. Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions de l'université de Badji Mokhtar, 2007.

[9] : Muriel Hantcherli, pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, 15 Avril 2010.

[10] : J. Campbell : Solidification structure castings second édition(2003), pages 117-177.

[11] : Taotsungshun, C.M. Wan, J.G. Byrne: A study of workhardening in austenitic Fe---Mn-C and Fe-Mn-Al-C

alloys. ActaMetallurgicaetMaterialia: 40 (12), 3407-3412(1992).

[12] : CH.Harkati(1998), Thèse de magistère, Université de Constantine.

[13] : Traitement de surface controlab 1985.

[14] : Etude des traitements de surface et technique de mesure du revêtement 1996.

Calcul d'un Système de Calorifugeage lors de Transport des Fluides à Différentes Températures

El-Hadi Djamel^{#1}, Labdani Sofiane^{*2}

[#]Laboratoire d'Analyse Fonctionnelle des Procédés chimiques, Université Blida 1
Route de Soumâa, B.P 270, 0900 Blida, Algérie

¹elhadi64djamel@yahoo.fr

^{*}Laboratoire d'Analyse Fonctionnelle des Procédés chimiques, Université Blida 1
Route de Soumâa, B.P 270, 0900 Blida, Algérie

²labdani_sof@hotmail.fr

Résumé— Dans cette étude, nous avons proposé le calcul d'un système d'isolation thermique industriel de trois tuyaux, contenant des fluides différents. Les fluides choisis sont : un fluide chaud (vapeur d'eau), un liquide devient épais à une température relativement basse (Lauryl éther de sodium) et un liquide froid (eau). Nous avons calculé pour chaque cas l'épaisseur de l'isolant, en fonction de certaines conditions exigées par le système étudié. On a utilisé comme matière isolante la laine de verre, pour le premier et le second fluide ; ainsi que la mousse en caoutchouc synthétique pour le troisième fluide. Les principaux résultats montrent que l'épaisseur de l'isolant est 30 mm pour le premier cas et 19 mm pour le troisième cas. Pour le second cas, l'épaisseur est conditionnée par une exigence technique, la valeur trouvée est de 30 mm.

Mots Clés— Isolant, Calorifugeage, Tuyau, Epaisseur, Fluide

I. INTRODUCTION

Dans le cadre de la problématique énergie-climat, avec le réchauffement climatique, des actions importantes en économie d'énergie et en limitation des rejets de gaz à effet de serre, doivent être effectuées dans tous les secteurs. Une étude internationale montre que l'isolation thermique se trouve parmi les solutions les plus économiques pour limiter les rejets du gaz carbonique. À côté de l'isolation thermique des parois des bâtiments, on trouve l'isolation thermique, appelé encore "calorifugeage" des équipements, tels que les tuyauteries, les réservoirs, les citernes, les installations de chauffage ou de froid, etc. Ce secteur est appliqué principalement dans les industries chimiques, où circulent ou qui contiennent des fluides froids ou chauds. Le calorifugeage couvre généralement le domaine de températures compris entre -260 et $+1300$ °C [1].

Les buts de l'isolation thermique industrielle les plus courants sont : la conservation de l'énergie thermique, en réduisant l'échange de chaleur entre un appareil ou une tuyauterie et l'air ambiant, le contrôle des températures en limitant les chutes de température d'un fluide s'écoulant dans une canalisation ou stocké dans un réservoir, la fluidité des liquides épais à l'intérieur du tube en cas d'arrêt de liquide et l'anti condensation le long de la paroi du tuyau.

L'objectif principal de cette étude est l'application des méthodes de calcul, permettant d'identifier rapidement les phénomènes liés au transfert de chaleur dans les tuyauteries, en particulier ceux destinés au transport des fluides chauds et froids, dans les conditions normales rencontrées en service. Les principaux calculs concernent la vérification des pertes de chaleur dans la tuyauterie isolée, le calcul d'épaisseur d'isolation optimale, ainsi que la comparaison de la chute de température entre l'isolation existante et calculée et de donner enfin des recommandations pour réduire les pertes thermiques.

II. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES INSTALLATIONS

La mise en œuvre d'un système d'isolation thermique industriel dépend de plusieurs facteurs, qui peuvent être classés en trois familles. La première famille englobe les facteurs intrinsèques à la structure de la conduite (type de métal, diamètres, longueur, etc.). La seconde famille regroupe les données météorologiques ayant une influence sur l'environnement tel que la température extérieure. La troisième famille dont l'interaction avec la conduite ; elle regroupe les facteurs contrôlables, à savoir la température interne de fluide à l'entrée de la conduite, la température de sortie, etc.

A. Caractéristiques Climatiques du Site

Les principaux facteurs sont : la température extérieure (ambiante), qui varie généralement entre 10 et 30 °C ; ainsi que la vitesse du vent, qui a une valeur moyenne au cours d'année de 15 km/h.

B. Description des Installations

Dans cette étude, nous avons choisi trois systèmes différents : Le premier système a pour objectif de transporter la vapeur d'eau surchauffée à une température 175 °C dans la chaudière à l'unité de sulfonation (Fig. 1), en traversant l'unité "Molfix" ; Le deuxième système assure le transport de Lauryl éther sulfate de sodium (Texapon N70) du réservoir de stockage (à 30 °C) à la citerne de distribution (Fig. 2) ; Le troisième système est utilisé pour le transport de l'eau froide du refroidisseur au réservoir de stockage à 15 °C (Fig. 3).

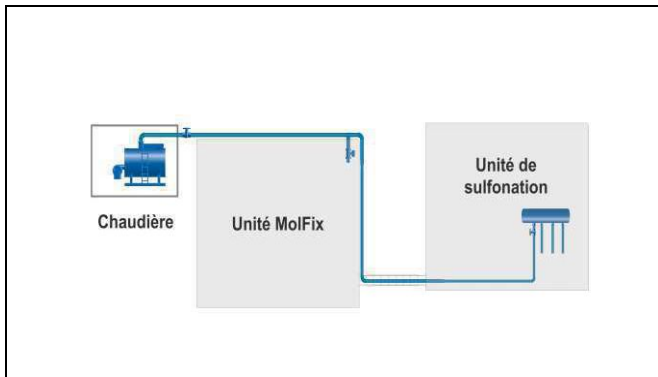


Fig. 1 Canalisation du transport de la vapeur d'eau



Fig. 2 Canalisation du transport de fluide (Texapon N70)

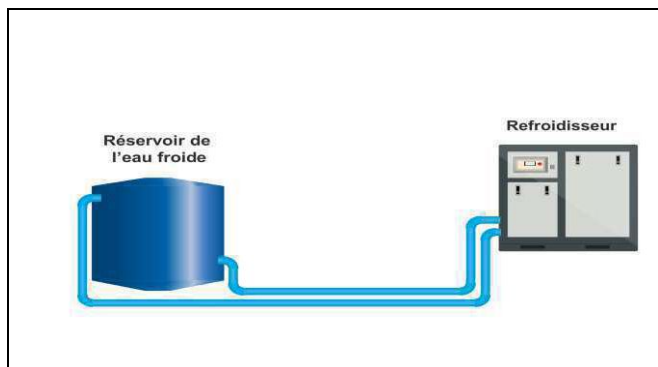


Fig. 3 Canalisation du transport de l'eau froide

C. Isolants Utilisés

Pour le transport des fluides chauds, on utilise la Laine de verre, caractérisé par une température maximale de service égale à 540°C sous une pression de 500 Pa et une capacité thermique spécifique de 1 kJ/kg K.

Pour le transport des fluides froids, on utilise un matériau d'isolation à cellules fermées très flexible, à base de mousse élastomère extrudée (HT/Armaflex) avec résistance aux rayons UV et une température de service compris entre -50 et +150°C.

La protection de l'isolation nécessite la mise en œuvre d'un revêtement en tôle d'acier (galvanisée, aluminée ou inoxydable) ou de tôles d'aluminium.

III. METHODES DE CALCUL

A. Calcul de l'épaisseur de l'isolation

Nous allons étudier le cas d'une conduite métallique de longueur L , de diamètre intérieur D_1 et de diamètre extérieur D_2 . Soit λ_m la conductivité thermique du métal, D_3 le diamètre de la conduite calorifugée (isolée thermiquement) et λ_i la conductivité thermique de l'isolant. Si e représente l'épaisseur de l'isolant (Fig. 4), on a alors : $D_3 = D_2 + 2e$

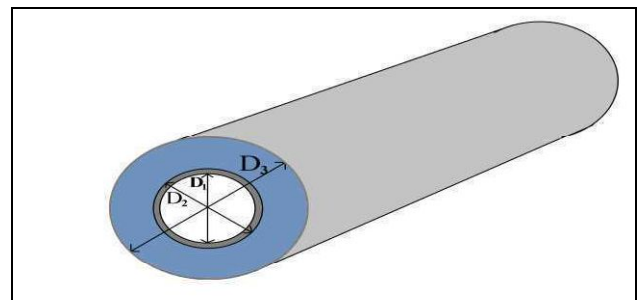


Fig. 4 Transport d'un fluide dans une canalisation calorifugée

1) *Épaisseur en l'absence d'exigence particulière:* En l'absence d'exigences particulières, il faut se souvenir que la loi limite à 55°C la température des surfaces accessibles [2]. En conséquence, il convient de vérifier que l'épaisseur retenue permet de limiter la température de surface à cette valeur. L'épaisseur est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$D_3 \ln \frac{D_3}{D_2} = \frac{2\lambda_i(T_i - T_{se})}{h_e(T_{se} - T_a)} \quad (1)$$

avec : T_i = la température interne du fluide, T_{se} = la température de la surface extérieure du tube, T_a = la température de l'air ambiant et h_e = le coefficient d'échange superficiel externe.

2) *Épaisseur conditionnée par une exigence technique:* Dans ce cas, il faut prendre en considération la limitation du flux thermique Φ_{\max} (exprimé en W/m^2) pour les surfaces cylindriques. La formule utilisée pour le calcul de l'épaisseur est de la forme :

$$D_3 \ln \frac{D_3}{D_2} = 2\lambda_i \left(\frac{T_i - T_a}{\Phi_{\max}} - \frac{1}{h_e} \right) \quad (2)$$

Le flux thermique peut être déterminé, en utilisant la formule :

$$\Phi_{\max} = \frac{mC_p}{atA} (T_i - T_{\min}) \quad (3)$$

avec : m = la masse du fluide exprimée en kg , C_p = chaleur spécifique massique du fluide, t = la durée (exprimée en s) d'arrêt de fluide dans le tube, a étant un coefficient (compris entre 1,1 et 3) qui tient compte des supports de la tuyauterie et des parties non isolées [2], A = la surface externe de la conduite non isolée, T_i = la température intérieure du fluide et T_{\min} = la température minimale du fluide quand ce dernier s'arrête dans la conduite.

3) *Épaisseur dite économique*: L'épaisseur économique résulte d'un compromis entre le coût d'une installation, compte tenu de l'amortissement et de l'intérêt du capital non amorti, et celui de son fonctionnement pendant une durée déterminée. Il conduit à l'adoption d'une épaisseur telle que le prix global des facteurs énumérés ci-dessus soit minimal. Le prix de tout calorifuge comprend deux éléments de base : un premier terme constant dépendant de sa conception, de sa nature et de sa protection, et un terme dépendant de son épaisseur. Ces deux termes sont proportionnels à la surface extérieure du calorifuge. Le prix au mètre carré de surface isolée est donc la base de tout prix de calorifuge, et il peut s'écrire sous la forme : $P_0 = \rho + \psi e$ où e représente l'épaisseur de l'isolant, tandis que ρ et ψ sont des constantes dépendant de la nature propre des matériaux isolants, de la protection et de la main d'œuvre.

Le prix au mètre du calorifuge d'une conduite de diamètre extérieur D_2 sera donc de la forme : $\pi(\rho + \psi e)(D_2 + 2e)$

Le coût de l'exploitation dépend du prix unitaire de la quantité de chaleur perdue K exprimé en kWh , de la durée annuelle de fonctionnement N et de la déperdition unitaire, donnée par la formule : $2\pi\lambda_i(T_i - T_{se}) / \ln \frac{D_2 + 2e}{D_2}$. Soit η un coefficient tenant compte de la durée de l'amortissement annuel et de l'intérêt du capital non encore amorti, nous devons rendre minimum l'expression suivante pour obtenir l'épaisseur économique :

$$\pi\eta(\rho + \psi e)(D_2 + 2e) + 2\pi KN\lambda_i(T_i - T_{se}) / \ln \frac{D_2 + 2e}{D_2}$$

Pour résoudre le problème, nous disposons de deux méthodes : la méthode classique (par tâtonnement), et la méthode analytique.

Dans le premier cas (méthode classique), pour chaque appareil ou pour chaque tuyauterie, et pour chaque température de service, on calcule le coût annuel total de l'isolation, et cela pour diverses épaisseurs. Pour faciliter le travail, l'ensemble des données et des résultats est porté sur un tableau [3]. On retient l'épaisseur qui donne le coût minimal. Cette méthode longue et fastidieuse est néanmoins celle qui convient le mieux pour l'établissement d'un programme pour ordinateur.

Dans le second cas, il existe plusieurs méthodes analytiques, toutes fondées sur le principe de l'annulation de la dérivée première des expressions du coût total unitaire annuel de l'installation. Les deux principales méthodes utilisées sont : la méthode allemande (VDI 2055) [4] et la méthode de Wadin [5]. Ces deux méthodes font appel à des variables auxiliaires et à des abaques. La méthode de Wadin demande peu de calculs mais nécessite un jeu d'abaques, tandis que la méthode allemande n'exige qu'une seule abaque mais demande plus de calculs.

B. Calcul du coefficient d'échange superficiel externe

Lorsque l'air est rigoureusement calme, le coefficient d'échange superficiel a pour valeur : $h_e = \alpha + \xi$ (4)

α et ξ traduisant respectivement l'influence de la convection et du rayonnement avec : $\alpha = \beta(T_{se} - T_a)^{0.25}$ (5)

où $\beta = 2,49$ pour les surfaces horizontales avec flux dirigé vers le haut, $\beta = 1,31$ pour les surfaces horizontales avec flux dirigé vers le bas, $\beta = 1,84$ pour les surfaces verticales.

La valeur du paramètre ξ est donnée par la formule :

$$\xi = \beta_r \left[\left(\frac{T_{se}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] / (T_{se} - T_a) \quad (6)$$

avec $\beta_r = 5.6783$ lorsque l'émissivité égale à 1 [6].

Lorsque l'air est en mouvement, et dans le cas des surfaces cylindriques [11], on garde la même expression pour ξ et l'on applique la formule empirique suivante pour α :

$$\alpha = 4,15 v_a^{0.8} / D_2^{0.2} \quad (7)$$

où v_a représente la vitesse de l'air exprimée en $m s^{-1}$.

C. Calcul de la température de surface extérieure du tube

La connaissance de la température de surface, est très importante non seulement pour la détermination du coefficient de la conductivité moyen, mais également pour l'étude de la protection du personnel contre les brûlures. De constance du flux thermique en régime permanent [3], la formule générale pour les parois cylindriques est :

$$T_{se} = T_a + (T_i - T_a) \left/ \left[1 + h_e \sum \left(\frac{D_{n+1}}{2\lambda_n} \ln \frac{D_{n+1}}{D_n} \right) \right] \right. \quad (8)$$

D. Déperdition de chaleur à travers une conduite isolée

Pour les parois cylindriques, on exprime généralement la déperdition de chaleur par unité de longueur. Les résistances thermiques rencontrées ont respectivement pour valeur :

- $R_1 = 1/D_1 h_i$ pour la résistance superficielle au contact du fluide,
- $R_2 = \frac{1}{2\lambda_m} \ln \frac{D_2}{D_1}$ pour la résistance de la paroi métallique de la conduite,
- $R_3 = \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_3}{D_2}$ pour la résistance de la couche isolante,
- $R_4 = 1/D_3 h_e$ pour la résistance superficielle au contact de l'air.

La déperdition de chaleur par unité de longueur exprimée en W/m , pour les parois cylindriques est donnée donc par la formule : $q = \pi(T_i - T_a) / (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$ (9)

avec : h_i = le coefficient d'échange superficiel interne.

E. Chute de température dans une conduite isolée

La formule ci-après ne s'applique qu'aux fluides dont la température est éloignée du point de transformation, elle ne peut donc s'appliquer à la vapeur saturante. Dans le cas de faible chute de température (inférieure à 6 %), on emploie la formule simplifiée :
$$\Delta T = \frac{a \cdot q \cdot L}{\rho \cdot v_f \cdot S \cdot C_p} \quad (10)$$

avec : ρ = la masse volumique du fluide, v_f = vitesse de fluide circulant dans le tube et S = section droite de la conduite.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour les trois cas étudiés, on suppose que la résistance thermique de la surface interne de la tuyauterie étant négligeable par rapport à celle de l'isolant.

A. Canalisation de transport de la vapeur d'eau

Les données suivantes sont nécessaires pour les différents cas :

- les longueurs des tuyauteries (L) : 60 m, 60 m et 112m,
- les diamètres intérieurs des tuyauteries (D_1) : 108mm, 134mm et 161mm,
- diamètres extérieurs des tuyauteries (D_2) : 114mm, 141mm et 168mm,
- la température intérieure (vapeur surchauffée) : $T_i = 175^\circ\text{C}$,
- la température ambiante (T_a) : nous avons choisi quatre températures 15, 21, 27 et 32°C ,
- la température de surface extérieure T_{se} de tuyauteries à sa valeur maximale admissible, en employant la relation suivante [14] :
$$T_{se} = T_a + \frac{1}{20}(T_i - T_a) \quad (11)$$

- la vitesse de l'air : $v_a = 15 \text{ km h}^{-1}$,
- la masse volumique du fluide : $\rho = 4,655 \text{ kg/m}^3$,
- le débit masse du fluide : $\dot{m}_f = 920 \text{ kg/h}$,
- la chaleur spécifique du fluide : $C_p = 2495 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$,
- la conductivité thermique de l'isolant (λ_i) est donnée (tableau I) en fonction de la température moyenne (T_{moy}) avec : $T_{moy} = (T_i + T_{se})/2$

TABLEAU I
CONDUCTIVITE THERMIQUE DE L'ISOLANT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE MOYENNE

T_{moy} ($^\circ\text{C}$)	99	101,85	104,7	107,08
λ_i (W/m K)	0,043	0,043	0,044	0,044

1) *Épaisseur de l'isolant*: En absence d'exigence particulière, en utilisant l'équation (1), les résultats obtenus montrent que la température ambiante n'influe pratiquement pas sur l'épaisseur calculée; donc quel que soit la température ambiante choisie l'épaisseur de l'isolant reste

constante, et pour les trois types de conduite, l'épaisseur peut prendre la valeur $e = 30\text{mm}$.

Dans le cas de l'épaisseur économique, nous utiliserons la méthode allemande (VDI 2055). Nous constatons que la température ambiante n'influe pratiquement pas sur la valeur de l'épaisseur calculée, donc quel que soit la température l'épaisseur de l'isolant varie légèrement, et pour les trois types de conduite l'épaisseur peut prendre la valeur $e = 50\text{mm}$. Nous remarquons que l'épaisseur de l'isolant obtenu par la première méthode est inférieure à celle calculée par la deuxième méthode, car la méthode VDI ne tient pas compte du coefficient de transport externe.

2) *Déperdition thermique unitaire*: En négligeant la résistance de la convection interne et celle de la paroi interne, les valeurs de la déperdition thermique unitaire pour les différents cas sont représentées dans les tableaux II et III. Nous remarquons que la déperdition de chaleur dans la conduite dont l'épaisseur de l'isolant $e = 30\text{mm}$ est supérieure à celle dont l'épaisseur de l'isolant $e = 50\text{mm}$. Elle augmente aussi avec l'abaissement de la température ambiante et avec l'augmentation de diamètre de conduite.

TABLEAU III
DEPERDITION UNITAIRE (W/m) POUR $e = 30\text{mm}$

T_a ($^\circ\text{C}$)	$D_2 = 114\text{mm}$	$D_2 = 141\text{mm}$	$D_2 = 168\text{mm}$
15	87,90	104,63	72,52
21	85,31	101,54	70,41
27	82,67	98,40	68,26
32	80,43	95,73	66,43

TABLEAU IIIII
DEPERDITION UNITAIRE (W/m) POUR $e = 50\text{mm}$

T_a ($^\circ\text{C}$)	$D_2 = 114\text{mm}$	$D_2 = 141\text{mm}$	$D_2 = 168\text{mm}$
15	61,83	72,52	86,47
21	60,03	70,41	83,85
27	58,19	68,26	81,28
32	56,64	66,43	79,10

3) *Chute de température*: Pour l'épaisseur $e = 30\text{mm}$, la valeur de la chute de température totale est $\Delta T = 16,17^\circ\text{C}$.

Pour l'épaisseur $e = 50\text{mm}$, la différence entre la valeur de la chute de température totale calculée ($\Delta T = 10,68^\circ\text{C}$) et la valeur mesurée ($\Delta T = 16^\circ\text{C}$) est $5,32^\circ\text{C}$. Cette différence est due à l'inefficacité du calorifuge existant. Cela peut être expliqué par les facteurs suivants :

- non isolement de certaines brides et vannes (Fig. 5),
- influence de pont thermique par les supports et les appuis (Fig. 6),
- imperfection d'étanchéité de la protection de l'isolation dans certain tranche, ce qui permet à l'humidité et des gouttelettes d'eau pénétrer à l'intérieure de l'isolant en diminuant de leur résistance thermique (Fig. 7).

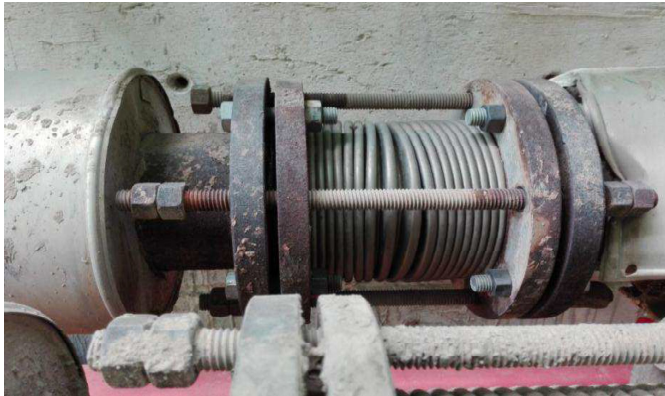


Fig. 5 Bride non calorifugée



Fig. 6 Pont thermique par les supports et les appuis



Fig. 7 Imperfection de la protection de l'isolation

B. Canalisation de transport du Texapon N70

Les données suivantes sont nécessaires pour les différents calculs :

- les longueurs des tuyauteries (L) : 25 m et 5m,
- les diamètres intérieurs des tuyauteries (D_1) : 58mm et 87mm,
- les diamètres extérieurs des tuyauteries (D_2) : 60mm et 89mm,
- la masse volumique du fluide : $\rho = 1110 \text{ kg/m}^3$,
- le débit masse du fluide : $\dot{m}_f = 3800 \text{ kg/h}$,
- la chaleur spécifique du fluide : $C_p = 2600 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$,
- température intérieure de fluide : $T_i = 27^\circ\text{C}$,

- température ambiante $T_a = 10^\circ\text{C}$ (valeur minimale possible),
- température de surface de tuyauteries $T_{se} = 15^\circ\text{C}$ (valeur maximal possible),
- la conductivité thermique est déterminée par extrapolation, en utilisant les données du tableau I ($\lambda_i = 0,0338 \text{ W/m K}$).
- le coefficient d'échange externe est déterminé en utilisant les équations 4, 5 et 6 (l'air est calme, car l'installation est placée dans un local fermé) avec $\beta = 1,84$ (surfaces verticales) et $\beta_r = 4,5$ [7] pour une émissivité inférieure à 1. On trouve : $h_e = 5,91 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

1) *Épaisseur de l'isolant*: Dans ce cas il est nécessaire que la température de fluide doive être supérieure à 18°C quand le liquide s'arrête dans la conduite pendant 6 heures, car au-dessous de cette température le pompage de fluide devient difficile, et lorsque la température devient inférieure à 10°C le fluide devient impompable (Selon la fiche de données et de sécurité de fluide). Dans ce cas, le calcul de l'épaisseur est conditionné par une exigence technique. Pour calculer le flux thermique Φ_{\max} , nous utilisons l'équation (3) avec : $T_{\min} = 18^\circ\text{C}$, $t = 6\text{h}$, $a = 1,1$. Nous calculons la masse m et la surface A , en utilisant les formules : $m = \rho \pi D_1^2 L / 4$ et $A = \pi D_1 L$. Les valeurs calculées du flux thermiques sont : $\Phi_{\max} = 11,62 \text{ W/m}$ pour $D_2 = 60\text{mm}$ et $\Phi_{\max} = 17,44 \text{ W/m}$ pour $D_2 = 89\text{mm}$. La résolution graphique de l'équation (2), permet de trouver la valeur moyenne de l'épaisseur $e = 30\text{mm}$.

Dans le cas de l'épaisseur économique, nous utiliserons la méthode de Wadin, en donnant la valeur $T_{se} = 15^\circ\text{C}$ à la température de surface extérieure de tuyauteries. Nous constatons que l'épaisseur calculée par cette méthode a une valeur très proche à celle trouvée par la première méthode, c'est-à-dire $e = 30\text{mm}$.

2) *Déperdition thermique unitaire* : En négligeant toujours la résistance de la convection interne et celle de la paroi interne, les résultats obtenus montrent que la valeur de la déperdition thermique unitaire pour le diamètre $D_2 = 89\text{mm}$ ($q = 5,19 \text{ W/m}$) est supérieure à celle relative au diamètre $D_2 = 60\text{mm}$ ($q = 3,91 \text{ W/m}$).

3) *Chute de température* : Pour la conduite dont le diamètre $D_2 = 89\text{mm}$, la valeur de la chute de température totale est $\Delta T = 0,00073^\circ\text{C}$, et pour $D_2 = 60\text{mm}$, on trouve $\Delta T = 0,9954^\circ\text{C}$. Dans ce cas, nous remarquons que la chute de température est trop faible.

C. Canalisation de transport de l'eau froide

Les données suivantes sont nécessaires pour les différents calculs :

- les longueurs des tuyauteries (L) : 10 m et 9m,
- le diamètre intérieur de la tuyauterie (D_1) : 87mm,

- le diamètre extérieur de la tuyauterie (D_2) : 89mm,
- la masse volumique du fluide : $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$,
- le débit masse du fluide : $\dot{m}_f = 2000 \text{ kg/h}$,
- la chaleur spécifique du fluide : $C_p = 4185 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$,
- température intérieure de fluide : $T_i = 15^\circ\text{C}$,
- température ambiante $T_a = 30^\circ\text{C}$ (valeur maximale possible),
- température de surface minimale pour éviter la condensation, correspondant à la température de rosée, soit pour : $T_a = 30^\circ\text{C}$ et une humidité relative HR =80% (Diagramme de Mollier), soit : $T_{se} = 27^\circ\text{C}$.
- la température moyenne : $T_{moy} = (T_i + T_{se}) / 2 = 21^\circ\text{C}$
- la conductivité thermique est déterminée par extrapolation, en utilisant les données du tableau I ($\lambda_i = 0,0396 \text{ W/m K}$).
- le coefficient d'échange externe est déterminé en utilisant les équations 4, 5 et 6 (l'air est calme, car l'installation est placée dans un local fermé) avec $\beta = 1,84$ (surfaces verticales) et $\beta_r = 4,5$ [7] pour une émissivité inférieure à 1. On trouve : $h_e = 7,36 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

1) *Épaisseur de l'isolant*: En absence d'exigence particulière, la résolution graphique de l'équation (1), permet de trouver la valeur de l'épaisseur $e = 19\text{mm}$.

Dans le cas de l'épaisseur économique, nous utiliserons la méthode classique (méthode par itération). L'épaisseur qui donne le coût minimal a pour valeur $e = 6\text{mm}$; or les calculs montrent que pour cette valeur, l'eau se condensera sur la paroi extérieure du tube, ce qui nous oblige de maintenir la valeur de l'épaisseur trouvée précédemment, c'est-à-dire $e = 19\text{mm}$.

2) *Déperdition thermique unitaire* : En négligeant toujours la résistance de la convection interne et celle de la paroi interne, la valeur de la déperdition thermique unitaire est : $q = 6,47 \text{ W/m}$.

3) *Chute de température* : Pour la conduite étudiée, la valeur de la chute de température totale est $\Delta T = 0,006^\circ\text{C}$, avec : $a = 1,5$, $v_f = 0,109\text{m/s}$. Le résultat obtenu montre que l'isolation thermique est parfaite.

CONCLUSION

L'étude a été menée sur trois systèmes: transport de la vapeur d'eau chaude, transport d'un liquide épais devient difficile à pomper lorsque sa température est baissée et transport de l'eau froide.

Dans chaque cas, nous avons calculé l'épaisseur de l'isolant par deux méthodes différentes ; ensuite, nous avons comparé

les deux méthodes (technique et économique), pour obtenir la meilleure épaisseur de l'isolant.

Dans le cas du transport de la vapeur d'eau, les résultats obtenus montrent que l'épaisseur calculée par la méthode technique est de 30mm, et par la méthode économique 50 mm, donc la valeur d'épaisseur conseillée égale à 50 mm, parce qu'elle est plus économique. Cette valeur est en concordance avec celle de l'isolant déjà placé sur le site. Dans ce cas, la chute de température calculée dans la conduite est inférieure à celle mesurée ; cela peut être expliqué par l'imperfection d'étanchéité de la protection de l'isolation ainsi que certaines brides et vannes non isolés, ou par l'influence du pont thermique par les supports et des appuis. Pour accroître l'efficacité de l'isolation thermique existante on propose : la rénovation des sections affectées de l'isolation, l'isolation des brides et des vannes et la limitation de l'influence du pont thermique par l'utilisation des supports moins conducteurs.

Dans le cas du transport du Lauryl éther sulfate de sodium on trouve que l'épaisseur par les deux méthodes est de 30 mm. Cette épaisseur assure le maintien de la fluidité du liquide, quand il s'arrête dans la conduite pendant une durée de six heures et à une température ambiante de 10°C .

Dans le cas du transport de l'eau froide, on trouve que l'épaisseur par la méthode technique est de 19mm, et par la méthode économique 6 mm. Dans ce cas, la valeur d'épaisseur conseillée égale à 19 mm, pour éviter la condensation le long de la paroi extérieure de la protection de l'isolant.

Enfin, nous ne pouvons terminer cette étude sans espérer une continuité dans cet axe de recherche, dans le but de traiter ce phénomène sous tous ses aspects, et trouver des solutions innovantes, pour la protection de l'environnement et l'économie de l'énergie.

REFERENCES

- [1] D. Petit, *Calorifugeage. Isolation thermique des équipements*, Ed. Technique de l'ingénieur, BE9850, 2010.
- [2] J. Danckaert, *Isolation thermique industrielle*, Ed. Technique de l'ingénieur, B2347, 1994.
- [3] J. Danckaert, *L'isolation thermique industrielle*, 2^{ème} Ed. Technique et documentation, Paris, 1981.
- [4] Eberle, *Versuche über den Wärme und Spannungsverlust bei Fortleitung gesättigten und überhitzten Wasserdampfes*. 78 VDI (D), 1908.
- [5] A. Wadin, *Le choix rationnel du calorifuge le plus économique*, Ed. Dunod, Paris, 1947.
- [6] R. H. Perry, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Seventh Edition, McGraw-Hill, 1997.
- [7] W. Cereser, *Tuyauteries Transmission de la chaleur*, Ed. Technique de l'ingénieur, A820, 1979.
- [8] C. Langlais, S. Klarsfeld, *Isolation thermique à température ambiante. Bases physiques*, Ed. Technique de l'ingénieur, BE9860, 2004.
- [9] C. Langlais, S. Klarsfeld, *Isolation thermique à température ambiante. Propriétés*, Ed. Technique de l'ingénieur, BE9861, 2004.
- [10] L. Hollaert, *Analyse de la rentabilité financière et des avantages liés à l'isolation thermique. étude de cas adaptés au modèle belge*, Mémoire de Master, Université libre de Bruxelles : S. N, 2014.

CLASSIFICATION DES ESPECES VEGETALES PAR FAMILLE

Trey Zacrada Françoise Odile^{#1}, Konan Brou Marcellin^{#2}, E.Olajubu^{*3}

[#]*Electronique et Electricité Appliquées, Institut National Polytechnique Houphouet Boigny
Yamoussoukro, Cote d'Ivoire*

^{*} Faculty of Computer Science Obafemi Awolowo University
Ile-Ife, Nigeria

¹mariefranceodiletrey@gmail.com

²konanbroumarcellin@yahoo.fr

³emmolajubu@oauife.edu.ng

Abstract—La classification a été au cœur de plusieurs débats chez les botanistes. Cela vient de la difficulté à pouvoir définir clairement les différentes familles des plantes. En effet, la majorité des méthodes utilisées sont manuelles ce qui rend cette tâche assez difficile. A travers cet article nous faisons recours à la classification automatique afin de faciliter le regroupement des plantes par similarité. Pour ce faire, le modèle ZACclassification, contenant l'algorithme de K-Means est utilisé dans l'optique de classer les plantes en famille.

Keywords— Apprentissage automatique, taxonomie, Vegetable dataset, K-means.

I- INTRODUCTION

La préservation de la biodiversité repose sur une classification précise, fondée sur la science (autrement dit, un système de désignation des organismes). En effet, sans cela, nous serons incapables de décrire la multitude d'espèces qui peuplent les forêts tropicales, et de les comparer au petit nombre qui vivent dans nos pays. En l'absence d'une telle classification, il serait impossible d'identifier les espèces végétales de notre environnement [1].

A- Etat de l'art

Traditionnellement, les botanistes utilisent les clés d'identification pour classer les plantes. Ces identifications concernent généralement les caractéristiques morphologiques des végétaux. [2] [3] [4]. Celle-ci sont exploitées manuellement et concerne principalement les caractéristiques telles que : la feuille, la tige, la fleur, les fruits et les racines. Leur mode opératoire reste une activité difficile. Pour palier à cette insuffisance, certains acteurs procèdent à la digitalisation de ces clés.

Ils ont créé un outil de conversion des documents papiers en dossiers électroniques. Mais cet outil n'a pas été validé par des experts [5], par conséquent, il est peu fiable. C'est sur cette

lancée, qu'un outil polyvalent de base de données informatisée des plantes se constitue [6].

Par ailleurs *Thierry Pernet et al.* se servent de l'apprentissage automatique pour identifier une plante à partir de sa feuille. Ils utilisent la photographie de cette feuille pour extraire les caractéristiques telles que la texture, la couleur et la forme tout en s'appuyant sur l'algorithme de réseaux de neurones convolutionnels [7]. Cependant, ces descripteurs ne donnent pas de sémantique particulière sur l'image [8]. Aussi, force est de constater que dans son processus d'identification, la segmentation qui devrait augmenter la précision de la classification, biaisait les résultats [9].

B- Méthodologie

À travers cet article, nous proposons un mode de classification plus poussée en utilisant les descripteurs de la hauteur de la feuille ainsi que celui de la taille de la tige. L'accent sera mis sur leurs valeurs réelles et non celles extraites de leur image. Pour ce faire, nous nous servons de l'algorithme de *K-Means* pour la mise en place de cette classification non supervisée en vue de regrouper nos plantes en clusters de famille.

Ce modèle nommé ZACClassification se déroule en trois étapes : l'élaboration de la base de données, le pré-traitement et la classification. Cette approche est illustrée par la *figure 1* suivante :

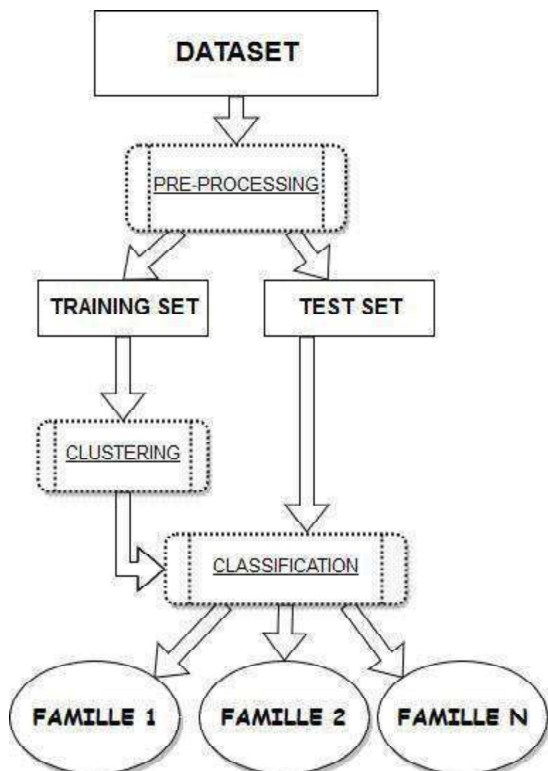


Fig 1 : processus d'identification des familles de plantes

Pour mettre en pratique cette méthodologie, nous modélisons toutes les données afférentes à nos plantes, ensuite, nous simulons les résultats les interprétons et enfin une conclusion.

II- MODELISATION

A- Elaboration du dataset

Pour réaliser notre dataset, nous faisons l'acquisition des données de différents sources et procédons à son épuration. La *figure 2* ci-dessous nous présente le mode de fonctionnement. Selon nos sources d'acquisition des différentes plantes [10] [11] [12], nous constituons une base de données. Nous reportons le nom de la plante avec la taille maximale de sa tige (TMAX) en millimètres et la longueur maximale de sa feuille (LMAX) en millimètre. C'est la base de données redondantes comme l'indique la figure suivante

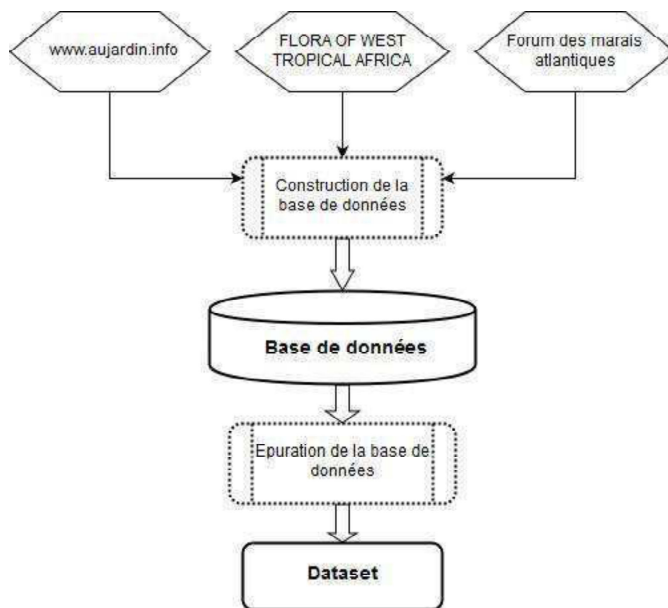


Fig 2. Elaboration du Dataset

Tableau 1: Base de données redondantes (J. Hutchinson et al)

PLANTES	TMAX	TMIN	LMAX	LMIN
Thomsonii	13716	13716	150	100
Xylopa Africana	12192	9140	160	90
Staudtii	45720	45720	160	90
Ruberscens	27432	27432	240	90
Eliotii	9144	27432	90	50
...
Sofa	6096		90	60
Afzelii	4572		250	70
Margaritaceus	1200		4	4
Aucheri	1500		5	4
Uvaria Scabrida	9144		180	100

Après épuration de cette base, nous obtenons le dataset suivant :

Index	TMIN	TMAX	LMIN	LMAX
0	1.37e+04	1.37e+04	100	150
1	9.14e+03	1.22e+04	90	160
2	4.57e+04	4.57e+04	90	160
3	2.74e+04	2.74e+04	90	240
4	2.74e+04	2.74e+04	130	130
5	9.14e+03	9.14e+03	50	90
6	2.44e+04	2.44e+04	60	130
7	1.83e+04	1.83e+04	150	150
8	914	2.44e+03	40	80
9	3.05e+03	3.05e+03	45	150
10	6.1e+03	6.1e+03	70	120
11	6.1e+03	6.1e+03	60	90
12	4.57e+03	4.57e+03	70	250
13	9.14e+03	9.14e+03	100	180

Fig 1: Dataset PlantData

B- Pré-traitement

Nous débarrassons notre base de données de toutes les données manquantes et catégorielles. Nous mettons toutes ces données à la même échelle. Le traitement ainsi terminé, nous divisons le data set en training set et test set

	0	1
0	1500.00	3.50
1	20.00	10.00
2	36576.00	240.00
3	1000.00	2.00
4	1500.00	0.90
5	9144.00	180.00
6	10.00	2.50
7	1000.00	2.00
8	160.00	7.00
9	9144.00	250.00

Fig 2: Training Set

	0	1
0	2438.40	80.00
1	45.00	1.50
2	1200.00	8.00
3	1300.00	2.00
4	450.00	90.00
5	9144.00	500.00
6	130.00	5.00
7	27432.00	160.00
8	170.00	40.00
9	12192.00	180.00

Fig 3: Test Set

C- Classification

De tous les algorithmes du clustering, le *K-MEANS* est le plus utilisé. Il a la capacité de bien analyser un ensemble de données, caractérisés par des descripteurs afin de regrouper ces données en clusters [13].

Étant donné un ensemble de plantes (P_1, P_2, \dots, P_n) . On cherche à partitionner les n plantes en K familles. $\{F=F_1, F_2, \dots, F_n\}$ ($K < n$). En minimisant la distance (d) entre les plantes à l'intérieur de chaque partition (ou distance inter-cluster) $\text{Arg min} \sum \sum \|P_j - \mu_i\| = \text{Arg min} \sum \|F_i\| \text{ var } F_i$, ou μ_i , la moyenne des plantes de famille.

III- SIMULATION

Nous considérons notre *dataset*, *PlantData* composé de 129 plantes. Nous utilisons le training set composé de 103 plantes pour l'entraînement et réservons les 26 plantes du test set pour tester notre modèle.

A- Déterminations des K familles ou clusters

Nous utilisons la méthode *Elbow* [14], pour trouver le nombre optimal de clusters.

```

from sklearn.cluster import KMeans
wcss = []
for i in range(1, 11):
    kmeans = KMeans(n_clusters = i,
                    init = 'k-means++', random_state = 0)
    kmeans.fit(X_test)
    wcss.append(kmeans.inertia_)
plt.plot(range(1, 11), wcss)
plt.title('La méthode Elbow')
plt.xlabel('Nombre de clusters')
plt.ylabel('WCSS')
plt.show()
    
```

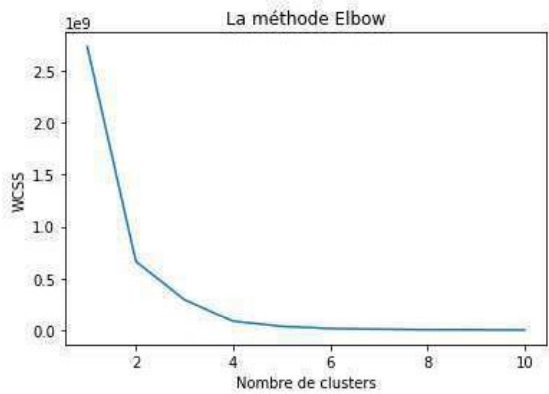


Fig 4: Choix du cluster par la méthode Elbow

Visualisons nos plantes dans le plan avant l'application de l'algorithme du K-Means.

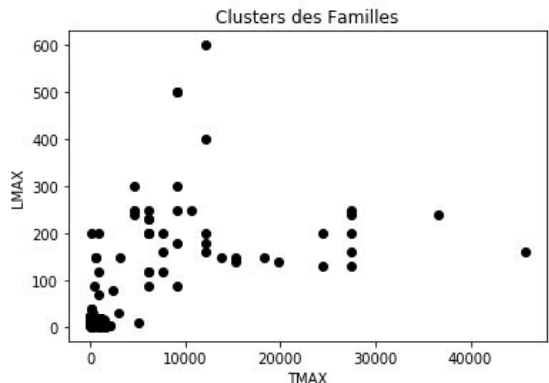


Fig 5: Les différentes plantes à classifier

```

- Algorithme de la construction du modèle
from sklearn.cluster import KMeans
kmeans = KMeans(n_clusters = 3, init =
'k-means++', random_state = 0)
y_kmeans = kmeans.fit_predict(X_test)
plt.scatter(X_test[y_kmeans == 1, 0],
X_test[y_kmeans == 1, 1], c = 'red',
label = 'Cluster 1')
plt.scatter(X_test[y_kmeans == 2, 0],
X_test[y_kmeans == 2, 1], c = 'blue',
label = 'Cluster 2')
plt.scatter(X_test[y_kmeans == 0, 0],
X_train[y_kmeans == 0, 1], c = 'green',
label = 'Cluster 3')
plt.title('Clusters des Familles')
plt.xlabel('TMAX')
plt.ylabel('LMAX')
plt.legend()
    
```

Appliquons le modèle à nos plantes à classifier

Nous obtenons des clusters de familles comme l'indique la figure suivante :

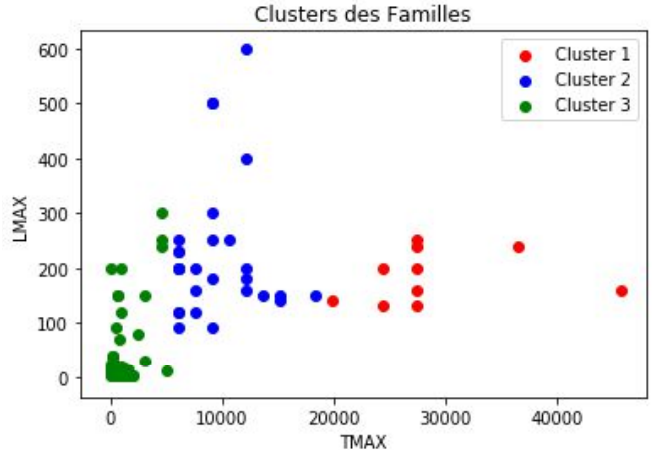


Fig 6: Famille des plantes

B- Performance du modèle

A partir des plantes du test set, nous évaluons la performance de notre modèle. Le tableau ci-dessous récence les plantes prédites à partir de celles qui ont été observées.

Tableau 2 : la matrice de confusion (Philippe Beraud)

PLANTES OBSERVEES	PLANTES PREDITES		
	CLUSTERS	1	2	3
1	6	0	2
2	0	8	2
3	2	0	7

Dans le tableau suivant, nous calculons les indicateurs de base de la qualité de la prédiction sur les différents clusters.

Tableau 3 : les indicateurs de performance (Philippe Beraud)

	PRECISION	RAPPEL	F-mesure
CLUSTER 1	0.857142	0.75	0.8
CLUSTER 2	0.8	1	0.88889
CLUSTER 3	0.777778	0.7	0.736842

La précision totale du modèle s'élève à 81,16% avec une marge d'erreur de 18,83%

C- Interprétation

Selon le critère de la longueur maximale de la feuille et la taille maximale de la tige des plantes, nous obtenons trois familles différentes de plantes, à savoir *le cluster 1* représenté par la

couleur rouge, *le cluster 2*, la couleur verte et enfin, *le cluster 3* par la couleur bleue.

Les résultats ont été simulés avec un training set composé de 103 plantes. Nous avons testé le modèle avec une base de 26 plantes et les résultats obtenus sont conformes aux résultats de l'entraînement. De plus, par analogie à la réalité, *le cluster 1* regroupe les arbres dont la longueur des feuilles varie entre 150 et 250 millimètres. Il correspond à la famille des Annonacea.

CONCLUSION

Au terme de cette étude, nous avons défini la taille de la tige et la longueur des feuilles des plantes comme descripteurs pertinents de famille de plantes. Aussi avons-nous développé un modèle de classification, basé sur l'algorithme de *K-Means*. Pour une base de 129 plantes, ce modèle a pu regrouper de façon automatique ces espèces végétales en trois familles distinctes. Le taux de réussite de cette classification est de 81,16%

REMERCIEMENT

The World Bank ICT Department, Faculty of Computer Science and Faculty of Botany Obafemi Awolowo University. Le LARIT pour les moyens mis à disposition pour le travail effectué.

Nous voulons aussi remercier en particulier Mr Aderounmu G. S., Mr Goore Bi Tra, Mrs Odukoya, Mr N'Guessan Behou.

REFERENCES

- [1] Dominique Picouet et Al, *les règles de la taxonomie : nommer les espèces* 2018
- [2] Denis Paquette, *clés des 16 genres de Cypéraceae, Flora Quebeca*, 19 Septembre 2016
- [3] André Sabourin, *clé des crucifères., flora québécoise*, mars 2018
- [4] Denis Paquette, *clés des verges d'or, Flora Québeca*, 2016
- [5] Rousse Guillaume, Éric Villemonte de La Clergerie. *Analyse automatique de documents botaniques: le projet Biotim. proc. of TIA'05 : Journées Terminologie ; Intelligence Artificielle, Apr 2005, Rouen, France, France. 2005*
- [6] Raymond Boyd et Al, *Une base de données informatisée transdisciplinaire de la flore chez les sémé du burkina faso : un outil pour l'étude du lien nature-société*, 2014
- [7] Thierry Piernot et Al, *Flora Bellissima, un nouvel outil pour découvrir la flore*, mars 2014.
- [8] Zhong-Qiu Zhao et al), *Apleaf : an efficient android-based plant leaf identification system, Neurocomputing*, 2014
- [9] Mads Dyrmann et al., 2016, *Plants species classification using deep convolutional neural network*, 10.1016/j.biosystemseng.2016.08.024, 2016
- [10] *Forum des Marais Atlantiques 2017, Herbar Numérique, Flore en zone humide*, Région nouvelles d'Aquitaine, 93 pages [http:// www.forum-zones-humides.org](http://www.forum-zones-humides.org)
- [11] Schoonderwoerd et al, *Zygotic dormancy underlies prolonged seed development in Franklinia alatamaha (Theaceae): a most unusual case of reproductive phenology in angiosperms*, *Botanical Journal of the Linnean Society*, Volume 181, Issue 1, 1 May 2016, Pages 70–83.
- [12] Hutchinson, J., Dalziel, J.M., Keay, R.W.J., Hepper, N.: *Flora of West Tropical Africa*. (2014).
- [13] M. Dundar, Q. Kou, B. Zhang, Y. He, and B. Rajwa, "Simplicity of Kmeans Versus Deepness of Deep Learning: A Case of Unsupervised Feature Learning with Limited Data," in *2015 IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, 2015, pp. 883–888.
- [14] Bholowalia, P., Kumar, A.: *EBK-means: A clustering technique based on elbow method and k-means in WSN. International Journal of Computer Applications*. 105, (2014).
- [15] Philippe Beraud - MSFT August 5, (2014)

L'étude des pertes de tensions à l'interface des électrodes d'une Cellule Solaire Sensibilisée à Colorant (CSSC)

Atouani Toufik *¹, Dennai Benmoussa *², Azedine.B*,Halou.F*

*Matter Sciences Department, Faculty of Exact Sciences, University Tahri Mohammed Béchar Algeria.

¹ toufikatouani1972@yahoo.fr

² deennai_benmoussa@yahoo.com

Abstract— Dans ce travail, une approche précise pour calculer les pertes de tension aux interfaces d'une Cellule Solaire Sensibilisée à Colorant (CSSC ou Dye Sensitized Solar Cell, DSSC) est proposée. Dans cette approche, le transfert d'électrons à TCO / TiO₂ et à l'électrolyte / contre-électrode est soumis au modèle de barrière de Schottky basé sur la théorie d'émission thermionique et l'expression de Nernst. Ce dernier est utilisé pour déterminer la concentration du couple redox médiateur dans l'électrolyte au voisinage de la surface de la contre-électrode en tenant compte de l'influence de la porosité de la couche active; sans oublier l'influence de celui-ci sur l'absorption de la lumière et la mobilité des électrons. Il a été constaté que les pertes de tension aux deux interfaces de DSSC étaient significatives lorsque la hauteur de la barrière de Schottky et la porosité de la couche active dépassaient des valeurs critiques. Ces pertes affectent le point de puissance maximale (MPP), mais ils n'affectent pas le courant de court-circuit (J_{cc}) et la tension de circuit ouvert (V_{oc}).

Keywords— cellule solaire;pertes de tensions;interface; CSSC

I. INTRODUCTION

Malgré que marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90 % par le silicium, les composites organique/inorganique, comme les cellules solaires organiques, sont appelés à s'imposer là où les technologies du silicium font défauts. Les matériaux organiques, autrement dits les plastiques, moins onéreux, apparaissent en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible [1]. La cellule solaire à colorant (DSSC) est parmi les cellules solaires prometteuses dans le futur.

Ces dernières années, les cellules DSSC ont ressuscité beaucoup d'attention et de recherche pour développer une technologie de conversion d'énergie solaire à haute efficacité et à un faible coût [1-6].

À l'heure actuelle, DSSC peut atteindre une efficacité énergétique de 13% [5]. Une amélioration supplémentaire repose sur une meilleure compréhension des mécanismes de conversion de l'énergie et sur une modélisation précise pour une meilleure optimisation.

Dans le but de mieux comprendre et de déterminer l'influence des l'interfaces TiO₂/TCO et l'électrolyte/ contre électrode dans DSSC, plusieurs modèles théoriques sont proposés. Parmi ces modèles celui de la barrière de Schottky côté TiO₂/TCO en intégrant les différents modèles de

diffusion des électrons et la double couche pour l'interface électrolyte/métal (contre électrode).

Le modèle de l'émission thermoionique est utilisé pour décrire le transfert des électrons à l'interface TiO₂/TCO et pour déterminer la perte de tension à cette interface [7]. Très peu d'études sont se intéressées aux pertes de tension au niveau de l'interface électrolyte/contre électrode [6-8].

Dans ce travail, l'influence de la porosité de la couche active (TiO₂+sensibilisateur) est étudiée aussi. Car la porosité influe sur l'absorption ainsi que sur la concentration des ions I^-/I_3^- et par conséquent sur le transfert des électrons à travers l'interface l'électrolyte/contre électrode [9-11].

L'analyse paramétrique des résultats obtenus permet de voir l'effet de la hauteur de la barrière de Schottky (ϕ_b) sur la caractéristique (J-V) ainsi que l'effet de la porosité sur la puissance maximum (P_{max}, Maximum Power Point) et sur la perte de tension à l'interface électrolyte/contre électrode généralement négligée dans des études précédentes [6-7].

II. RAPPEL THÉORIQUE

La figure 1 est une représentation schématique la la DSSC [7]. L'injection des électrons du colorant excité vers la couche TiO₂ joue un rôle important dans les DSSC [12]. La densité des électrons qui traversent la couche mince et poreuse du TiO₂ vers l'oxyde conducteur transparent (TCO : Transparent Conducting Oxide) dépend du flux de la lumière incidente et de l'effet de piégeage-dépiégeage (trapping-detrapping). Les molécules du colorant oxydées sont régénérées par le médiateur redox (I^-/I_3^-). Finalement, le médiateur oxydé (I_3^-) dans l'électrolyte est transporté à la contre électrode où leur régénération se produit par les électrons transportés par l'intermédiaire du circuit externe. Il est important de mentionner qu'en raison de la taille des particules TiO₂ très petite (environ 20 nm) ainsi que l'effet écran "screening" de l'électrolyte, il n'y a aucun champ électrique macroscopique significatif dans la plupart des couches TiO₂ minces et poreuses. Par conséquent, les électrons et les médiateurs redox sont transportés principalement par diffusion [6].

Les électrons photogénérés dans le colorant et injectés dans la bande de conduction (BC) du TiO₂ vont augmenter la densité des électrons et décaler le niveau de Fermi (EF) plus près du bord (BC). Théoriquement, la différence entre (EF) du

TiO₂ et le potentiel redox de l'électrolyte est approximativement égale à la phototension.

Ceci est vrai dans le cas du circuit ouvert ; car dans ces conditions il n'y a aucun courant qui traverse les interfaces électrode TiO₂ / TCO et électrolyte / contre électrode.

Cependant, dans les conditions de fonctionnement normal, les différences de potentielle additionnelles à travers ces deux interfaces doivent être prises en considération. Des études récentes ont prouvé que dans le cas du circuit ouvert, il y a la présence d'un courant qui traverse l'interface TiO₂ / TCO et qui est dû à la recombinaison des électrons avec les médiateurs redox oxydés (I_3^-) à l'interface de TCO/ électrolyte [13].

Par conséquent, on s'attend à ce que les interfaces TiO₂ / TCO et électrolyte/ contre électrode influent sur la tension en circuit ouvert (VCO) et par voie de conséquence sur la caractéristique (J-V).

Dans cette étude, le modèle théorique utilisé est basé sur le principe de l'injection thermoïonique des électrons dans le but d'étudier l'effet de l'interface TiO₂/TCO sur les caractéristiques de la cellule DSSC.

Les bandes d'énergie d'une DSSC sont présentées dans la figure 2 et figure 3 [6].

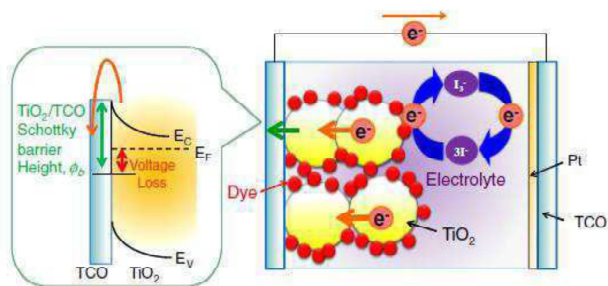


Fig.1: Schematic figure of DSSC [7].

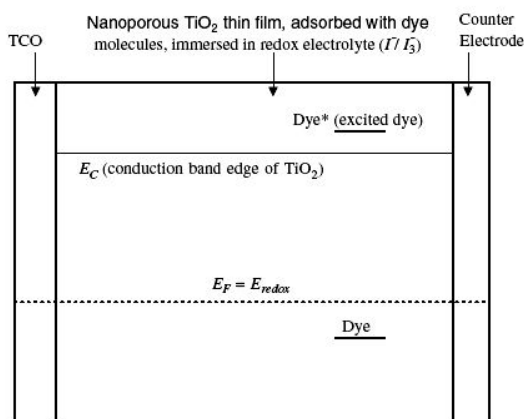


Fig.2: Potential diagrams of DSSC in dark

Quand la DSSC est éclairée, les niveaux de Fermi de TiO₂ et TCO augmentent à cause de la photoinjection comme le montre la figure 3.

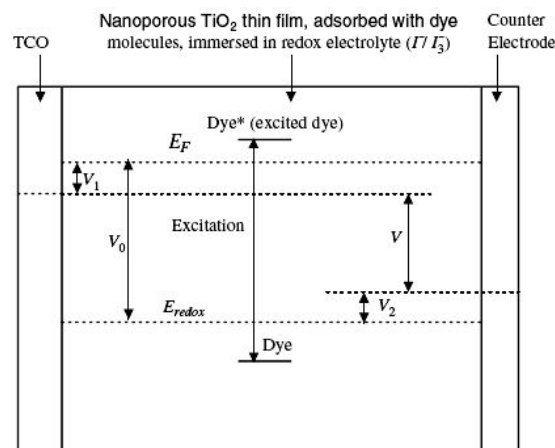


Fig.3: Potential diagrams of DSSC under illumination.

La phototension peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$V = V_0 - V_1 - V_2 \quad (1)$$

avec :

V_0 : La différence de potentiel entre le niveau de Fermi (TiO₂) et potentiel redox de l'électrolyte donnée par l'équation (2) :

$$V_0 = E_F(TiO_2) - E_{redox}(Electrolyte) \quad (2)$$

V_1 : La perte en tension à l'interface TiO₂ / TCO.

V_2 : La perte en tension à l'interface électrolyte/contre électrode.

Comme l'interface TiO₂/électrolyte est en série avec l'interface TiO₂/TCO, la densité de courant (J) à travers la couche mince TiO₂ est égale à la densité de courant à travers le contact TiO₂/TCO. L'expression de la phototension (V) et de la densité de courant (J) peut être obtenue en trouvant (V₀), (V₁) et (V₂) et en remplaçant ces expressions dans l'équation (1).

La différence de potentiel (V₀) est obtenue en utilisant le modèle proposé par Sodergren [15]. La génération, le transport et la recombinaison à l'état d'équilibre sont décrits par l'équation de continuité suivante :

$$D \frac{\partial^2 n(x)}{\partial x^2} - \frac{n(x) - n_0}{\tau} + \phi \alpha \exp(-\alpha x) = 0 \quad (3)$$

avec :

x : Position ; distance dans la couche mince à partir de l'interface TiO₂/TCO (cm),

$n(x)$: Concentration des électrons à la position (x) (cm⁻³),

$n_0 = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$: La concentration des électrons à l'obscurité [14],

τ : La durée de vie des électrons (s),

ϕ : L'intensité de la lumière incidente (cm⁻².s⁻¹),

α : Coefficient d'absorption (cm⁻¹),

D : Coefficient de diffusion des électrons (cm².s⁻¹).

Les conditions aux limites en court-circuit sont :

$$n(0) = n_0 \quad (4)$$

et

$$\left(\frac{dn}{dx}\right)_{x=d} = 0 \quad (5)$$

d : L'épaisseur de la couche mince (distance dans la couche mince à partir de l'interface TiO2/TCO).

La densité de courant en court-circuit (JCC) est donnée par l'équation suivante :

$$J_{cc} = \frac{e\phi L\alpha \left[-L\alpha \cos\left(\frac{d}{L}\right) + \sin\left(\frac{d}{L}\right) + L\alpha \exp(-d\alpha) \right]}{(1 - L^2\alpha^2) \cosh\left(\frac{d}{L}\right)} \quad (6)$$

avec :

e : La charge élémentaire,

L = $\sqrt{D\tau}$: La longueur de diffusion de l'électron (cm),

Quand la DSSC fonctionne sous éclairage, une tension apparaît due à la différence de potentiel entre le niveau de Fermi et le potentiel de redox de l'électrolyte. La densité électronique à x=0 devient :

$$n(0) = n \quad (7)$$

et la condition aux limites à x=d mentionnée dans l'équation (5) reste inchangée.

La solution de l'équation de continuité (3) avec ces nouvelles conditions devient :

$$V_0 = \frac{kTm}{e} \ln \left(\frac{(J_{cc}-J)L \cosh\left(\frac{d}{L}\right)}{eDn_0 \sinh\left(\frac{d}{L}\right)} + 1 \right) \quad (8)$$

avec :

T (K) : La température absolue ;

k (JK⁻¹) : La constante de Boltzmann.

Le facteur d'idéalité (m) varie entre la valeur de 1 à 2 car la thermo-émission est dominante autour 300°K, en plus dans la plus part des études expérimentales à cette température, il est autour 1.1 à 1.2 [16-18],

L'oxyde conducteur transparent (TCO) hautement dopé (ex. F-dopé, SnO2) a une grande conductivité et peut être considéré comme un métal [19]. Ainsi, l'interface TiO2/TCO peut alors être assimilée à une barrière de Schottky [6].

Sous illumination, le flux d'électrons à travers l'interface TiO2/TCO produit une perte de tension (V1). Comme les électrons excédentaires sont injectés à partir du colorant excité au lieu des électrons de la bande de valence du TiO2 ; aucune recombinaison ne se produit dans les couches de TiO2 et TCO. C'est pourquoi, seul le transfert de charges à partir de TiO2 vers TCO est considéré. Selon la théorie du contact métal/semi-conducteur, l'association d'un métal et d'un semi-conducteur conduit à un système caractérisé par un niveau de Fermi unique comme il est indiqué dans la figure (4).

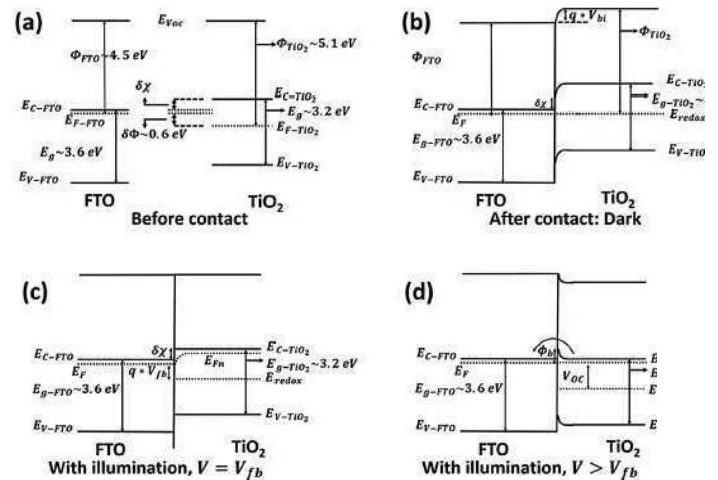


Fig.4: Band diagram detailing the TCO/TiO2 interface (a) before contact, (b) under dark condition, and (c) under illumination and when the applied voltage is equal to the "flat band" condition and photo generated electrons shift the quasi Fermi level, (d) when the applied voltage exceeds the flat band voltage resulting in an energy barrier of ϕ_b for electrons from TiO2 to TCO

La barrière énergétique d'un tel contact ($q\phi_b$) est déterminée par la différence des travaux de sortie et du type de matériau (type n ou p). Dans un cas non-idéal où les travaux de sortie du métal et du semi-conducteur ne sont pas identiques, les niveaux d'énergie des bandes de valence et de conduction se courbent lors de l'établissement de l'équilibre, figure (4.b).

En fonctionnement, l'application d'une tension vient perturber cet équilibre et favorise un écoulement des charges du semi-conducteur vers le métal comme l'indique la figure (4.c).

Le transport de charge à travers la barrière de potentiel peut faire appel à plusieurs mécanismes comme l'indique la figure (5).

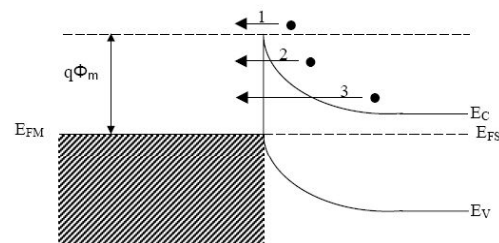


Fig.5: Transport mechanism of charge carrier through a metal / semiconductor potential barrier direct-bias.

1 : Current by thermoemission.

2 : Current by thermoemission assisted by tunnel effect (Fowler-Nordheim).

3 : Current by tunnel effect (Fowler-Nordheim).

Puisque la couche TiO2 est légèrement dopée et la cellule fonctionne à température ordinaire (300°K), les électrons injectés par effet tunnel sont

négligeables et seule l'injection thermoïonique domine dans ce transfert d'électrons [9].

Par conséquent, la perte de tension (V_1) à l'interface TiO_2/TCO selon la théorie de l'émission thermoïonique est donnée par l'équation suivante :

$$J = \gamma(1 - \beta_r)A^*T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV_1}{kT}\right) - 1 \right] \quad (9)$$

avec :

ϕ_b : la hauteur de la barrière de Schottky en (eV),

h : constante de Planck,

β_r : le coefficient de réflexion des électrons à l'interface et il dépend de la nature du métal, dans cette étude est égale à 0 ;

γ : paramètre sans unité, il dépend de qualité et des défaut à l'interface métal/semiconducteur pour des raisons de simplification on prend $\gamma = 1$,

A^* : la constante de Richardson donnée par la suivante équation :

$$A^* = \frac{4\pi m^* e k^2}{h^3} = 6.71 \times 10^6 Am^{-2}K^{-2} \quad (10)$$

m^* est la masse effective de l'électron dans le TiO_2 et sa valeur est donnée par l'équation suivante [6] :

$$m^* = 5,6m_e \quad (11)$$

L'équation (9) devient :

$$V_1 = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{J}{A^*T^2 \exp(-e\phi_b/kT)} \right) \quad (12)$$

Dans la partie qui suit nous nous intéressons au contact électrolyte/ contre électrode. La matière électroactive (solution RedOx) qui est consommée à une électrode plane doit être renouvelée en permanence. Elle est apportée à l'électrode par trois modes possibles : migration, diffusion et convection.

Considérons que $a_i = C_i$ (pour les solutions suffisamment diluées a_i est l'activité et C_i la concentration pour d'une espèce « i ») et que le transport de matière vers l'électrode plane est unidirectionnel selon l'axe des x.

Par convention, l'axe des x est orienté de la surface de l'électrode vers le cœur de la solution, de sorte qu'un flux se dirigeant vers l'électrode sera compté négativement.

$$J_i = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial \phi(x)}{\partial x} + C_i \vec{V}(x) \quad (13)$$

Dans l'équation (13), le premier terme est lié à la diffusion, le deuxième à la migration et le troisième à la convection. L'équation (13) est difficile à résoudre, mais peut être simplifiée dans certains cas.

Par exemple, le terme lié à la migration s'annule pour des espèces électroactives (dans cette étude I^-/I_3^-) non chargées ; de même, en présence d'un électrolyte support qui assure le transport du courant, la migration des espèces (I^-/I_3^-) est négligeable et on peut adopter le modèle de la couche de Nernst. On a alors un régime de diffusion convective stationnaire avec gradient linéaire de concentration des espèces (I^-/I_3^-) dans une zone de l'espace, d'épaisseur δ , proche de l'électrode et appelée couche de diffusion comme le montre ci-dessous la figure 6.

Cette couche d'électrolyte adjacente à la surface de l'électrode n'est pas affectée par la convection [20].

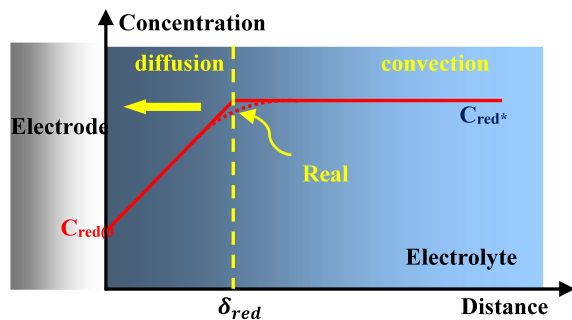


Fig 6 : Nernst layer: stationary convective diffusion regime (case of an oxidation current) [20].

Dans le cas où une espèce Red est consommée à l'électrode (courant d'oxydation), la concentration de cette espèce au cœur de la solution C_{red}^* est supérieure à celle à l'interface $C_{red}(0)$; le flux stationnaire de cette espèce au voisinage de l'électrode (en se limitant au phénomène de diffusion) est :

$$J_{red} = -D_{red} grad C_{red} \quad (14)$$

avec:

$$grad C_{red} = \frac{C_{red}^* - C_{red}(0)}{\delta_{red}}$$

La surtension de transport est obtenue en supposant que le potentiel de la cathode est donnée par l'expression de Nernst, en utilisant la concentration au voisinage de la surface de la contre électrode, ce qui est vrai uniquement si le système Redox (I^-/I_3^-) est suffisamment rapide dans cette zone. En tenant compte de la stœchiométrie de la réduction, on a [21]:

$$V_2 = \frac{RT}{nF} \left\{ \ln \left(\frac{C_o}{C_o(0)} \right) - \ln \left(\frac{C_R^3}{C_R(0)^3} \right) \right\} \quad (16)$$

avec :

$$C_0 = C_0(0) - \frac{Jd}{6F\varepsilon_p D_0} = C_0^{init} + \frac{3dl+3l^2\rho_p+d^2\rho_p}{12F\rho_p D_0(l+\rho_p d)} J \quad (17)$$

$$C_R = C_R(0) + \frac{Jd}{2F\varepsilon_p D_R} = C_R^{init} - \frac{3dl+3l^2\rho_p+d^2\rho_p}{4F\rho_p D_R(l+\rho_p d)} J \quad (18)$$

J: densité de courant (A/m²),

F : constante de Faraday,

d : épaisseur de la couche active poreuse (m),

l : épaisseur de la couche d'électrolyte (m),

ε_p : la porosité de la couche active poreuse.

D₀ et D_R respectivement le coefficient de diffusion de l'oxydant et le réducteur. C₀, C_R, C₀(0) et C_R(0) représente respectivement la concentration de l'oxydant (I_3^-) et le réducteur (I^-) à l'interface électrolyte/contre électrode et la concentration à x=0. C_0^{init} et C_R^{init} sont les concentrations initiales des espèces I_3^- , I^- respectivement.

La concentration des ions (I_3^-) à la surface métallique du contre électrode est nulle (C₀=0), à cause que leur réduction se fait rapidement avec les électrons du circuit externe. Donc, à partir de l'équation (17), on peut déduire le courant limite (J_{lim}) dans les conditions de se travail.

$$C_0 = 0 \Rightarrow J_{lim} = \frac{6F\varepsilon_p D_0 C_0(0)}{l} \quad (19)$$

En remplaçant l'équation (8), (12) et (16) dans l'équation (1) on obtient l'expression entre (J) et (V) de la cellule DSSC illustrée dans l'équation suivante :

$$V = \frac{kTm}{e} \ln \left(\frac{(J_{cc}-J)L \cosh\left(\frac{d}{L}\right)}{eDn_0 \sinh\left(\frac{d}{L}\right)} + 1 \right) - \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{J}{A^*T^2 \exp(-e\phi_b/kT)} \right) - \frac{RT}{nF} \left\{ \ln \left(\frac{C_0}{C_0(0)} \right) - \ln \left(\frac{C_R^3}{C_R(0)^3} \right) \right\} \quad (18)$$

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS:

L'effet du contact TiO₂/TCO sur les performances de la cellule à colorant dépend de la hauteur de la barrière de Schottky (ϕ_b), de la température et du courant de recombinaison à cette interface. Dans le cas d'un circuit ouvert, la densité de courant de recombinaison des électrons avec l'électrolyte par l'intermédiaire du TCO est de l'ordre de 10⁻⁵ à 10⁻¹ Am⁻² [13].

Dans cette analyse théorique la densité de courant est prise égale à 16 mA.cm⁻²[21,22].

Les résultats représentés dans la figure 7 montrent l'effet de la (ϕ_b) sur la perte de tension (V₁) à différentes températures.

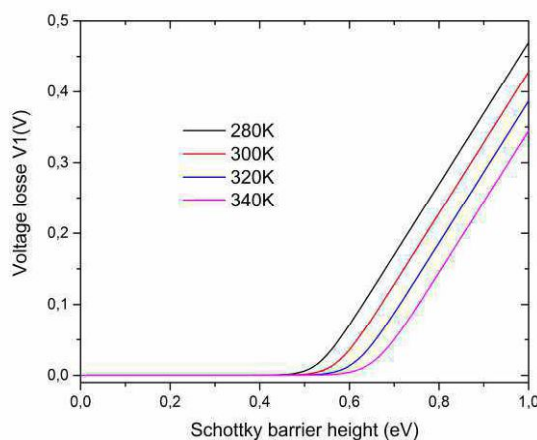


Figure 7: Voltage losses V1 at TiO₂/TCO interface variation with Schottky barrier height (ϕ_b) at various temperatures.

Il existe une valeur seuil de (ϕ_b) au dessous de laquelle les pertes (V₁) sont négligeables ($\phi_b = 0.5 eV$). Au-delà de ce seuil les pertes augmentent avec l'augmentation de la hauteur de cette barrière (ϕ_b). Ce seuil augmente avec la température. On remarque aussi qu'à basses températures, peu d'énergie thermique est disponible pour que les électrons traversent l'interface TiO₂/TCO ; ainsi, l'augmentation de (V₁) exige une grande énergie électrique.

La figure 8 illustre la variation des pertes (V₁) avec (ϕ_b) pour des densités de courant différentes.

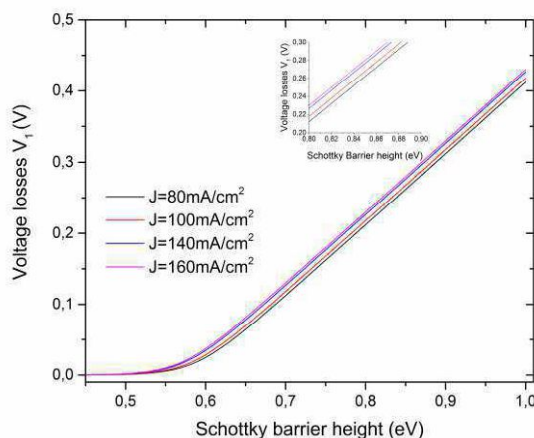


Figure 8: Voltage losses V1 at TiO₂/TCO interface variation with Schottky barrier height (ϕ_b) at various current densities (J) at 300K.

Ici encore, il existe une valeur seuil de ($\phi_b = 0.55 eV$). L'augmentation de (J) a comme conséquence une diminution de cette valeur critique de (ϕ_b). Puisque la recombinaison au niveau du substrat TCO a un effet négatif sur (Voc), il est préférable d'utiliser un matériau TCO qui a un travail de sortie relativement bas ou d'utiliser une couche de blocage.

Les résultats expérimentaux montrent qu'une couche de blocage au niveau du substrat TCO empêche les « mauvaises » réactions chimiques et améliore les performances de la cellule. [23,24]

L'effet de barrière de Schottky (ϕ_b) sur la caractéristique (J-V) de la cellule est représenté sur la figure 9. En raison de la faible densité de courant de recombinaison dans le cas du circuit ouvert, l'effet du contact TiO₂/TCO sur (V_{oc}) est petit ; mais quand la hauteur de barrière de Schottky est grande, l'influence sur les performances de la cellule est significative.

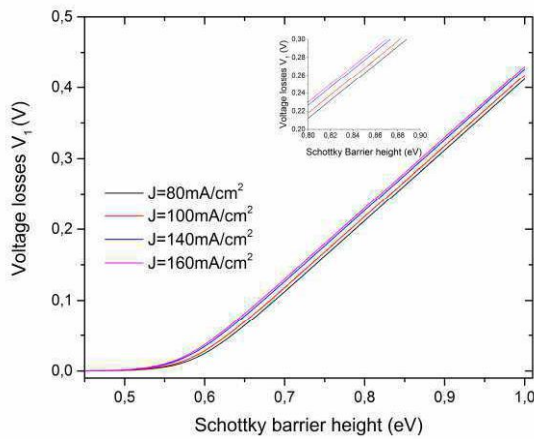


Figure 9: J-V curves at various Schottky barrier height (ϕ_b) at 300K

Dans cette partie, on va s'intéresser à la perte de tension (V_2) calculée à partir de l'équation (16). Selon cette équation il y a que la densité de courant et la porosité de la couche active qui peuvent influencer significativement sur ces pertes comme l'indique la figure 10.

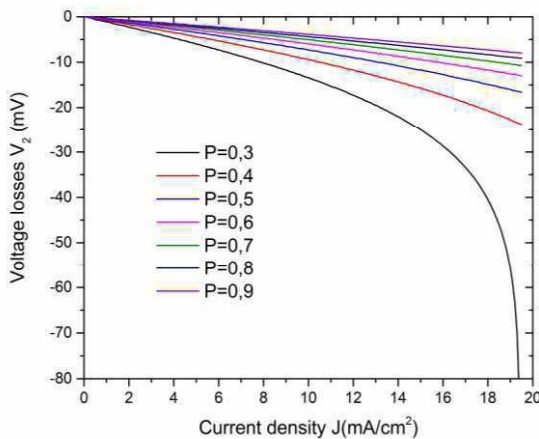


Figure 10: Voltage losses V_2 at electrolyte/counter electrode interface at various porosity of active layer.

Malgré que ces pertes de tension restent faibles par rapport aux pertes (V_1), causées par le contact TiO₂/TCO, on constate que les pertes V_2 diminuent avec l'augmentation de la porosité de la couche active. Mais la diminution de cette dernière affect

considérablement l'adsorption du colorant et par conséquence l'absorption de la lumière. Elle affecte aussi la mobilité des électrons dans la couche poreuse en favorisant la création des centres de piégeage des porteurs de charge.

Dans le but d'optimiser et de voir l'influence de la porosité sur la caractéristique (J-V), on a fixé la hauteur de la barrière de Schottky ($\phi_b = 0.5 \text{ eV}$) afin de minimiser les pertes (V_1). Les résultats obtenus sont représentés dans la figure (11.a) et la figure (11.b)

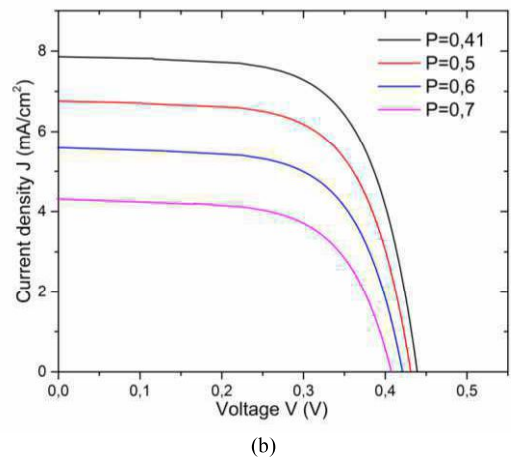
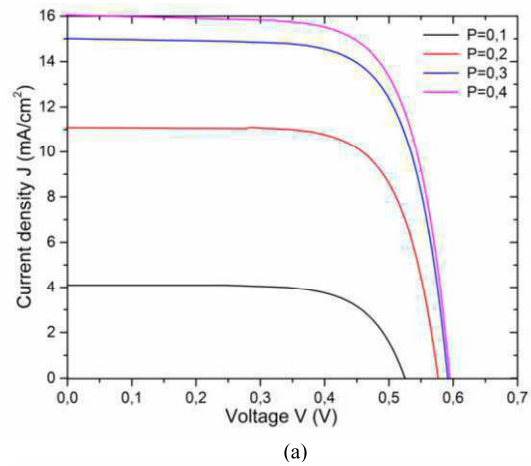


Figure 11: J-V curves with losses V_1 and V_2 at various porosity of active layer (a): $0.1 \leq \text{porosity } P \leq 0.40$, (b): $0.41 \leq \text{porosity } P \leq 0.7$

A partir des figures (10.a) et (10.b), on peut voir que l'augmentation de la porosité de la couche TiO₂ engendre une nette amélioration dans la caractéristique J-V de la cellule. En plus, au delà d'une valeur optimale $p=0.4$, l'effet de la porosité s'inverse ; l'augmentation de cette dernière diminue considérablement la densité de courant et par conséquent l'efficacité de la cellule DSSC. Des résultats similaires sont obtenus par Meng [22] et Nithyanandam [25].

Les mêmes données numériques dans ce travail mentionnées dans le tableau 1.

TABLE I :
 VALUE OF PARAMETER USED

Parameter	value
ϕ	1018 cm-2s-1
α	5.103 cm-1
τ	10 ms
D	2.0 10-4 cm-2s-1
d	10 μ m
l	4 μ m
DO	2.8 10-6 cm-2s-1
DR	3.0 10-6 cm-2s-1
C_O^{init}	40 mmol/l
C_R^{init}	500 mmol/l

La figure 12 illustre la caractéristique J-V. Elle montre l'effet des deux pertes de tension (V1) à l'interface TCO/TiO2 et les pertes (V2) à l'interface électrolyte/contre électrode à 300K. Il est clair que V1 a plus d'effet sur la caractéristique que V2. Cette constatation est la même faite par Meng et al [6] contrairement aux résultats publiés par El Tayyan [8]. Cette différence dans les résultats est normale, car dans cette étude l'impact de la porosité sur coefficient d'absorption ($\alpha(\epsilon p)$) et le coefficient de diffusion (D(ϵp)) des électrons dans la couche poreuse est pris en considération [22,26,27].

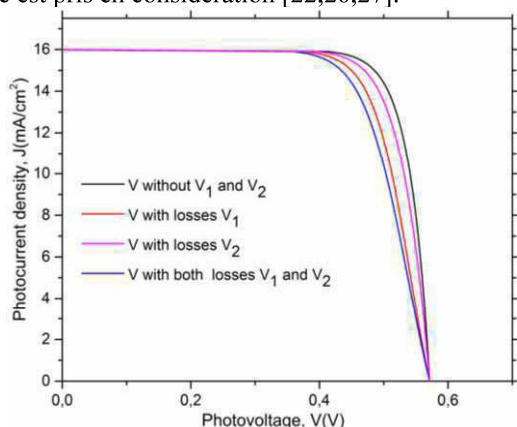


Figure 12: J-V curves of DSSC with V1 and V2 losses at 300K

D'autre part, la présence des pertes V2 (généralement négligées [6]) affect le point de puissance maximale (PPM), mais elle n'influe pas sur la tension en circuit ouvert (Voc) ni sur le courant en court-circuit (Jcc).

IV. CONCLUSIONS

Un modèle de barrière de Schottky basé sur la théorie de l'émission thermionique et l'expression de Nernst, utilisant la concentration (du couple rédox médiateur (I^- / I_3^-)) au voisinage de la surface de la contre-électrode, a été utilisé dans cette étude pour étudier le TiO2 / TCO) et les effets des interfaces électrolyte / contre-électrode sur les courbes JSS du DSSC On constate que les deux contacts affectent le MPP, mais ils n'affectent pas le courant de court-circuit (Jcc) et la tension de circuit ouvert (Voc). sur la température, la densité de courant et la hauteur de la barrière de Schottky et même sur la présence ou non d'une couche antiblocage entre le contact

métallique et le semi-conducteur: la hauteur de la barrière dépassant la valeur critique de 0,6 eV Il augmente également avec l'augmentation de la densité de courant (J).

On peut conclure, dans les conditions de ce travail, que l'influence des pertes de tension à la fois sur l'interface TCO / TiO2 et sur l'électrolyte / contre-électrode affecte les caractéristiques J-V du DSSC spécifiquement MPP, mais n'affecte pas Jcc et Voc.

En outre, il est clair que l'inclusion des pertes de tension à l'électrolyte / contre-électrode (V2) n'affecte pas beaucoup les caractéristiques J-V par rapport aux pertes à l'électrode active (V1).

REFERENCES

- [1] M. Grätzel, "Mesoscopic Solar Cells for Electricity and Hydrogen Production from Sunlight," *Chem. Lett.*, vol. 34, no. 1, pp. 8–13, 2005.
- [2] Ball, J. M., Lee, M. M., Hey, A., & Snaith, H. J., "Low-temperature processed meso-superstructured thin-film perovskite solar cells," *Energy & Environmental Science*, 6(6), 1739–1743, 2013
- [3] N. Park, "Organometal Perovskite Light Absorbers Toward a 20 % Efficiency Low-Cost Solid-State Mesoscopic Solar Cell," 2013.
- [4] S. Rutile, T. Nanorod, C. H. Nh, P. Perovskite, H. Kim, J. Lee, N. Yantara, P. P. Boix, S. A. Kulkarni, S. Mhaisalkar, M. Gra, and N. Park, "High Efficiency Solid-State Sensitized Solar Cell-Based on Submicrometer Rutile TiO₂ Nanorod and CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Sensitizer," *Nano Lett.*, 13, 2412–2417 2013.
- [5] J. Gong, K. Sumathy, Q. Qiao, and Z. Zhou, "Review on dye-sensitized solar cells (DSSCs): Advanced techniques and research trends," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, no. September 2016, pp. 234–246, 2017.
- [6] M. Ni, M. K. H. Leung, D. Y. C. Leung, and K. Sumathy, "Theoretical modeling of TiO₂/TCO interfacial effect on dye-sensitized solar cell performance," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 90, no. 13, pp. 2000–2009, 2006.
- [7] M. Onodera, R. Nagumo, R. Miura, A. Suzuki, H. Tsuboi, N. Hatakeyama, A. Endou, H. Takaba, M. Kubo, and A. Miyamoto, "Multiscale simulation of dye-sensitized solar cells considering schottky barrier effect at photoelectrode," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 4 PART 2, pp. 2–7, 2011.
- [8] A. A. El Tayyan, "Dye sensitized solar cell: parameters calculation and model integration," *J. Electron Devices*, vol. 11, pp. 616–624, 2011.
- [9] K. M. Lee, V. Suryanarayanan, and K. C. Ho, "Influences of different TiO₂ morphologies and solvents on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells," *J. Power Sources*, vol. 188, no. 2, pp. 635–641, 2009.
- [10] J. Kr, "Photocatalytic properties of different TiO₂ thin films of various porosity and titania loading," *Catalysis Today*, vol. 161, pp. 29–34, 2011.
- [11] J. Fan, Z. Li, W. Zhou, Y. Miao, Y. Zhang, and J. Hu, "Applied Surface Science Dye-sensitized solar cells based on TiO₂ nanoparticles / nanobelts double-layered film with improved photovoltaic performance," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 319, pp. 75–82, 2014.
- [12] N. J. Cherepy, G. P. Smestad, M. Gratzel, J. Z. and Zhang, "Ultrafast Electron Injection: Implications for a Photoelectrochemical Cell Utilizing an Anthocyanin Dye-Sensitized TiO₂ Nanocrystalline Electrode", *J. Phys. Chem. B*, 101, 9342-9351, (1997).
- [13] P.J. Cameron, L.M. Peter, *J. Phys. Chem. B* 109 (2005) 7392.
- [14] G. Rothenberger, D. Fitzmaurice, M. Gratzel, *J. Phys. Chem.* 96 (1992) 5983.
- [15] S. Sodergren, A. Hagfeldt, J. Olsson, S.E. Lindquist, *J. Phys. Chem.* 98 (1994) 5552.
- [16] Selman AM, Hassan Z, "Fabrication and characterization of metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetector based on rutile TiO₂ nanorod," *Materials Research Bulletin* 73, 29–37, 2016
- [17] Devi LG, Kavitha R, "A review on plasmonic metal-TiO₂ composite for generation, trapping, storing and dynamic vectorial transfer of

- photogenerated electrons across the Schottky junction in a photocatalytic system,” *Appl Surf Sci*,360,601-622,2015.
- [18] P. B. Pillai, A. N. C. Mendoza, M. M. De Souza, and G. Bree, “Extraction of Schottky barrier at the F-doped SnO₂ / TiO₂ interface in Dye Sensitized solar cells,” vol. 13142, pp. 1–11, 2014.
- [19] Tang Y, Wang C, Hu Y, Huang L, Fu J, “Superlattices and Microstructures Preparation of anatase TiO₂ nanorods with high aspect ratio for high-performance dye-sensitized solar cells,” *Superlattices Microstruct.* 89,pp.1-6,2016.
- [20] D. Devilliers and E. Mahé, “Cellules électrochimiques : aspects thermodynamiques et cinétiques Applications aux générateurs et aux électrolyseurs industriels,” *Actual. Chim.*, no. 3, pp. 31–40, 2003.
- [21] Papageorgiou N, Grätzel M, Infelta PP, “On the relevance of mass transport in thin layer nanocrystalline photoelectrochemical solar cells,” *Sol Energy Mater Sol Cells*;44(4):405-438,1996.
- [22] Ni, M. K. H. Leung, D. Y. C. Leung, and K. Sumathy, “An analytical study of the porosity effect on dye-sensitized solar cell performance,” vol. 90, pp. 1331–1344, 2006.
- [23] Cameron, P. J., Peter, L. M, “Characterization of titanium dioxide blocking layers in dye-sensitized nanocrystalline solar cells,” *The Journal of Physical Chemistry B*, 107(51), 14394-14400, 2003.
- [24] Y. M. Sung, “Deposition of TiO₂ blocking layers of photovoltaic cell using rf magnetron sputtering technology,” *Energy Procedia*, vol. 34, pp. 582–588, 2013.
- [25] K. Nithyanandam and R. Pitchumani, “Analysis and design of dye-sensitized solar cell,” *Sol. Energy*, vol. 86, no. 1, pp. 351–368, 2012.
- [26] J. Kr, “Photocatalytic properties of different TiO₂ thin films of various porosity and titania loading,” vol. 161, pp. 29–34, 2011.
- [27] F. Keymasi, A. Keshavarz, and M. Hatami, “Optik The effect of porosity on the current electron density at dye solar cell,” *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 126, no. 20, pp. 2539–2542, 2015.

Diffusion avisée après une collecte efficace de données par Intervalle de Confiance dans WSN basé sur l'IoT

Bedr-Eddine BENAÏSSA^{#1}, Fedoua LAHFA^{#2}

[#]Department of Computer sciences

Abou Bekr Belkaid University, Tlemcen, Algeria

¹bbedro@hotmail.fr

²fedouadidi@yahoo.fr.com

Résumé— L'exploitation d'un réseau de capteurs soulève de nombreux problèmes et ce à plusieurs niveaux algorithmiques : localisation, déploiement, collecte de données, couverture et réduction de la consommation d'énergie des batteries, afin d'optimiser la durée de vie du réseau. Ce dernier point a suscité particulièrement l'attention des chercheurs. L'objet de cet article serait ainsi de considérer une nouvelle méthode d'optimisation d'énergie d'un nœud de capteurs en minimisant les fréquences de transmission des données mesurées vers la station de base. Le nœud (mote) possédant plusieurs capteurs mesurant différentes valeurs environnementales, notre travail reviendrait par conséquent à catégoriser les données captées dans des classes prédéfinies, numérotées au préalable, que nous nous nommerons « intervalles de confiance ». De cette manière chaque valeur captée sera rangée dans une classe et seul son numéro sera envoyé à la station de base, si (et seulement si) un changement de classe par rapport à la valeur précédente est observé. Les résultats montrent que la collecte de données par intervalle de confiance réduit considérablement l'énergie des capteurs des notes.

Mots clés— WSN; IoT; collection de données; durée de vie d'un capteur.

I. INTRODUCTION

La modélisation de la consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs est l'un des aspects les plus importants dans l'exploitation de ces réseaux, étant donné que l'énergie est l'une de ses ressources les plus vitales [1]. Diverses références ont été rapportées dans ce domaine qui proposent des modèles de consommation énergétique permettant d'étudier et d'évaluer les différents types de dispersion d'énergie dans ces réseaux. Diery NGOM, dans sa thèse, fait une synthèse de la question et y souligne différents états de consommation d'énergies [2]. Il affirme ainsi que la distance entre les nœuds crée des interférences qui induiront de fréquentes collisions, impliquant des retransmissions de paquets et par conséquent un complément d'énergie, d'autant plus que les nœuds peuvent aussi être composés de plusieurs capteurs et d'actionneurs [3]. Dans l'article « A Review of Different Energy Efficiency Techniques in Wireless Sensor Networks » [4], les auteurs soulignent que la raison essentielle de la consommation d'énergie d'un capteur est due au processus de communication. Une application en temps

réel entraîne obligatoirement que des données de mise-à-jour soient transmises au nœud collecteur dans un délai limité. Une des premières techniques utilisées pour réduire la quantité de données transférées est l'agrégation, selon le type des données étudiées et en utilisant la série temporelle ARMA [5]. D'autres études proposent un schéma de routage dynamique basé sur un anneau d'agrégation de données de corrélation (RBCDR). Dans ledit schéma, les données nodales sont acheminées dans un premier temps vers des anneaux à énergie abondante et par sauts minimaux ; dans un second temps toutes les agrégations de données sont traitées le long de l'anneau puis acheminées vers le puits, par le chemin le plus court [6]. Les auteurs de l'article [7] proposent, quant à eux, un système de collecte de données - MTDR visant à minimiser le délai de transmission dans les réseaux sans fil à faible coefficient d'utilisation. Ce contrôle de mise à jour est l'un des moyens capables de réduire les données transmises par les nœuds ; il influe directement sur la consommation d'énergie et par conséquent augmente la durée de vie du réseau [8].

II. MOTIVATION

Dans les applications de réseaux de capteurs, il y a nécessairement collecte d'informations sur l'état d'un environnement afin de se prévenir des risques. Cela suppose donc que les données provenant de ces réseaux de capteurs aient un système de communication efficace et optimisé. L'optimalité, ici, signifie que le capteur doit pouvoir prendre une décision appropriée d'envoi ou non des données au collecteur. Dans les travaux d'Alduais et al. [8], les auteurs proposent de réduire le nombre de transmissions et diminuer la quantité de données, ce qui va prolonger la durée de vie du réseau. Ils introduisent ainsi la notion de changements relatifs et celles des différences relatives entre les valeurs mesurées à l'instant t du capteur et les valeurs déjà mesurées à l'instant $(t-I)$ du même capteur. Dans le même temps, [8] expose leur approche, avec des résultats concurrents, pour pallier les travaux de [9] dont les auteurs proposent un algorithme d'agrégation, avec le principe qu'aucun des nœuds du capteur ne puisse envoyer réellement ses données que si la valeur $Sv_{(t)}$ de l'état courant (Curent value measured by the Sensor) de la détection, est identique (algorithme ES : Exactly Same)

à la valeur du précédent état ($Sv_{(t-1)}$). En d'autres termes, la valeur du changement absolu entre ($Sv_{(t)}$) et ($Sv_{(t-1)}$) est nulle.

Dans le présent article, nous faisons le point sur une application de prise de décision des transmissions de données captées qui introduit la notion « d'intervalle de confiance. » Cet algorithme décidera ainsi de déclencher ou non la transmission des données vers la station de base pour participer à l'optimisation, la plus efficace, de la transmission et, par conséquent, en minimiser l'énergie.

III. ETAT DE L'ART

L'introduction de l'IoT a de toute évidence généré une somme importante de données, dont regorge le cloud computing lui-même. Par ailleurs, la demande d'objets intelligents, connectés (capteurs) et autonomes, permettant le confort et la sécurité domotique se fait de plus en plus importante. En effet, si la distance de transmission de l'objet « Smart » est grande, ce dernier devra élever sa puissance d'émission et par conséquent consommera plus d'énergie, et réduira sa propre durée de vie. Il convient donc de trouver des méthodes à même de surpasser ces contraintes. Beaucoup d'auteurs se sont en effet penchés sur la question ; par exemple [10]-[12] ont montré que l'agrégation des données est plus efficace pour les réseaux statiques, là où le taux de transmission de données est constant. Quant aux réseaux dynamiques, leur regroupement dépendra de leur degré de mobilité. Dans un modèle de données « Evènement-Réponse », le concepteur du réseau d'IoT, ne s'intéresse qu'à l'occurrence de l'apparition d'une annonce ou d'un ensemble d'annonces insolites. Par contre, dans le modèle de données orientées « Requête-Réponse », les capteurs ne signalent leurs résultats mesurés au nœud collecteur, qu'à la suite d'une requête manifestée par l'observateur (directement ou indirectement par l'intermédiaire d'autres capteurs). Ces approches peuvent toutefois se trouver dans un même réseau (modèle hybride). Une continuité améliorée de cette approche est présentée dans [13] ; PEGASIS y propose que chaque nœud puisse communiquer uniquement avec son proche voisin et transmettre tour à tour à la station de base, réduisant ainsi la quantité d'énergie dépensée.

Dans les travaux centrés sur les données, nous avons aussi le travail de [14] nommé EAD, représenté par un arbre de diffusion spécial, avec plusieurs feuilles, dans le but de faciliter le routage. Ce travail est repris par [15] où l'accent est mis sur la mise à jour du nœud-puits en faisant d'abord une agrégation des données provenant des différents capteurs sources. Les auteurs mettent en application deux approches : « Directed Diffusion, (DD) » et « Sensor Protocol for Information via Négociation (SPIN) ». D'autres solutions de minimisation d'énergie sont proposées. On peut citer : EAR, MECN, HEED, EAQSR... etc. [16].

Dans tous les travaux centrés sur les « données », une attention particulière est donnée à l'étude de [8]. En effet, la réduction du nombre de transmissions de données, par requêtes et par intervalle de temps, en vue de collecter périodiquement les mises à jours des données d'une zone sous observation, est un moyen efficace de réduire le On/Off

des capteurs et par conséquent accroître la durée de vie du réseau IoT.

Les auteurs de [9] proposent une agrégation de données vers le nœud collecteur ; un traitement est fait à ce niveau. Ils recourent à « l'égalité absolue » ; aussi, si la valeur de l'état actuel ($Sv_{(t)}$) est « égale exactement » – au sens absolu – à la valeur de l'état précédent ($Sv_{(t-1)}$) –précédemment enregistrée et sauvegardée dans un tampon du collecteur– il n'y aura pas transfert de données à l'observateur. [8] reprennent ces travaux et soulignent la même idée avec un algorithme amélioré : un nœud à plusieurs capteurs ne transmet ces données que s'il y a une « différence relative » entre la valeur mesurée à l'instant (t) et la dernière valeur mesurée transmise à ($t-1$).

Nous savons tous que la valeur des données est relative, selon que l'on se trouve du côté du réseau ou de celui de l'observateur. Ce dernier s'intéresse beaucoup plus aux changements de l'environnement surveillé qu'aux valeurs des données elles-mêmes. Par exemple, si les capteurs surveillent une zone de forêt pour prévenir le déclenchement du feu, l'observateur n'a pas besoin de voir les données numériques de tous les capteurs individuels, mais doit savoir s'il y a eu une augmentation notable de température indiquant le démarrage d'un incendie dans la zone surveillée. C'est cette question primordiale qui va déclencher des prises de décisions efficaces.

IV. PRISE DE DECISION DANS UN NŒUD A PLUSIEURS CAPTEURS

La *différence réelle* entre deux grandeurs numériques, v_t et v_{t-1} , est présentée par la formule : $\Delta = v_t - v_{t-1}$. Cette dernière est dite *changement réel* lorsque la valeur v_{t-1} est une valeur de départ ou de référence à laquelle v_t est comparée. Par contre, si v_{t-1} n'est pas une valeur de référence comme décrite dans [8], la valeur de Δ serait alors nommée « différence absolue », soit : $|\Delta| = |v_t - v_{t-1}|$, où l'ordre de v_t , v_{t-1} n'a pas d'importance. Cependant, une autre observation suscite notre attention : à savoir que la différence absolue entre deux valeurs n'est pas toujours le bon moyen de comparer les nombres. Illustrons cela par l'exemple suivant : un capteur relève à l'instant (t) une valeur discrète, mesurée (v_t) alors qu'à l'instant ($t-1$) il a déjà relevé la valeur v_{t-1} . Nous avons le tableau ci-après :

TABLEAU I
 ILLUSTRATION DE LA DIFFERENCE ABSOLUE

value \ Sensor	Sensor 1 t	Sensor 1 $t=t+1$	Sensor 1 $t=t+2$
v_t	35°C	50°C	65°C
v_{t-1}	20°C	35°C	50°C
$|\Delta| = |v_t - v_{t-1}|$	15°C	15°C	15°C

Remarque:

Si un capteur entre dans le domaine de non-destruction, le retour à l'état de stabilité est impossible ; seul un nouveau calibrage manuel permettra de le remettre en état d'emploi.

Dans notre exemple du tableau 1, nous prenons en considération une certaine durée de remise en état initial du capteur, inférieur à la durée nécessaire à la stabilité du capteur, c-à-d un temps de passage du domaine de non détérioration au domaine nominal d'emploi.

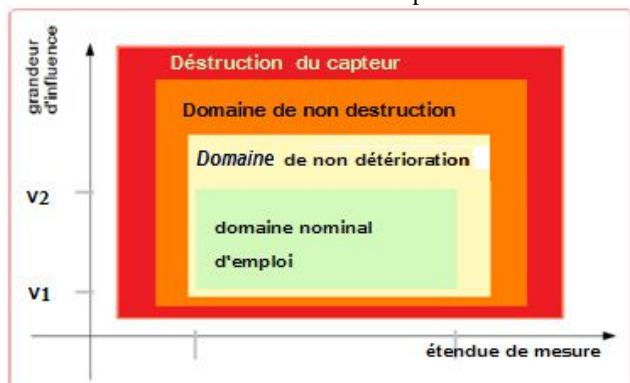


Fig. 1 Limites d'utilisation d'un capteur et étendue de mesure [17]

La différence absolue est égale à 15°C à l'état (t), (t+1) et à (t+2), cette différence n'étant pas significative. La question qui se pose serait : pourrions-nous dire, dans ce cas, qu'il y a un changement d'état ? Quand bien même cette différence serait-elle prise par rapport à un seuil donné ($\beta \leq 20^\circ\text{C}$) pour déclencher une transmission, la réalité des choses n'est pas établie. Kim et al. [9] mettent en valeur leur théorie en se basant sur l'équation (1).

$$F_s = \begin{cases} 1 & \text{Si } A_c = |Sv_t - Sv_{t-1}| > \beta \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

Alduais et al. [8] reprennent le travail de [9], en remettant toutefois en question la différence absolue qui ne reflète pas, d'une manière générale, un changement d'état réel. Les auteurs de [8] s'appuient quant à eux sur la différence relative (Equation 2) et le changement relatif (Equation 3) pris par rapport à un coefficient de tolérance β (=seuil) comme différence maximale admise fixée par le concepteur. Aussi, énoncent-ils les équations (2) et (3) suivantes liées à la décision de mettre à jour le nœud collecteur ou la station de base :

$$F_s = \begin{cases} 1 & \text{Si } R_f = \frac{|Sv_t - Sv_{t-1}|}{Sv_{t-1}} > \beta \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$F_s = \begin{cases} 1 & \text{Si } R_f = \frac{|Sv_t - Sv_{t-1}|}{\frac{Sv_t + Sv_{t-1}}{2}} > \beta \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

La collecte des données à la demande - et en temps réel - est très importante dans un réseau IoT. L'approche [8] est souvent utilisée lorsque les deux nombres reflètent un changement dans une entité sous-jacente unique. Cette approche peut néanmoins susciter deux problèmes :

- 1 Si dans l'équation (2) du changement relatif, $(Sv_{t-1}) = 0$ la fonction de sortie F_s ne sera pas définie. Il faut souligner que cette grandeur discrète (Sv_{t-1}) peut être nulle du fait qu'elle n'est pas la valeur de référence fixée par l'observateur, et qu'elle varie aléatoirement dans le temps.

Doit-on comprendre alors que le capteur est en état Off ou bien qu'il n'a rien décelé ?

- 2 Si (Sv_{t-1}) et (Sv_t) sont de même valeur mais de signes opposés, le dénominateur (D_{Rf}) de l'équation (3) vaut zéro [19],

$$\text{Si } Sv_t = -Sv_{t-1} \text{ alors } D_{Rf} = \frac{Sv_t + Sv_{t-1}}{2} = 0 \quad (4)$$

Doit-on comprendre, là encore, que le capteur est en état Off ou qu'il n'a détecté aucun changement d'état. Cela peut ne pas affecter le réseau IoT, à un certain degré de liberté ; mais si c'est le cas - par exemple en relevant à l'instant $(t-1)$ une température $Sv_{t-1} = +5^\circ\text{C}$ et à l'instant (t) une température $Sv_t = -5^\circ\text{C}$ (cf. les valeurs de fonctionnement d'un nœud Waspote, Figure 2) [18] - nous serons face à une incertitude de résultat.

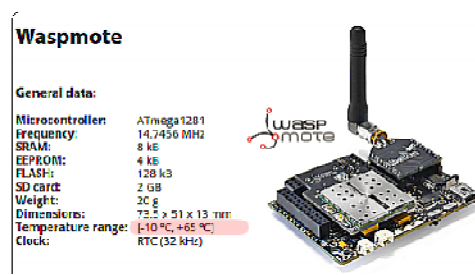


Fig. 2 Données générales de fonctionnement d'un nœud Waspote [18]

La solution présentée par l'auteur [19] à la question de la « différence relative » consisterait à remplacer le dénominateur de l'équation (3) par la moyenne des valeurs absolues de (Sv_t) et (Sv_{t-1}) :

$$F_s = \begin{cases} 1 & \text{Si } R_f = \frac{|Sv_t - Sv_{t-1}|}{\frac{Sv_t + Sv_{t-1}}{2}} > \beta \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

V. APPROCHE PROPOSEE

Dans un réseau IoT, le déploiement de capteurs a pour but de surveiller une zone quasi- autonome, chaque capteur étant concerné par une sous-zone. Un mote spécial est chargée de rassembler les informations en provenance des capteurs et et d'en informer l'observateur humain si un phénomène inhabituel survient. Ainsi, minimiser la consommation d'énergie reviendrait à minimiser, entre autres actions, la quantité de données transmises dans le réseau. En effet, selon les études menées dans ce contexte, l'énergie consommée dans un nœud capteur serait due aux transmissions de données. De ce fait, notre approche consiste à agréger les données des différents capteurs en une information significative appelée « intervalle de confiance », en éliminant

la redondance par le recours à une nouvelle méthode basée sur la notion de tolérance (d'appartenance à des intervalles de confiance). Ceci résoudra nécessairement le problème d'excès de transmission de valeurs collectées, et par conséquent augmentera la durée de vie des capteurs.

Les modèles de Markov Cachés (Hidden Markov Models ou HMM) modélisent des phénomènes aléatoires composés d'un processus aléatoire de transition entre des états inobservables dans un premier niveau (les états cachés) et, à un second niveau, d'un autre processus aléatoire qui, dans chaque état, engendre des valeurs observables (appelées observations).

Notre idée repose sur le principe du niveau d'observation des HMM.

Nous construisons une discrétisation des données de transitions d'un ensemble de jour, nous relevons une classification par intervalle des données, et nous l'appliquons sur l'ensemble des données des jours à venir. De ce fait les valeurs seront vérifiées par rapport à un intervalle de données préétabli, dans les conditions normales. Si une valeur n'est pas classée dans ces intervalles de confiance, elle l'est donc dans une classe spéciale appelée « OutOff range ». L'application de la méthode « Exacly Same » sera appliquée pour comparer les appartenances aux classes. Ainsi, toutes les valeurs normales recueillies seront dans une classe spécifiée et connues à l'avance, et les valeurs d'alertes seront quant à elles représentées par la classe « 0000 ».

A noter que l'ensemble des tests est effectué sur la base de données des informations collectées par 54 capteurs déployés dans le laboratoire Intel Berkeley Research entre le 28 février et le 5 avril 2004. [20]

N°	Date	Heure	epoch	MoteID	Temp	Humidity	Lumière	Tension
1	28/02/2004	00:59:16.028	3	1	19.9884	37.0933	45.0800	2.6996
2	28/02/2004	01:03:16.334	11	1	19.3024	38.4629	45.0800	2.6874
3	28/02/2004	01:06:16.013	17	1	19.1652	38.8039	45.0800	2.6874
4	28/02/2004	01:06:46.778	18	1	19.1750	38.8379	45.0800	2.6996
5	28/02/2004	01:08:45.993	22	1	19.1456	38.9401	45.0800	2.6874
6	28/02/2004	01:09:22.324	23	1	19.1652	38.8720	45.0800	2.6874
7	28/02/2004	01:09:46.110	24	1	19.1652	38.8039	45.0800	2.6874
8	28/02/2004	01:10:16.679	25	1	19.1456	38.8379	45.0800	2.6996
9	28/02/2004	01:10:46.251	26	1	19.1456	38.8720	45.0800	2.6874
10	28/02/2004	01:11:46.941	28	1	19.1456	38.9401	45.0800	2.6996
11	28/02/2004	01:12:46.251	30	1	19.1358	38.9061	45.0800	2.6874
12	28/02/2004	01:14:16.631	33	1	19.1162	38.8039	45.0800	2.6996
13	28/02/2004	01:14:46.569	34	1	19.1162	38.8720	45.0800	2.6996
14	28/02/2004	01:15:16.650	35	1	19.1064	39.0082	45.0800	2.6996
15	28/02/2004	01:16:16.344	37	1	19.1064	38.8720	43.2400	2.6996
16	28/02/2004	01:16:46.409	38	1	19.0966	38.8039	43.2400	2.6996
17	28/02/2004	01:17:16.409	40	1	19.0966	38.7357	43.2400	2.6996
18	28/02/2004	01:17:46.409	41	1	19.0868	38.8039	43.2400	2.6996
19	28/02/2004	01:18:16.409	42	1	19.0672	38.9061	43.2400	2.6874
20	28/02/2004	01:18:46.409	43	1	19.0672	38.8720	43.2400	2.6996

Fig. 3 Aperçu de la structure du DataSet d'Intel (2004)

Hypothèse

Dans les conditions normales d'observation, les relevés de données issues des capteurs représentent les valeurs les plus fiables. Un intervalle de rangement de ces valeurs suffit ainsi à prendre connaissance de l'état de cet environnement. Par contre, au-delà de ces intervalles, les valeurs sont sujettes à conjecture.

Hypothèse 1 : Une discrétisation par intervalle de données agrégera les transitions en observation.

Hypothèse 2 : La décision de mise à jour est une fonction booléenne (F_s) basée sur un intervalle de confiance ; on utilisera la méthode « Exactly same » des travaux de [5], sur des intervalles et non sur des valeurs observables :

- (F_s) ne doit, en aucun cas, être indéterminée.
- Dans toutes les situations (F_s) doit fournir une solution $\in \{0,1\}$.

L'objectif de la station de base est de s'informer des valeurs relevées dans le réseau à intervalles réguliers afin de détecter un éventuel changement. Sur les données issues du dataSet d'Intel, l'intervalle des relevés est de trente et une seconde (31s), le relevé d'une journée effectuée par l'équipe du laboratoire variant entre 1316 et 2800 valeurs.

Une perspective de transmettre ce nombre, pendant une année, consisterait donc à envoyer un nombre de valeurs d'environ $\cong (3600/30) \times 24 \times 365 = 10\ 512\ 000$ valeurs. Ce nombre est calculé pour un seul paramètre : la température ; toutefois, si nous prenons en considération l'humidité, la lumière et la pression, la taille du paquet augmentera forcément, ce qui influera obligatoirement sur la durée de transmission.

Il en résulte que notre approche est de réduire la transmission des données en utilisant la méthode de discrétisation issue des statistiques descriptives, ce qui permettra de réunir des données captées sur des ensembles.



Fig. 4 Schéma résumant les statistiques descriptives

Définition 1 :

Une série statistique se définit par une population et un caractère :

1. La population est l'ensemble des individus (ici : les capteurs)
2. Le caractère est la qualité étudiée chez ces individus. (Ici : température, humidité, lumière, tension, etc.). De plus, un caractère peut-être :
 - a) Qualitatif, (valeurs non numériques : couleur, forme, etc.).
 - b) Quantitatif : à savoir
 - Discret (nombre fini de valeurs naturelles)
 - Continu (infinité de valeurs) : notre cas d'études.

La discrétisation met en évidence la question du nombre de classes (k) à créer. D'après la définition de [22], « son objectif est de perdre le moins d'information possible tout en retranscrivant au mieux l'organisation statistique des données ».

Nos données constituent de la sorte un caractère quantitatif continu. Ainsi, l'établissement du tableau de fréquences implique d'abord une répartition en classes de ces données. Cela nécessite de définir, en premier, le nombre de classes puis l'amplitude de chacune d'elles. En règle générale, le choix des classes doit être de même amplitude.

Il est à noter cependant qu'une distribution en fréquences est explicative si – et seulement si – chaque classe comprend un nombre suffisant de valeurs captées (v_{ti}). Plusieurs méthodes expérimentales permettent d'établir le nombre de classes pour un échantillon de taille (n).

Phase 1 : Classification

1^{ère} étape1 : Identifier le nombre de classes (k)

Définition 2 :

Le nombre de classes (k) et la formule qui y est associée dépendent du type de variables. Quel que soit le cas, deux règles s'imposent :

- Le nombre de classes est arrondi à l'entier le plus proche.
- Le nombre de classes doit s'inscrire dans l'intervalle [5,8].

Diverses formules empiriques existent afin de classer les données; ainsi pour les variables continues :

- Formule de Sturge : $k = \text{Log}_2(n)$
- Formule de Sturge-Huntsberger :
 $k = 1 + (10/3) \cdot \text{Log}_{10}(n)$
- Formule de Brooks-Carruthers : $k = 5 \cdot \text{Log}_{10}(n)$
- Formule de Scott:
 $k = (\text{valeur min} - \text{val max}) / 3,5 \cdot \sigma \cdot n^{(-1/5)}$
 (cas de distribution asymétrique)

Application

Notre choix s'est porté sur la formule de Sturge-Huntsberger¹[21], étant donné la distribution de l'échantillon élu :

$$k = 1 + (10/3) * \text{Log}_{10}(n) \quad (6)$$

Si nous prenons en exemple un échantillon de valeur n = 1000, le nombre de classe significatif serait :

$$k = 1 + 3.33 \cdot \text{Log}_{10}(1000) = 10.99 \approx 11 \text{ classes (en application de la définition 2).}$$

De cette formule, nous déduisons la méthode de classification en choisissant k = 5 classes pour un contrôle supervisé et une meilleure visibilité.

2^{ème} étape : Analyse descriptive de l'échantillon

Notre échantillon est pris dans la base de données du laboratoire d'Intel Berkley. Un intervalle de confiance est calculé sur la base de 5 Classes (k=5) en déterminant à titre d'exemple, le niveau de risque associé au danger.

Nous relevons les valeurs minimale et maximale admises parmi les valeurs d'une journée jugées acceptables, (valeurs prises dans des conditions normales d'observation) : exemple :

- Min (v_{t_i}) = 17,5090
- Max (v_{t_i}) = 26,6328

Calculons l'écart par la formule de Sturge :

$$E = \text{Max}(v_{t_i}) - \text{Min}(v_{t_i}) = 26,6328 - 17,1954 = 9.4374$$

$$\text{Calculons l'amplitude : } A = E/k = 9.4374 / 5 = 1.8874$$

Une analyse statistique descriptive des données de température de notre échantillon (v_{t_i}), nous révèle ainsi les données quantitatives suivantes :

TABLEAU 2

STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES INTERVALLES DE CONFIANCES – MOTE 1: SENSOR « TEMPERATURE »

Classes	Borne inf.	Borne Sup.	Effectif	Fréquence	Densité
1	[17.1954;	19.0829[	2575	0,291	0,154
2	[19.0829;	20.9704[	2106	0,238	0,126
3	[20.9704;	22.8579[	1687	0,191	0,101
4	[22.8579;	24.7454[	1618	0,183	0,097
5	[24.7454;	26.6328[	857	0,097	0,051

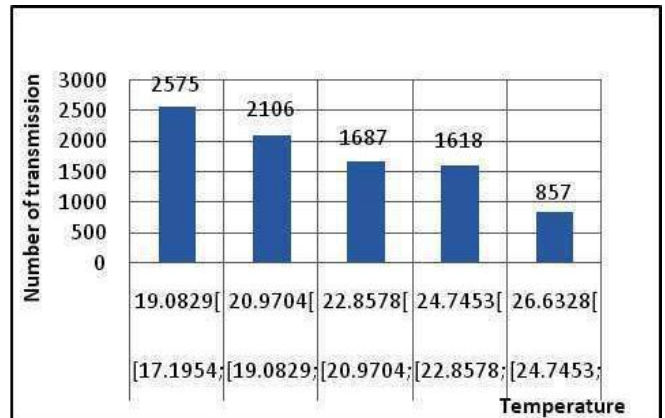


Fig. 5 Nombre de transmissions par « Intervalle de Confiance – C.I.» (Mote1 - Sensor1 : Température)

3^{ème} étape :

De cette étape, les valeurs de température sont établies par intervalles de confiance (classes); exemple : Classe1 = [17,1954 ; 19,0829[, Classe1 = [19,0829; 20,9704[, etc. Sachant que l'on a recensé 5 classes, on met en marche les capteurs, et chaque température relevée (niveau caché) sera attribuée à la classe correspondante (niveau observable). De ce fait, si la valeur d'une température captée est cadrée dans une classe, le numéro de classe est transmis à la station de base pour une mise à jour. Si, par contre, la température relevée n'appartient à aucun intervalle de confiance, un niveau de classe « OutOff » (Out of range) sera transmis pour une mise à jour, soulignant ainsi un état d'alerte. De cette façon, la station de base pourra observer le mote et prévenir le niveau de danger, avant d'arriver au seuil de détérioration.

Remarque

Le nombre de classes (k) peut être augmenté, ce qui élargira l'étendue des valeurs captées.

Phase 2 : Transmission et mise à jour des données

Etape1. Structure du paquet transmis

Les données sont la partie la plus importante dans la transmission d'un capteur et le nœud capteur waspmote peut supporter jusqu'à 16 différents capteurs en même temps (voir caractéristiques). Pour ce type de mote, nous pourrions réserver 16 champs de données. Aussi, étant donné l'entête du paquet, si nous avons (n) capteurs nous aurons (n) champs de données en plus (Fig. 5).

¹ La règle de Sturges : formule mathématique proposée par Herbert Sturges (1882-1958).

Notre paquet de données sera donc le même que le paquet décrit par le groupe du laboratoire Intel [20], mais en substituant un champ « N° classe » de chaque type de caractère du mote au champ des valeurs des capteurs. Le paquet se représentera comme suit :

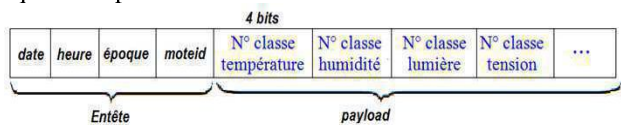


Fig. 6 Structure d'un paquet du Laboratoire Intel modifiée [20]

On peut en déduire que pour un mote de 4 capteurs, nous avons besoin de $4\text{bits} \times 4 = 16\text{ bits}$.

– Le champ « époque » est la période de capture de ces grandeurs, c'est un numéro de séquence croissant de façon monotone à partir de chaque mote.

– Le champ « Moteid » : Un nombre séquentiel de capteurs.

– Le champ N° classe contient (m) bits et dépend du nombre de classe k ;

Ici, $k = 5 = 2m$, ceci donne $m = 3\text{ bits}$ pour codifier 8 classes;

TABLEAU 3

REPRESENTATION BINAIRE DU CONTENU DES CHAMPS

Nbr. Classes	N° classe température	Min (v_{t_i})	Max (v_{t_i})
0	0000	"OutOff"	
1	0001	[17.1954;	19.0829 [
2	0010	[19.0829;	20.9704 [
3	0011	[20.9704;	22.8579 [
4	0100	[22.8579;	24.7454 [
5	0101	[24.7454;	26.6328 [
7	0110	Réservés pour d'autres classes	
8	0111		

Connaissant l'amplitude de la température ($A = 1.8874$) dans le tableau ci-dessus, il est possible de rajouter d'autres classes (voir tableau 5) ; on pourra alors choisir le nombre de bits y correspondant ; par exemple pour $m = 4$ on peut avoir plus de 8 classes : $2^4 = 16\text{ classes}$.

TABLEAU 4

EXTENSION DES CLASSES EN UTILISANT L'AMPLITUDE $A = 1.8874$

N° classe température	Min (v_{t_i})	Max (v_{t_i})
0110	[26.6328;	28.5202 [
0111	[28.5202;	30.4076 [
1000	[30.4076;	32.2950 [
1001	[32.2950;	34.1824 [
1010	[34.1824;	36.0698 [
1011	[36.0698;	37.9572 [
1100	[37.9572;	39.8446 [
1101	[39.8446;	41.7320 [
1110	[41.7320;	43.6194 [
1111	[43.6194;	45.5068 [

NB. Il reste que les classes ajoutées sont prises dans les conditions d'acceptabilité des valeurs captées.

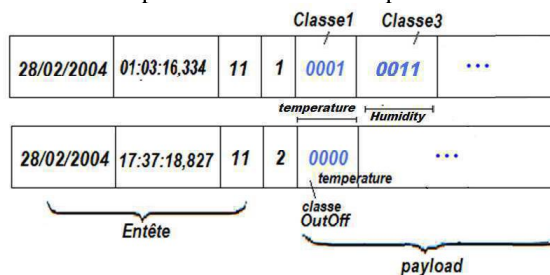


Fig. 7 Exemple de paquets avec le caractère température

Remarque :

Dans notre cas d'étude, le choix des intervalles de confiance (au lieu des valeurs) contribue pleinement à réduire la taille du paquet : pour 4 capteurs par mote, nous aurons 16 bits de données. Ceci entrainera nécessairement une diminution des délais de transmission et de propagation dudit paquet, et par conséquent l'énergie consommée pour une transmission.

Etape 2. Algorithme de mise à jour

– Algorithme mono-sensor

```

Inputs: classes(k), Sv(t-1), Sv(t), A //k = 1..5; A : amplitude = 1,8874;
Outputs: Fs; // Fs: Binary function to send data or Not send
Begin
  Set Fs ← 0
  Set Ts ← OFF
  Set Classe(t-1) ← the last classed Sensor (Sj) value // Classe(t-1) : Class sensor at time "t-1"
  Read Sv(t) // Sv(t) a sensor value at time t.
  // j: a counter of (k) classes
  For j = 1 to k-5
    If Sv(t) in classe(j) then
      If classe(t-1) = classe (j) then // "Exactly-Same" comparison class method,
        Set Fs ← 0 // already in class
      Else
        Set Fs ← 1
      End if
    Else
      Set Classe(t-1) ← "0000" // "OutOff" range class - ALARM -
      Set Fs ← 1
    End if
  End For
  // sending data
  IF Fs = 1 then
    RF-Transmit ← ON // sending a new class of data
  Else
    RF-Transmit ← OFF
  End if
End
    
```

Etape 3. Réalisation de l'interface

Nous avons mis en place un programme nommé « Sensing » illustrant les quatre algorithmes décrits précédemment, à savoir « Exactly same - ES », « Absolute Difference - AD », « Relative Difference - RD » et naturellement notre algorithme « Confidence Interval - CI ».

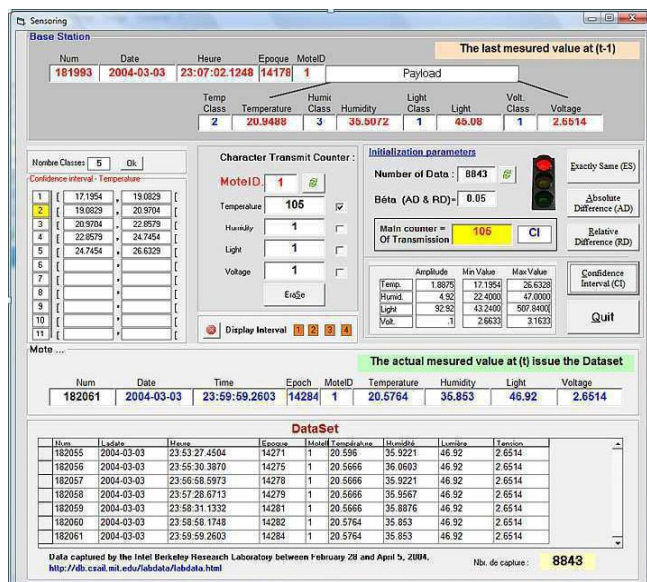


Fig. 8 Interface du programme « Sensing »

VI. EVALUATION DES PERFORMANCES

L'évaluation de l'algorithme est effectuée sur un échantillon de données d'Intel Berkeley Research Lab (IBRL) [20]. L'expérience est prise au hasard sur plusieurs motes. Ainsi on en a retenu 6 (sur 54) : soit les motes 1, 4, 7, 9, 18, 20 pour la présentation, mais les tests ont été effectués sur l'ensemble et les résultats ont été très satisfaisants.

Notons que tous les motes comportent quatre (04) capteurs, et que les tests ont été pris en considérant toutes les combinaisons possibles des capteurs.

Les scénarios de tests sont représentés dans le tableau ci-dessous ; on choisira les dénominations suivantes :

Temp. (T): Température; Humid. (H): Humidité; Light (L): ; Lumière;
 Volt. (V) : Voltage

TABLEAU 5

RESULTATS OBTENUS APRES L'EXECUTION DU PROGRAMME « SENSING »
 POUR LES MOTES 1, 4, 7, 9, 18, 20

MoteID	1
DataSet	8843 paquets

(a)

Parameters	Algorithm	ES	AD	RD	CI
Temp. (T)		6679	1706	62	105
Humid. (H)		6596	4498	54	91
Light. (L)		1592	1592	777	163
Volt. (V)		2916	12	1	1
Temp.+ Humid.		8147	4718	80	193
Temp.+ Light.		6894	2678	802	261
Temp.+ Volt.		7363	1706	62	105
Humid.+ Light		6922	5095	794	249
Humid.+ Volt.		7365	4498	54	249
Light. + Volt.		4000	1592	777	163
Temp. + Humid. + Light		8207	5249	802	345
Temp.+Light+Volt		7512	2678	802	261
Humid. + Light + Volt		7575	5095	794	249
Temp.+Humid.+Light+Volt		8411	5249	802	345

MoteID	4	(b)
DataSet	8754 paquets	

Parameters	Algorithm	ES	AD	RD	CI
Temp. (T)		6109	1291	51	67
Humid. (H)		6380	4275	51	96
Light. (L)		1043	1043	587	113
Volt. (V)		3053	9	9	2
Temp.+ Humid.		7893	4411	69	153
Temp.+ Light.		6316	1954	597	175
Temp.+ Volt.		7021	1291	51	68
Humid.+ Light		6595	4713	602	204
Humid.+ Volt.		7235	4275	51	204
Light. + Volt.		3692	1044	587	114
Temp. + Humid. + Light		7952	4821	602	259
Temp.+Light+Volt		7149	1954	597	176
Humid. + Light + Volt		7364	4713	602	205
Temp.+Humid.+Light+Volt		8234	4821	602	260

MoteID	7	(c)
DataSet	11969 paquets	

Parameters	Algorithm	ES	AD	RD	CI
Temp. (T)		8128	1334	48	77
Humid. (H)		8180	5246	47	80
Light. (L)		1414	1414	754	109
Volt. (V)		4390	7	7	1
Temp.+ Humid.		10676	5423	64	153
Temp.+ Light.		6894	2678	802	184
Temp.+ Volt.		7363	1706	62	77
Humid.+ Light		6922	5095	794	187
Humid.+ Volt.		7365	4498	54	187
Light. + Volt.		4000	1592	777	109
Temp. + Humid. + Light		8207	6083	770	259
Temp.+Light+Volt		9814	2332	763	184
Humid. + Light + Volt		9792	5969	765	187
Temp.+Humid.+Light+Volt		11238	6083	770	259

MoteID	9	(d)
DataSet	9113 paquets	

Parameters	Algorithm	ES	AD	RD	CI
Temp. (T)		6659	1371	59	78
Humid. (H)		6334	4298	57	118
Light. (L)		1343	1343	848	57
Volt. (V)		2378	10	1	260
Temp.+ Humid.		8264	4482	77	193
Temp.+ Light.		6906	2276	872	134
Temp.+ Volt.		7291	1371	59	334
Humid.+ Light		6690	4925	872	171
Humid.+ Volt.		7076	4298	57	171
Light. + Volt.		3362	1345	848	316
Temp. + Humid. + Light		8342	5042	884	246
Temp.+Light+Volt		7470	2276	872	390
Humid.+Light+Volt		7336	4925	872	429
Temp.+Humid.+Light+Volt		8529	5042	884	502

MoteID	18
DataSet	8923 paquets

(e)

Parameters	Algorithm	ES	AD	RD	CI
Temp. (T)		6082	1007	54	47
Humid. (H)		5734	3361	41	63
Light. (L)		1668	1600	914	161
Volt. (V)		2371	12	3	2
Temp.+ Humid.		7786	3493	63	108
Temp.+ Light.		6582	2239	939	205
Temp.+ Volt.		6821	1009	55	48
Humid.+ Light		6272	4262	936	221
Humid.+ Volt.		6583	3361	42	221
Light. + Volt.		3604	1603	914	162
Temp. + Humid. + Light		7986	4359	942	264
Temp.+Light+Volt		8093	3493	64	264
Humid.+Light+Volt		6999	4262	936	222
Temp.+Humid.+Light+Volt		8250	4359	942	265

MoteID	20
DataSet	9582 paquets

(f)

Parameters	Algorithm	ES	AD	RD	CI
Temp. (T)		6831	1393	64	84
Humid. (H)		6510	4171	73	137
Light. (L)		1823	1823	1266	111
Volt. (V)		2125	17	10	12
Temp.+ Humid.		8467	4297	84	217
Temp.+ Light.		7256	2735	1290	194
Temp.+ Volt.		7415	1393	70	93
Humid.+ Light		6957	4953	1288	246
Humid.+ Volt.		7191	4171	75	246
Light. + Volt.		3561	1825	1255	122
Temp. + Humid. + Light		8603	5053	1295	326
Temp.+Light+Volt		7749	2735	1290	203
Humid.+Light+Volt		7543	4953	1288	255
Temp.+Humid.+Light+Volt		8820	5053	1295	335

Nous représenterons ci-après les graphiques du tableau 5, afin d'avoir une comparaison claire des résultats obtenus dans les 6 motes avec les différents algorithmes comprenant toutes les combinaisons possibles entre les capteurs d'un mote.

		MoteID = 1			
		8843			
Sensor on Mote:	Algorithm	ES	AD	RD	CI
1- Temperature	Temp. (T)	6679	1706	62	105
	Humid. (H)	6596	4498	54	91

Total number of data captured (Without any algorithm)
 Type of algorithm applied
 Number of data transmitted with the "ES" algorithm
 Number of data transmitted by applying the "CI" algorithm

Fig. 9 Détail sur la lecture des tables

Remarque importante :

Lorsque l'un des capteurs du mote a des relevés assez élevés (exemple : le capteur de lumière), l'écart des algorithmes de la Différence Relative « RD » et ceux de la

Différence Absolue « AD » n'est pas important. Ceci est d'autant plus vrai lorsque l'on sait qu'une valeur de 1 lux correspond au clair de lune, 400 lux à un bureau lumineux et 100 000 lux au plein soleil [20]. (Voir les histogrammes ci-dessous)

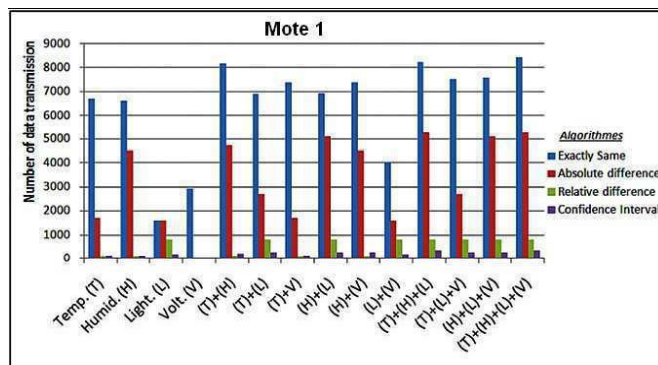


Fig. 10 Comparaison des résultats du Mote 1 avec les 4 capteurs.

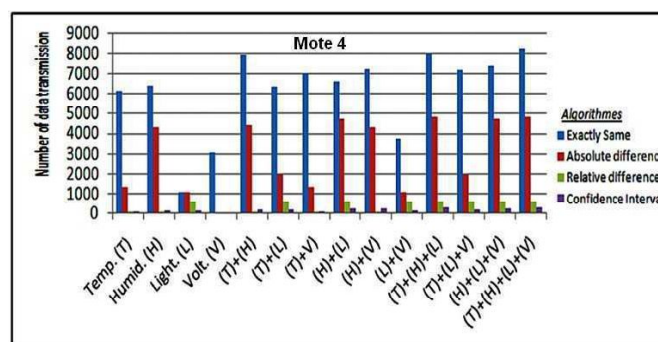


Fig. 11 Comparaison des résultats du Mote 4 avec les 4 capteurs

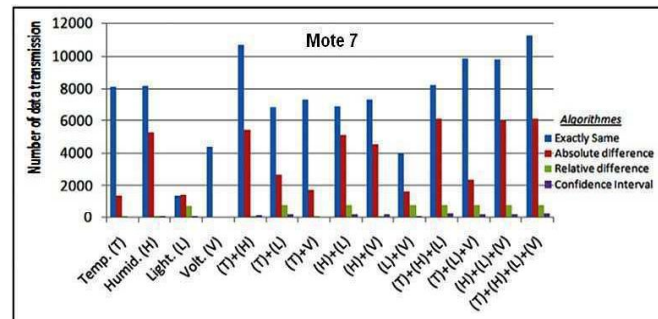


Fig. 12 Comparaison des résultats du Mote 7 avec les 4 capteurs

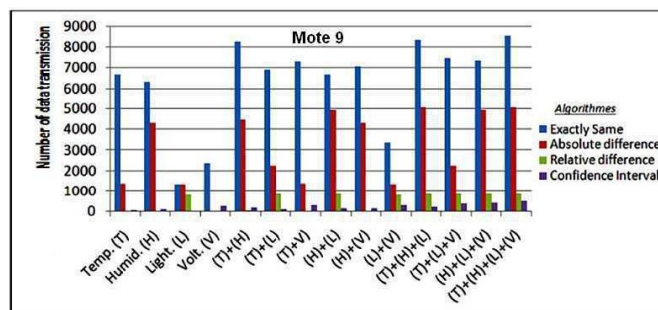


Fig. 13 Comparaison des résultats du Mote 9 avec les 4 capteurs

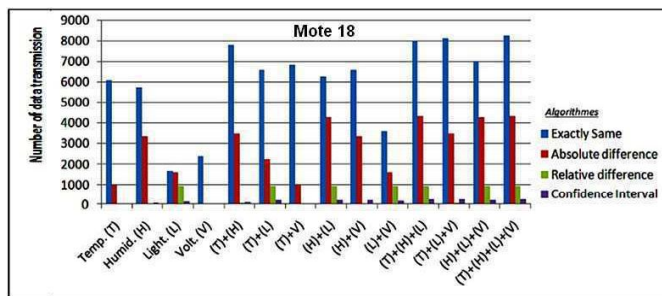


Fig. 14 Comparaison des résultats du Mote 18 avec les 4 capteurs

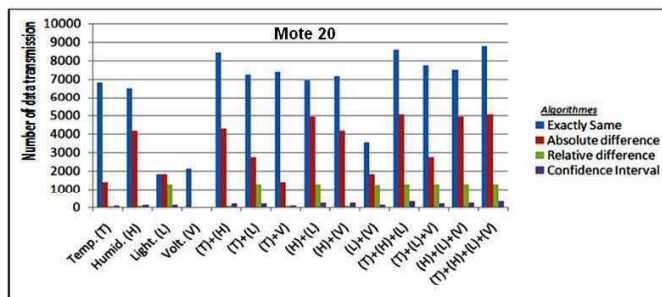


Fig. 15 Comparaison des résultats du Mote 20 avec les 4 capteurs

Le tableau ci-dessous engendre les valeurs issues du tableau 6 avec des motes comprenant les 4 capteurs réunis, déployés sur une architecture basée sur l’IoT, illustrant ainsi la consommation d’énergie pendant une durée de deux mois. Ces valeurs calculées se présentent à titre d’exemple :

Mote 1 (avec l’algorithme « ES ») : nous enregistrons 8411 transmissions, soit :

$$E = 8411 \times 59.2 \times 2 = 9,958624 \times 10^5$$

TABLEAU 6

CONSOMMATION D'ENERGIE PAR MOTE

Algo. / Motes	ES	AD	RD	CI
Mote 1	9,958624	3,107408	0,474784	0,204
Mote 4	4,874528	2,854032	0,356384	0,154
Mote 7	6,652896	3,601136	0,45584	0,153
Mote 9	10,098336	5,969728	1,046656	0,594
Mote 18	9,768	5,161056	1,115328	0,314
Mote 20	10,44288	5,982752	1,53328	0,397

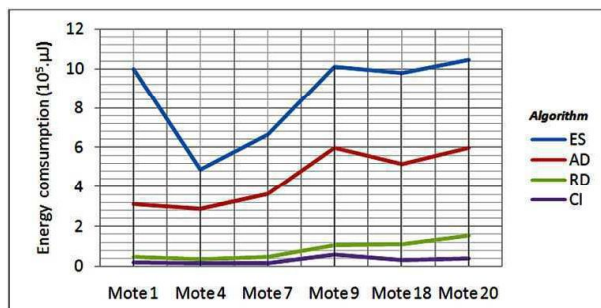


Fig. 16 Energie consommée sur chaque mote avec application des 4 algorithmes

L’algorithme « Sensoring », basé sur les intervalles de confiances, affiche une grande performance dans les résultats et par conséquent une économie d’énergie beaucoup plus importante. Pour ce faire, laissons la valeur de la taille de l’entête inchangée et reprenons la valeur du coût d’envoi d’un octet à 59,2 μJ (comme défini dans [8], calculé pour le mote MICA2Dot) ; ainsi la taille des données obtenues (payload) vaudra : 2 octets = 2 x 8 = 16 bits pour les 4 capteurs d’un mote (voir Fig.5), face aux 64bits de [8]. Cette taille influera largement et positivement sur la durée d’émission du paquet pour une mise à jour.

L’analyse des résultats confirme donc l’hypothèse que nous avons proposée, à savoir que le programme « Intervalle de confiance » consomme moins d’énergie, comparé aux autres algorithmes. Cette performance peut être exploitée pour prolonger au maximum la durée de vie d’un réseau basé sur l’IoT.

VII. CONCLUSION & PERSPECTIVE

La collecte d’informations étant une opération capitale dans un réseau IoT, la durée de vie de ce dernier dépend essentiellement de l’énergie de ses capteurs. Toutes les recherches y afférant montrent que la consommation de cette énergie est tributaire, en premier lieu, de la transmission des données et, en second lieu, du traitement de ces données.

Dans la présente étude, notre but a été de cerner la question d’émission des données vers la station de base pour une éventuelle mise à jour. Plusieurs approches ont été élaborées dans ce sens parmi lesquelles la perspective de l’« Intervalle de confiance », inspirée du modèle de Markov cachée, nous a semblé la plus efficace. Celle-ci repose sur la théorie des niveaux « observables » : les intervalles de confiances, appelés également classes et les niveaux « cachés » qui sont les valeurs effectives captées.

La méthode utilisée met alors en évidence un certain nombre d’intervalles (ou classes) prédéfinies par la station de base. Ces intervalles sont une discrétisation des données dans les conditions d’acceptabilité des valeurs captées, l’amplitude étant la même dans l’ensemble des dites classes. Le nombre de classes ainsi fixé, l’alerte est donnée au-delà de ce seuil (comme défini à la section 5).

Dans notre approche, nous avons intervenu sur trois (03) niveaux :

- Niveau 1 : Diversité des capteurs sur un seul mote,
- Niveau 2 : Taille du paquet.
- Niveau 3 : Emission,

La taille du paquet est réduite du fait qu’elle contient seulement le numéro de l’intervalle de confiance, exemple trois (03) bits suffisent pour coder 8 classes.

L’application, ainsi réalisée, a confirmé notre hypothèse et le nombre de transmissions de données est réduit au maximum. Une perspective d’étude serait de voir quelles valeurs seraient transmises au-delà des intervalles de confiance, en déployant une méthode hybride y associant l’algorithme « Relative difference » par exemple.

REFERENCES

- [1] K. Manikandan, P. Kanmani, and M. Munnira Sulthana, "Energy Efficient Algorithms for Wireless Sensor Network", International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 4, Issue 1, January 2015
- [2] Diery NGOM, "Optimisation de la durée de vie dans les réseaux de capteurs Sans fil sous contraintes de couverture et de connectivité", these, University of Upper Alsace, France, 2016.
- [3] M. Bourougaoui, HBA. Sethom and IS. Belkhodja, "Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives-A review", ISA Trans: 64, pp. 269–284. Sep. 2016.
- [4] K. Amandeep and K. Kamaljit, "A Review of Different Energy Efficiency Techniques in Wireless Sensor Networks"; International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering; ISSN: 2277 128X, Vol. 5, Issue 6, June 2015.
- [5] A. Ghaddar, T. Razafindralambo, I. Simplot-Ryl, D. Simplot-Ryl, S. Tawbi and A. Hijazi, "Investigating Data Similarity and Estimation Through Spatio-Temporal Correlation to Enhance Energy Efficiency in WSNs". Ad Hoc & Sensor Wireless Networks, PKP Publishing Services Network, vol. 16, Issue 4, pp. 273–295,
- [6] L. Jiang, A. Liu, Y. Hu, and Z. Chen, "Lifetime maximization through dynamic ring-based routing scheme for correlated data collecting in WSNs," Computers & Electrical Engineering, vol. 41, pp. 191–215. Jan. 2015
- [7] He. Hua, Xu Zhen and Lei Yang, "Delay-aware data collecting protocol for low-duty-cycle wireless sensor networks", IET Networks, vol. 7, Issue: 1, pp. 44–49. Jan. 2018
- [8] N.A.M. Alduais, J. Abdullah, A. Jamil and L. Audah, "An efficient data collection and dissemination for IOT based WSN". In: IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), pp. 1–6. Oct. 2016
- [9] J.Y. Kim, C.H. Chu, and S.M. Shin, "ISSAQ: An Integrated Sensing Systems for Real-Time Indoor Air Quality Monitoring", IEEE Sensors Journal, vol. 14, Issue 12, pp. 4230-4243. Dec. 2014.
- [10] X. Tang and J. Xu, "Adaptive data collection strategies for lifetime-constrained wireless sensor networks". Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions, vol. 19, Issue 6, pp. 721–734. Juin 2008.
- [11] W. Heinzelman, "Application-specific protocol architectures for wireless networks," Ph.D. dissertation, Mass. Inst. Technol., Cambridge, 2000.
- [12] W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan and H. Balakrishnan, "Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks", In IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 1, Issue 4, pp. 660–670. Dec. 2002.
- [13] S. Lindsey and C. Raghavendra, "PEGASIS Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems,"IEEE Aerospace Conference Proceedings, vol. 3, pp. 1125–1130. March 2002.
- [14] A. Boukerche, X. Cheng and J. Linus: Energy-Aware Data-Centric Routing in Microsensor Networks. MSWIM '03, Proceedings of the 6th ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pp. 42–49. Sept. 2003.
- [15] May Mon Khaing, and Tun Min Naing, "Energy Aware Data-Centric Routing in Wireless Sensor Network", International Conference on Advances in Engineering and Technology (ICAET'2014), Singapore, pp. 110-114. March 2014.
- [16] A. BOUDRIES, "Maintien de la Connectivité dans les Réseaux Ad hoc sans fil", Thesis, (published). Ferhat Abbas Université, Sétif 1, Algeria, 2014.
- [17] (2017), Wikiversity website, "Capteur : Introduction ", [Online]. Available: <https://fr.wikiversity.org/wiki/Capteur/Introduction> last Update. 01/08/2017. Accessed : 27- Jan- 2018.
- [18] (2016), Libelium website. Waspnote, Data sheet | Libelium: Document Version: v7.1 - 10/2016, [Online]. Available: <http://www.libelium.com/development/waspnote/documentation/> Accessed: 27- 01- 2018.
- [19] (2018), The Wikipedia website. "Relative change and difference", [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Relative_change_and_difference Accessed: 27- 01- 2018.
- [20] (2014), Intel Lab Data website, Last modified: 06/2014, [Online]. Available: <http://db.csail.mit.edu/labdata/labdata.html>. Accessed: 2018- 02- 13
- [21] Prabhanjan N. Tattar, Suresh Ramaiah, BG Manjunath, "A Course in Statistics with R", Willey, Book, 2016.
- [22] (2017), The Magrit website. "Discretiser sur combien de classes ? ". [Online]. Available: <https://magrit.hypotheses.org/author/bmirou>. Accessed: 2018- 02- 13

Etude comparative entre les systèmes de couplage des cellules photovoltaïques multijonctions.

DIDA.T[#], Dennai.B^{#1}, Bekhada.A[#]

[#] *Département de Sciences et technologies Université de Béchar, Algérie*
¹*deennai_benmoussa@yahoo.com*

Abstract— Dans ce travail on étudie les systèmes de photopiles multi jonction mode mixte (tandem et dichroïque) nous considérons des associations avec des matériaux particuliers tels que $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$ pour un dispositif de cinq cellules couplées 1 par 2 par un miroir dichroïque. On a fait une étude comparative entre les deux systèmes (le système indépendant et système de couplage électrique) pour obtenir les meilleures performances (les photo-courants et les rendements des cellules).

Keywords— cellules PV, multi jonctions, dichroïque, tandem, performances.

I. INTRODUCTION

Parmi les pertes responsables du faible rendement des photopiles solaires, celles dues à l'excès d'énergie et à la non-absorption des photons sont les plus importantes. Le concept de l'utilisation simultanée de plusieurs photopiles de matériaux différents permet dans une certaine mesure, de limiter ces pertes et d'obtenir un meilleur rendement. Les cellules peuvent être couplées entre elles en les disposant les unes derrière les autres sur le trajet optique comme dans le système tandem [1] ou par l'intermédiaire de miroirs dichroïques qui envoient sur chacune d'elles, une partie bien définie du spectre solaire comme dans le système dichroïque [2]. Les différentes cellules sont donc placées sur le faisceau optique comme dans le système tandem, mais sont aussi, par définition même du dispositif, couplées électriquement.

Les travaux théoriques antérieurs ont surtout mis en évidence les augmentations possibles de rendement de systèmes de cellules indépendantes couplées en mode tandem ou en mode dichroïque. Cependant, il faut noter l'intérêt des groupements mixtes faisant intervenir des combinaisons des deux modes de couplage: tandem, dichroïque.

Dans ce travail, nous proposons une analyse de ce problème en considérant que le couplage optique entre les cellules est effectué non seulement par l'un ou l'autre des deux modes de couplage tandem ou dichroïque, mais encore par une ombinaison des modes dichroïque et tandem.

De plus, nous avons souvent considéré le cas où les cellules sont mises en série électrique par un simple fil conducteur qui relie entre elles les photopiles initialement indépendantes. Le but de cette étude est de mettre en évidence d'une part les différences qui existent entre les modes dichroïque et tandem couplés électriquement, d'autre part indépendantes.

Nous avons étudié des cinq et quatre cellules constitués de matériaux hypothétiques de largeurs de bande interdite respectives $E_{g1}, E_{g2}, E_{g3}, E_{g4}, E_{g5}$ avec toujours $E_{g1} > E_{g2}$; $E_{g2} > E_{g3}$; $E_{g3} > E_{g4}$; $E_{g4} > E_{g5}$; nous donnerons les valeurs optimales des E_{gk} et les maxima de rendement de nos systèmes.

Pour prélever les caractéristiques du composant photovoltaïque, et déterminer son comportement on doit étudier les paramètres suivants :

- le courant en court-circuit I_{CC} .
- la tension en circuit ouvert V_{CO} .
- le rendement photovoltaïque η .

II. LA STRUCTURE ÉTUDIÉE

Les cellules sont superposées par ordre décroissant des valeurs des hauteurs de bandes induites E_g , le dispositif ayant la plus grande valeur se trouve en tête et recevant tout les rayonnements [3]. Pour un spectre solaire donné, et un nombre fini de matériaux, il existe des valeurs imposées de E_g donnant un rendement maximum au système [4].

Par exemple le couplage optimum pour cinq cellules et avec un spectre AM1.5 serait obtenue pour des valeurs de E_g qui correspondent sensiblement $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$.

Pour cela, nous avons choisi $E_{g1}=2.4\text{eV}$, $E_{g2}=1.84\text{eV}$, $E_{g3}=1.43\text{eV}$, $E_{g4}=1.12\text{eV}$, $E_{g5}=0.74\text{eV}$, sous le spectre AM1.5.

A. Le système GaAs :

La structure de bande directe du GaAs, lui confère des propriétés électroniques intéressantes. La masse effective des électrons est très faible dans la vallée centrale Γ , et par conséquent, la mobilité électronique est élevée. La hauteur de bande interdite est élevée (1,424 eV à 300K). Pour comparaison, les valeurs correspondantes dans le silicium et dans le germanium sont de 1,12 eV et 0,6 eV respectivement. A faible champ, la mobilité des électrons est plus importante dans le GaAs que dans le Silicium, même à fort niveau de dopage. Conjuguée à l'effet de survitesse dans le GaAs, ceci va permettre de réduire le temps de transit dans la base ainsi que les résistances de contact.

B. Le système GaInP :

On peut obtenir le GaInP qui est un composé ternaire à partir des deux semiconducteurs binaires InP et le GaP, l'énergie de sa bande interdite est de 1,87 eV, Ce matériau est utilisé pour la fabrication de l'émetteur des cellules photovoltaïques. La masse effective des électrons est plus faible dans le GaInP, ce qui permet une plus forte mobilité électronique : 1,6 fois plus importante que dans le GaAs et 9 fois plus que dans le Silicium, d'où une résistance de base plus faible. La vitesse de recombinaison en surface est plus faible dans le GaInP que dans le GaAs ce qui permet d'augmenter le courant. Le GaInP présente une conductivité thermique de substrat plus grande que le GaAs.

Comme le montre la figure 1, la structure étudiée avec système de cinq les cellules associées peuvent être dépendantes ou électriquement indépendantes.

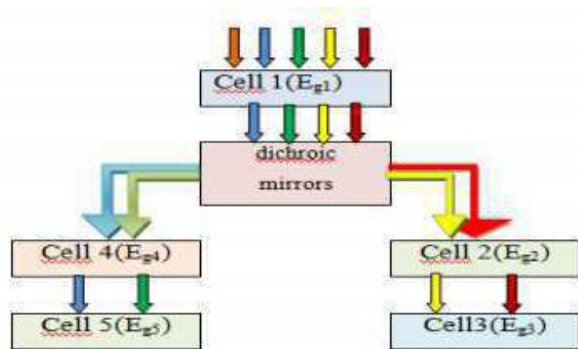


Fig. 1. Cinq cellules indépendantes avec un miroir dichroïque

III. MODÉLISATION DE LA CELLULE SOLAIRE

A. Calcul de rendement cellule solaire multi spectral :

Pour des raisons de commodité, en particulier du fait de son universalité, le spectre solaire qui sera utilisé dans les calculs est à la base de données AM1.5, avec la constante solaire 1000W/m². Les cellules sont conduites dans le cas de cellules solaires avec un diode. Fig. 2

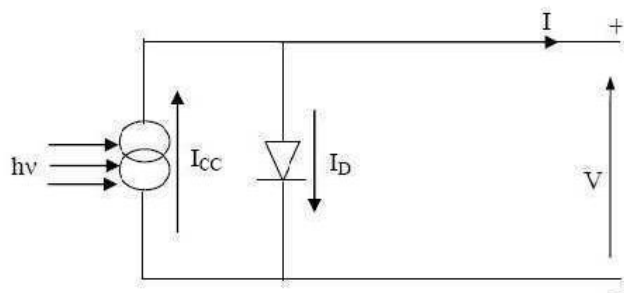


Fig. 2. Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale

Nous avons utilisé les mesures de [ASTM G173-03 Reference Spectra Derived from SMARTS v. 2.9.2 (AM1.5)] qui donnent la division du spectre solaire AM1.5 en 2000 intervalles sur une échelle d'énergie allant de 4.42 et 0.3 eV.

Ce grand nombre d'intervalles nous permet d'avoir une grande précision en couvrant tout les E_{gk}.

B. Le photo courant :

Dans le mode dichroïque le spectre solaire est découpé par des miroirs, (on suppose dans ce travail les miroirs parfaits) chaque miroir envoyant une partie du spectre solaire sur les cellules correspondantes.

En prenant d'une part le rendement quantique de l'absorption et d'autre part le rendement de collecte des porteurs minoritaires par la barrière de la jonction p-n, Tous deux égaux à 1.0. On obtient aisément une table de base [3] donnant le photo-courant calculé à partir du nombre de photons N_{ph} pour les énergies comprises entre hv et le gap E_g du semi-conducteur.

Pour la première cellule :

$$N_{ph1} = \int_{E_{g1}}^{hv} n_{ph}(hv) d(hv)$$

Pour la k-ième cellule

$$N_{phk} = \int_{hv-E_{gk}}^{hv-E_{gk}-1} n_{ph}(hv) d(hv)$$

Où n_{ph}(hv) est le flux de photons élémentaire à l'énergie hv du spectre solaire. On a évidemment :

$$\text{Pour la première cellule: } I_{ph1}(E_{g1}) = qN_{ph1}(hv)$$

$$\text{Pour la k-ième cellule: } I_{phk}(E_{gk}) = qN_{phk}(hv)$$

C. Caractéristique Courant –Tension (Mode tandem-dichroïque) :

1-Courant de court circuit I_{CC} :

$$I_{cck} = I_{phk} - I_{0k} \left(e^{\frac{q}{kt}(R_{sk} I_{cck})} - 1 \right) - \frac{R_{sk} I_{cck}}{R_{pk}}$$

$$I_{CCk} = \frac{I_{phk}}{1 + \frac{R_{sk}}{R_{pk}}}$$

2-Tension en circuit ouvert :

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation.

$$V_{COk} = \frac{kT}{q} \times \text{Log} \left\{ 1 + \frac{I_{phk}}{I_{0k}} \right\}$$

D. La puissance maximale délivrée à la charge :

$$P_{\max k} = I_{mpk} \cdot V_{mpk}$$

Avec:
$$V_{mpk} = V_{COk} - \frac{K.T}{q} \cdot \log\left(1 + \frac{q.V_{COk}}{K.T}\right)$$

Et
$$I_{mpk} = \frac{\left[I_{phk} - I_{0k} \left(e^{\frac{q.V_{mpk}}{K.T}} - 1 \right) - \frac{V_{mpk}}{R_{pk}} \right]}{1 + \frac{R_{Sk}}{R_{Pk}}}$$

E. Rendement :

Le rendement de cellule k est :

$$\eta_{mk} = \frac{P_{\max k}}{P_{in}} = \frac{I_{mk} \cdot V_{mk}}{\phi_k \cdot S_k}$$

Ou P_{in} est la puissance totale lumineuse incidente par unité de surface.

Pour le mode mixte (tandem-dichroïque) il y'a deux rendements calcule :

Si les cellules sera indépendantes on s'appelée (le système indépendant) donc le rendement de n cellules solaire dans le mode mixte (tandem-dichroïque) est égale :

$$\eta = \sum_{k=1}^n \eta_k$$

Lorsque les cellules sont liées entre elles par un fil conducteur, il faut alors noter qu'un même courant traverse toutes les cellules et que la tension électrique totale aux bornes de du dispositif sera simplement la somme des tensions aux bornes de chaque cellule.

Après avoir déterminé le point de fonctionnement I_{mk}, V_{mk} des cellules indépendantes, nous avons imposé un courant série I égal au plus petit des courants I_{mk} soit $I = \inf(I_{mk})$. on obtiendra une tension d'utilisation V_{mk} et une puissance utile $P_k = V_{mk} \cdot \inf(I_{mk})$

Le rendement global sera:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{P_{in}}$$

IV. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

A. Caractéristique I(V) et P(V) du premier système cinq cellule indépendant avec un miroir :

Dans ce système les cinq cellules associées optiquement sont électriquement indépendantes.

Sur la figure .3 est représentée la caractéristique I (V) pour le premier système .On remarque que le système donne un meilleure rendement.

Sur la figure .4 est représentée la caractéristique P (V) pour le premier système.

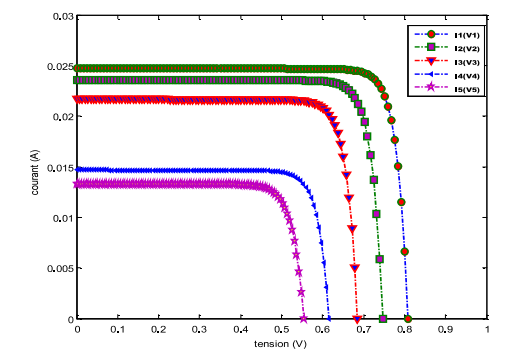


Figure 3. Caractéristique I(V) du premier système

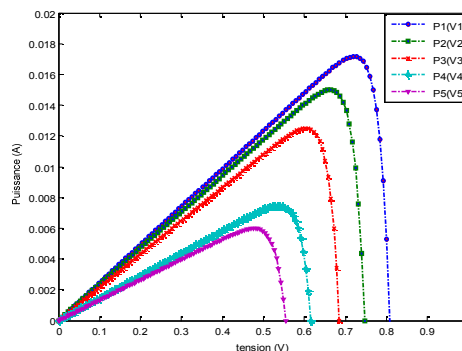


Figure 4. Caractéristique P (V) du premier système

Le tableau I donne des résultats de modélisation (courant de court-circuit I_{sc} , tension de circuit ouvert V_{oc} , rendement de conversion η) du premier système. En outre indiqué dans le même tableau les tendances de nos résultats calculés ont été comparées à quelques résultats de [9].

TABLEAU I
 GRANDEURS PHOTOVOLTAÏQUES DU PREMIER SYSTEME

Materials	Eg(e V)	Notre calcul			ref [der]	
		I _{cc} (mA)	V _{co} (V)	η(%)	η(%)	
	2.4	24.74	0.808	17.17%	14.72%	
GaInP X=0.47/ y=0	1.84	23.58	0.747	14.98%	15.52%	
GaAs X=1 y=1	1.43	21.68	0.685	12.49%	13.19%	
GaInAsP X=0.47/ y=0.63	1.12	14.67	0.616	7.48%	8.78%	
GaInAs X=0.47/ y=1	0.74	13.30	0.554	5.99%	4.93%	
Le rendement global est =				58.11%	57.14%	

B. Caractéristique I-V et P(V) du deuxième système 1par2par2 par un miroir :

Dans ce système les cinq cellules associées électriquement indépendantes 1par2par2 par un miroir dichroïque.

Les figures 5 et 6 représentent respectivement les caractéristiques I (V) et P (V) pour le deuxième système.

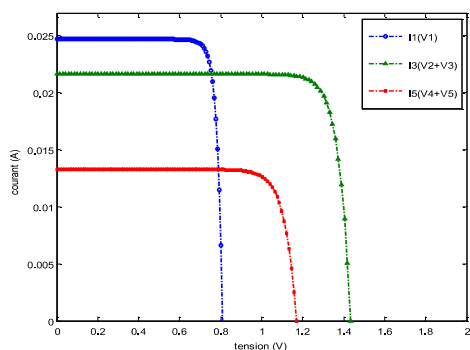


Figure 5 Caractéristique I(V) du deuxième système

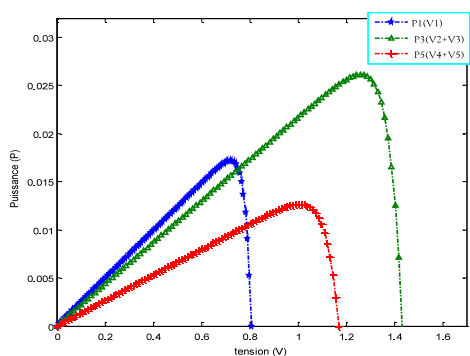


Figure 6 Caractéristique P (V) de la deuxième système

Les grandeurs photovoltaïques du deuxième système sont données dans le tableau II.

TABLEAU I

GRANDEURS PHOTOVOLTAÏQUES DU DEUXIEME SYSTEME

Materials		GaInP/ GaAs	GaInAsP/ GaInAs
Eg(eV)	2.4	1.83 1.41	1.12 0.74
$V_{CO}(Volt)$	0.808	1.43	1.17
$I_{CC}(mA)$ inf	24.74	21.68	13.30
rendement $\eta(\%)$	17.17	26.23	12.74

D'après ce tableau, on remarque que le rendement du deuxième système inférieur que le rendement du premier système .cela est parce que le courant traversant le dispositif est prédominé par la cellule au courant le plus faible.

C. Caractéristique I-V et P(V) pour le troisième système de couplage électrique avec un miroir:

Les cinq cellules étant connectées en série, le courant traversant le dispositif est prédominé par la cellule au courant le plus faible.

Sur la figure 7 et la figure 8, on représente la caractéristique I (V) et P(V) respectivement pour les cinq cellules en série électrique.

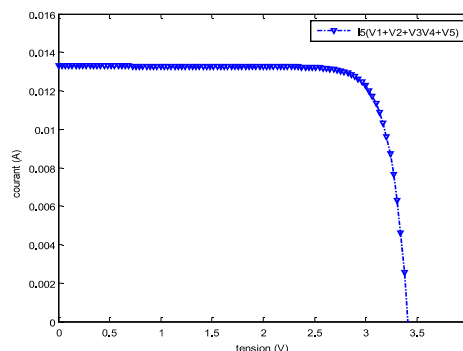


Figure 7. Caractéristique I(V) du troisième système

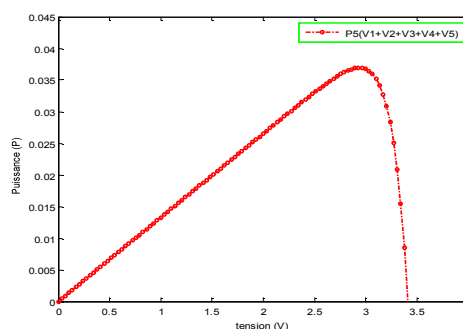


Figure 8. Caractéristique P(V) du troisième système

D'après la caractéristique électrique, représentée sur les figures 7 et 8:

Le courant traversant le dispositif est imposé par la cellule qui en fournit le plus faible.

La tension en circuit ouvert (V_{co}) est la somme des tensions en circuit ouvert de chaque cellule.

Mais en remarque que la puissance maximale de ce dispositif n'est pas la somme de puissance maximal de chaque cellule donc le rendement de ce dispositif n'est pas la somme des rendements.

Cellule mode mixte système couplage électrique:

$$V=V_1+V_2+V_3+V_4+V_5$$

$$I_{Ph} = \min(I_{phk})$$

Les grandeurs photovoltaïques du système de couplage électrique sont données dans le tableau III.

TABLEAU I
 GRANDEURS PHOTOVOLTAÏQUES DU TROISIEME SYSTEME

Grandeurs photovoltaïques	couplage électrique les cinq cellules
$V_{CO}(Volt)$	3.408
$I_{CC}(mA)$ inf	13.30
rendement $\eta(\%)$	37.77

The entire document should be in Times New Roman or Times font. Type 3 fonts must not be used. Other font types may be used if needed for special purposes.

D. Le rendement du système de couplage électrique avec un miroir :

En utilisant le tableau III on peut calculer le rendement de ce système.

$$\eta_{c-él} = \frac{\min(I_{\max k}) * (V_{\max 1} + V_{\max 2} + V_{\max 3} + V_{\max 4} + V_{\max 5})}{P_{in}}$$

Après les calculs on a trouvé $\eta_{c-él} = 37.77\%$.

F. Conclusions

Dans ce travail chapitre nous sommes intéressés à sortir les caractéristiques photovoltaïque des deux système : le système indépendant et celui du couplage électrique de cellule solaire mode mixte (tandem-dichroïque).

En plus, comme il est indiqué dans le début de cette partie que nous avons comparé nos résultats calculés à quelques résultats de [9]

Pour le système indépendant nous avons obtenu le rendement $\eta_{ind} = 58.11\%$. et pour le système de couplage électrique nous avons obtenu le rendement $\eta_{c-él} = 37.77\%$ pour cinq cellules mode mixte, et le rendement $\eta_{ind} = 53.44\%$.

REFERENCES

- [1] A. Hamidat, « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïques destinés pour l'alimentation en eau potable et pour la petite irrigation », Thèse de doctorat, Université de Tlemcen 2004.
- [2] T. Zdanowicz, T. Rodziewicz, M. Zabkowski-Waclawek "Theoretical analysis of the optimum energy band gap of semiconductors for fabrication of solar cells for applications in higher latitudes locations" Solar Energy Materials & Solar Cells 87 (2005) 757-769
- [3] J. R. Leguerre et M. Leroy « Une étude comparative de dispositifs photovoltaïques multiples » Revue Phys. Appl. 19 (1984) 889-903
- [4] M. Orgeret, 'Les piles Solaires, le Composant et ses Applications', Edition Masson, 1985.
- [5] Efficiency Of Multijunction photovoltaic Systems J. L. Gray, A. W. Haas, J. R. Wilcox, and R. J. Schwartz School of Electrical & Computer Engineering and Sirck Nanotechnology Center Purdue University, West Lafayette, IN 47907
- [6] 978-1-4244-1641-7/08/\$25.00 ©2008IEEE
- [7] : F. Benyarou, « Conversion des énergies », Document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001- 2002.
- [8] R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.
- [9] [J. L. Gray, A. W. Haas, J. R. Wilcox, and R. J. Schwartz 978-1-4244-1641-7/08/\$25.00 ©2008IE

Propriétés Optique de TiO₂ et Application de la Méthode de Swanepoel pour la Détermination de l'Épaisseur Optique et de l'Indice de Réfraction

K. Bedoud^{1,2}, R. Graine¹, H. Merabet¹

¹Research Center in Industrial Technologies CRTI, P.O. Box 64, Cheraga, 16014, Algiers, Algeria.

²Automatic Laboratory and Signals, Badji Mokhtar University, Annaba, Algeria

E-mail : k.bedoud@crti.dz

Résumé - Dans ce travail, des nano-films de dioxyde de titane « TiO₂ » ont été déposés par pulvérisation cathodique en utilisant une cible en céramique de Ti pur de 3" de diamètre et 0,250" d'épaisseur avec une pureté de 99,99% sur des substrats en verre à des épaisseurs (e) différents. Nous visons par ce travail d'étudier l'effet de l'épaisseur sur les propriétés optiques de TiO₂ nano films. Pour cela, nous avons utilisé la spectroscopie de transmittance optique UV-Visible pour la caractérisation optique. La variation du gap optique des films est inversement proportionnelle à la variation de l'épaisseur de 3,6 eV à 3,8 eV, respectivement. Pour la détermination de l'indice de réfraction et l'épaisseur du film nous avons utilisé la méthode proposée par Swanepoel, qui s'articule sur l'utilisation des franges d'interférence. On observe que, l'indice de réfraction n augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche déposée.

Mots clés : Couches minces, pulvérisation, semi-conducteur, TiO₂, nano-films, UV-Vis, épaisseur, indice de réfraction, Swanepoel.

I. INTRODUCTION

Le dioxyde de titane est un composé semi-conducteur hautement transparent dans la plage spectrale visible et infrarouge et absorbant dans la région UV. Il a donc un indice de réfraction élevé n, une large bande interdite optique et caractérisé par différentes formes cristallographiques : anatase, rutile et brockite. En conséquence, la phase anatase sous forme de couches mince est la plus étudiée pour ses propriétés catalytiques et son utilisation en optoélectronique. En pratique, les couches minces de TiO₂ sont largement exploitées pour la réalisation des composants et dispositifs, tel que, les capteurs de gaz, les cellules solaires, purification de l'eau et décomposition de divers polluants organiques [1, 2]. Plusieurs techniques sont utilisées pour la préparation des couches de TiO₂, comme le sol-gel, la pulvérisation cathodique, le spray pyrolyse, le dépôt chimique en phase vapeur [3-6]. L'indice de réfraction est l'une des propriétés fondamentales des matériaux comme il est étroitement lié à la polarisabilité électronique des ions, du champ local à l'intérieur du matériau ainsi qu'à la transmittance [7, 8]. La nanotechnologie est une techniques pour le traitement de la matière et visent à obtenir des matériaux aux fonctionnalités nouvelles et aux caractéristiques améliorées. Dans ce travail, les couches minces de TiO₂ ont été

élaborées par la technique de pulvérisation cathodique. Pour la détermination de l'indice de réfraction et l'épaisseur du film nous avons utilisé la méthode proposée par Swanepoel, qui s'articule sur l'utilisation des franges d'interférence de la transmittance des nano-films élaborés. Les résultats préliminaires concernant l'influence de l'épaisseur sur les propriétés optique des nano-films élaborés sur des substrats de verre sont présentés et discutés.

II. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les nano-films du dioxyde de titane présenté dans cet article ont été déposés sur des substrats en verre par pulvérisation cathodique (13,56 MHz) avec une pression maximale de 10-6 Torr et une puissance maximale de 600 W. l'argon pure (99,99%) a été utilisé comme gaz de pulvérisation. Nous avons utilisé une cible Ti en céramique pure (99,99%) de diamètre 3" et d'épaisseur 0,250". Afin d'éliminer les impuretés dans le vide, la chambre de pulvérisation a été pré-pulvérisée à une pression d'environ 6,10-6 Torr. Et, pour éliminer les contaminations de surface, la cible a été nettoyée. Les substrats ont été versés dans HF puis nettoyés avec l'eau distillée et l'acétone pendant 5mn. Elles sont Lavées dans le méthanol à température ambiante. Et enfin, on fait un séchage à l'aide d'un séchoir. La puissance de pulvérisation cathodique est fixée à 210 W, puis nous avons introduit de l'argon (50sccm) et de l'oxygène (10sccm) à des débits constants. En effet, l'épaisseur de chaque échantillon a été varié en fonction du temps de dépôt comme suit : 1h30mn, 2h et 5h pour E1, E2 et E3, respectivement. Les spectres de transmittance optique ont été mesurés en utilisant un spectrophotomètre Jasco V-760 couvrant la gamme UV-visible avec une vitesse de balayage de 400 nm/min correspondant à la gamme de longueurs d'onde : 190-900 nm à la température ambiante. La figure 1 montre les spectres de transmittance des nano films de TiO₂ en fonction de la longueur d'onde pour des épaisseurs différents et à température ambiante dans la plage spectrale de 300 nm à 600 nm. Les spectres de transmittance présentent une transmittance élevée qui peut atteindre 90% dans le visible. Bien que l'allure générale des spectres soit identique, la région de forte transparence est située entre 300 et 600 nm. Ce qui attribue aux couches minces de TiO₂ le

caractère de transparence dans le violet et le visible. Toutefois, La région de forte absorption correspond à l'absorption fondamentale ($\lambda < 360\text{nm}$) dans les films de TiO_2 est due à la transition électronique inter-bande.

Le phénomène de franges d'interférence est observé pour les longueurs d'onde au-delà du bord d'absorption, dues à la réflexion multiple du rayonnement entre la surface inférieure en contact avec le substrat et la surface libre de la couche. Un tel comportement des spectres de transmittance est une preuve de l'uniformité de l'épaisseur et de l'homogénéité des films de TiO_2 élaborés, et que les surfaces sont lisses [7-10].

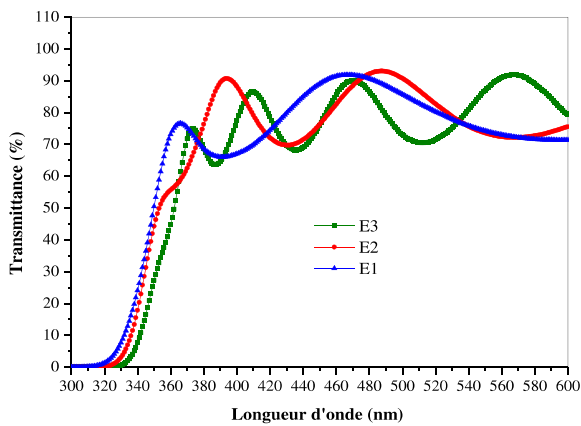


Fig. 1 Spectres de transmittance de TiO_2 nano films déposés à des épaisseurs différentes

A partir des spectres de transmittance (T), il est possible de calculer la valeur de gap optique de semi-conducteurs à partir de la formule de Tauc (E_g (eV)) définie par l'équation suivante [11]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (1)$$

Avec α (cm^{-1}) est le coefficient d'absorption déterminée par la formule suivante :

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2)$$

L'énergie des photons incidents ($h\nu$) peut être calculée comme suit :

$$h\nu = \frac{1240}{\lambda} \quad (3)$$

Nous avons remarqué qu'avec l'augmentation de l'épaisseur le nombre des franges d'interférence augmente. Suite à cette forme des spectres de transmission, nous pouvons calculer l'épaisseur optique et l'indice de réfraction par l'utilisation de la méthode de Swanepoel [12, 13]. Cette méthode consiste à dessiner une enveloppe entourant la courbe de transmission et reliant les maximums (T_M) et les minimums

(t_m) en tant que fonction continue de la longueur d'onde (voir Fig. 2).

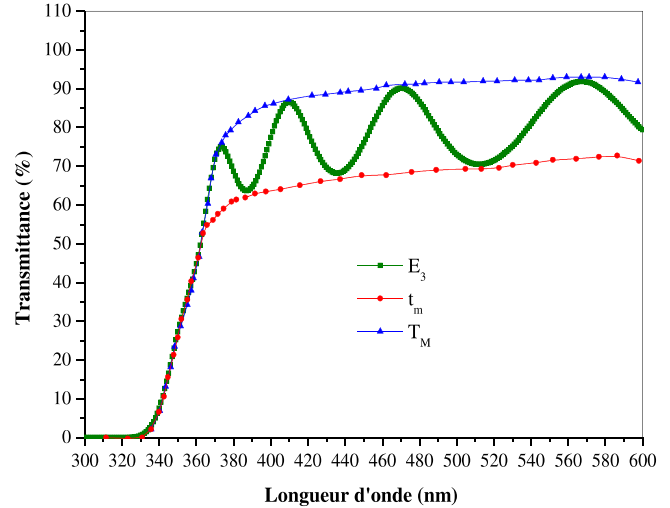


Fig. 2 Courbes de transmittance T_M et t_m en fonction de la longueur d'onde

La transmittance sans interférence (T_α) peut être calculée en utilisant la formule [8, 13] :

$$T_\alpha = \sqrt{T_M t_m} \quad (4)$$

L'épaisseur des nanostructures est déterminée à partir de l'équation suivante [14] :

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (5)$$

Avec n_1 et n_2 présentent, respectivement, les indices de réfraction des films pour les longueurs d'onde λ_1 et λ_2 adjacente. Les indices de réfraction dans la région spectrale des zones d'absorption transparente, faible et moyenne peuvent être calculés comme suit [12] :

$$n = \left[N + (N^2 - n_v^2)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

De plus, le coefficient de Swanepoel (N) dans la région spectrale transparente peut être calculé par l'expression suivante :

$$N = \frac{2n_v}{t_m} + \frac{n_v^2 + 1}{2} \quad (7)$$

Et par la formule (8) pour les régions d'absorption faible et moyenne.

$$N = \frac{2n_v(T_M - t_m)}{T_M t_m} + \frac{n_v^2 + 1}{2} \quad (8)$$

Où n_v est l'indice de réfraction du verre (1,5172).

Table2 : Paramètres optique des trois (03) échantillons de TiO₂ nano-films

	$\lambda_1(nm)$	$T_{M1}(\%)$	$t_{m1}(\%)$	$n_1(-)$	$n_2(-)$	$\lambda_2(nm)$	$T_{M2}(\%)$	$t_{m2}(\%)$	$e_{meth}(nm)$
E3	469.79	90.368	65.699	1.531	1.532	409.63	86.96	64.61	1042.1435
E2	486.35	93.808	73.982	1.527	1.530	393.59	91.764	68.45	668.825
E1	465.772	91.199	75.528	1.525	1.526	366.21	77.356	64.59	579.989

Le tableau 2 récapitule les paramètres optiques des trois échantillons des nano-films déposés.

De la figure 3-a et 3-b, il ressort clairement que le gap optique diminue avec l'augmentation de de l'épaisseur. En effet, le gap optique se réduit suivant l'effet Roth. Cette diminution est due à la diminution de la taille des cristallites [10, 15].

Connaissant la valeur du gap optique, il est possible de calculer l'indice de réfraction de chaque échantillon en utilisant la formule suivante : [10, 15].

$$\frac{n^2-1}{n^2+1} = 1 - \sqrt{\frac{E_g}{20}} \quad (9)$$

L'augmentation de l'épaisseur des couches de TiO₂ ont entraîné une réduction de la transmission qui conduit à une augmentation de l'indice de réfraction.

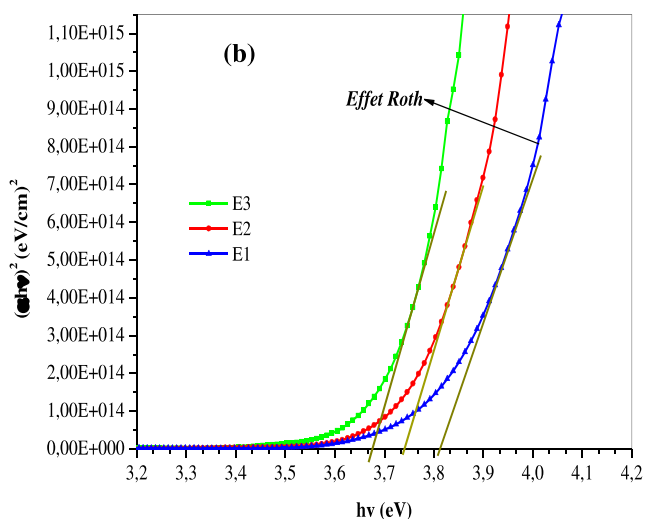
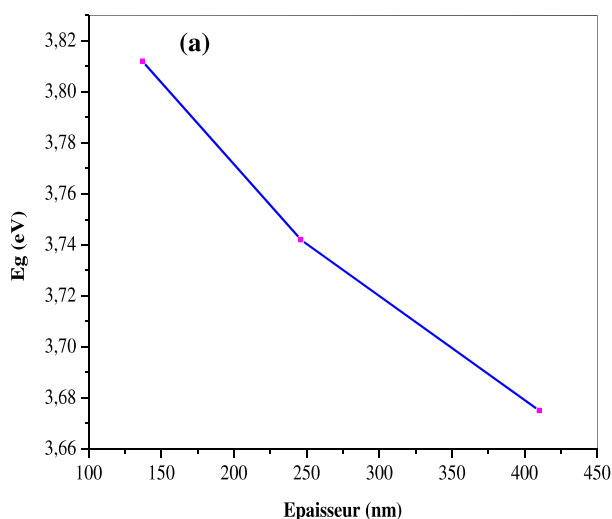


Fig. 3 a) Evaluation du gap optique en fonction de l'épaisseur, b) Shift du gap optique des couches minces de TiO₂ pour différentes épaisseur

Tableau. 3. Paramètres optique des trois (03) échantillons de TiO₂ nano-films

	$E_g(eV)$	$n(-)$	$e_{meth}(nm)$
E3	3,675	1.914	1042.1435
E2	3,742	1.903	668.825
E1	3,812	1.892	579.989

Le coefficient d'absorption peut être calculé en fonction de la transmittance optique mesurée comme suit [8]:

$$\alpha = \frac{2.303}{d} \log\left(\frac{1}{T}\right) \quad (10)$$

III. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté les résultats préliminaires des couches de TiO₂ élaborées par la technique de pulvérisation cathodique. L'analyse par UV-Vis a confirmé que les couches minces de TiO₂ ont présenté une transmission élevée qui peut atteindre 90 % dans la région UV-Vis et une diminution du gap optique de 3.81 à 3.67 eV avec l'augmentation de l'épaisseur des films déposés. L'indice de réfractons des trois échantillons a été déterminé en utilisant deux méthodes différentes ; les résultats obtenus étaient très proches les uns des autres. Nous pouvons expliquer cette variation par la détérioration des cristallites par l'augmentation de l'épaisseur des films élaborés. Les résultats montrent une augmentation de l'indice de réfraction avec la diminution du gap optique. Il est à noter que suite des résultats obtenus, nous pouvons dire que le dioxyde de titane peut être utilisé pour l'élaboration des cellules photovoltaïque. En effet, quand les couches sont devenues épaisses, leur absorption augmente, ce qui signifie que l'indice de réfraction deviendra plus élevé.

RÉFÉRENCES

- [1] M. Sarraf, E. Zalnezhad, A. Bushroa, A. Hamouda, S. Baradaran, B. Nasiri-Tabrizi, and A. Rafieerad, "Structural and mechanical characterization of Al/Al₂O₃ nanotube thin film on TiV alloy," *Applied Surface Science*, vol. 321, pp. 511-519, 2014.
- [2] D. Bae, S. Shayestehaminzadeh, E. B. Thorsteinsson, T. Pedersen, O. Hansen, B. Seger, P. C. Vesborg, S. Ólafsson, and I. Chorkendorff, "Protection of Si photocathode using TiO₂ deposited by high power impulse magnetron sputtering for H₂ evolution in alkaline media," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 144, pp. 758-765, 2016.
- [3] T. Hitosugi, A. Ueda, S. Nakao, N. Yamada, Y. Furubayashi, Y. Hirose, T. Shimada, and T. Hasegawa, "Fabrication of highly conductive Ti_{1-x}Nb_xO₂ polycrystalline films on glass substrates via crystallization of amorphous phase grown by pulsed laser deposition," *Applied physics letters*, vol. 90, p. 212106, 2007.
- [4] N. Oka, Y. Sanno, J. Jia, S.-i. Nakamura, and Y. Shigesato, "Transparent conductive Nb-doped TiO₂ films deposited by reactive dc sputtering using Ti-Nb alloy target, precisely controlled in the transition region using impedance feedback system," *Applied Surface Science*, vol. 301, pp. 551-556, 2014.
- [5] A. Manole, M. Dobromir, M. Girtan, R. Mallet, G. Rusu, and D. Luca, "Optical properties of Nb-doped TiO₂ thin films prepared by sol-gel method," *Ceramics International*, vol. 39, pp. 4771-4776, 2013.
- [6] M. N. Islam, T. Ghosh, K. Chopra, and H. Acharya, "XPS and X-ray diffraction studies of aluminum-doped zinc oxide transparent conducting films," *Thin Solid Films*, vol. 280, pp. 20-25, 1996.
- [7] K. Punitha, R. Sivakumar, C. Sanjeeviraja, V. Ganesan, "Influence of post-deposition heat treatment on optical properties derived from UV-vis of cadmium telluride (CdTe) thin films deposited on amorphous substrate," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 344, pp. 89-100, 2015.
- [8] P.K.K. Kumarasinghe, Amila Dissanayake, B.M.K. Pemasiri, B.S. Dassanayake, 'Effect of post deposition heat treatment on microstructure parameters, optical constants and composition of thermally evaporated CdTe thin films', *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 58, pp. 51-60, 2017.
- [9] S. Chandramohan, R. Sathyamoorthy, P. Sudhagar, D. Kanjilal, D. Kabiraj, K. Asokan, "Optical properties of swift ion beam irradiated CdTe thin films," *Thin Solid Films*, vol. 516, pp. 5508-5512, 2008.
- [10] I.Y. bouderbala, A. Herbadji, L. Mentar, A. Beniaiche and A. Azizi, "Optical Properties of Cu₂O Electrodeposited on FTO Substrates: Effects of Cl Concentration," *Journal of Electronic Materials*, vol. 47, N° 3, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-6001-z>.
- [11] F. Z. Tepehan, F. E. Ghodsi, N. Ozer, and G. G. Tepehan, "Optical properties of sol-gel dip-coated Ta₂O₅ films for electrochromic applications," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 59, pp. 265-275, 1999.
- [12] E.R. Shaabana, I.S. Yahiab;c;_ and E.G. El-Metwally, "Validity of Swanepoel's Method for Calculating the Optical Constants of Thick Films," *Acta Physica Polonica A*, vol. 121, 2012.
- [13] R. Swanepoel, "Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 16, pp. 1214-1222, 1983.
- [14] J.C. Manificier, J. Gasiot, J.P. Fillard, *J. Phys. E* 9,1002 (1976).
- [15] M. Benhaliliba, C.E. Benouis, M.S. Aida, F. Yakuphanoglu, and A.S. Juarez, *J. Sol Gel Sci. Technol.* 55, 335 2010.

Modification de Polyéthylène Haute Densité par Greffage Radicalaire de L'anhydride Maléique

Tabet habiba^{#1}, benmesli samia^{##2}

[#]Department De Petrochimie Et Genie Des Procédés ; Faculte De Technologie ; Université 20 Aout 1955-Skikda ,algerie

habiba_tabet@yahoo.fr

^{*}Laboratoire Des Matériaux Polymériques Multiphasiques (LMPMP) ,Département De Génie Des Procédés ,Faculté De Technologie, Université Ferhat-Abbas-Sétif- Algérie

samiabenmesli@yahoo.fr

Résumé--Les procédés actuels de modification chimique des polyoléfines, à l'état fondu, basés sur l'utilisation des réactifs radicalaires de type peroxyde, présentent certains avantages économiques et environnementaux.

Le travail présenté est une contribution à l'étude de la modification chimique du polymère. La réaction de greffage a été conduite dans un mélangeur interne et dans une extrudeuse pour confirmer la réaction de greffage oné été envisagées une technique basée sur l'indentification des groupements fonctionnels par IRTF.

L'étude des propriétés rhéologiques montres par melangeur inetrne a permis d'observer une augmentation de la viscosité lorsque le taux de greffage augmente, ceci due au les fortes d'interactions améliorées par le greffage de l'anhydride maléique.

Les mots clés : Greffage / anhydride maléique / polyéthylène haute densité / peroxyde

I. INTRODUCTION

Depuis quelques années, les producteurs de matières plastiques proposent des gammes de polymères greffés de plus en plus diversifiées, en termes de taux de greffage ou de structure des chaînes macromoléculaires,

Si l'intérêt porte aux polyoléfines greffées est si grand, c'est que la fonctionnalisation des chaînes par des groupements polaires permet l'élargissement du domaine d'application de ces matériaux. Le polyéthylène et le polypropylène présentent de multiples utilisations, du fait de leurs nombreux avantages (faible cout, densité basse, bonnes propriétés mécaniques et physiques. . .). Cependant, leur faible niveau d'interaction avec des composes plus polaires, liée à leur polarité basse et à leur forte cristallinité, limite parfois les applications. L'ajout d'une petite proportion de polyoléfines greffées dans une phase pure est l'une des voies les plus efficaces d'amélioration des propriétés d'adhésion [1].

Le greffage des polyoléfines est une modification chimique, au cours de laquelle un monomère fonctionnel hydrophile est fixé sur la chaîne macromoléculaire hydrophobe du polymère. Cette opération est moyen efficace qui introduit quelques propriétés désirables dans le polymère. En effet la polyoléfine modifiée obtenue est une

substance qui présente deux parties de polarités différentes, une tête hydrophile (polaire) qui est le monomère réactif et une queue hydrophobe (apolaire) qui n'est que la chaîne macromoléculaire du polymère.

Le greffage d'une fonction polaire sur une chaîne polymère peut se faire :

- **À l'état solide** : par l'intermédiaire d'une irradiation ultraviolette ;
- **En solution**: dans un solvant aromatique approprié et en présence d'un initiateur de radicaux libres ;
- **À l'état fondu** : dans une extrudeuse ou dans un mélangeur interne et en présence d'un initiateur radicalaire [2,3].

L'emploi des peroxydes permet de faire apparaitre sur une chaîne macromoléculaire des sites radicalaires permettant d'amorcer des polymérisations vinyliques donnant naissance à des chaînes latérales. Le choix de peroxyde est basé sur des raisons techno-économiques. En pratique le générateur des radicaux et malaxé avec les mélanges, sa décomposition doit donc rester lente au voisinage de la température de ramollissement du polymère, cette condition limite les choix possibles des peroxydes et la molécule la plus commune utilisée est le peroxyde de dicumyle [4].

Les polyoléfines tels que le **PP** et le **PE** présentent de faibles interactions avec les charges minérales dues au manque de groupements fonctionnels réactifs.

C'est pour cette raison qu'il est souhaitable de créer des sites actifs au niveau du polymère, afin d'améliorer l'adhésion interracial entre les différents constituants.

En général l'addition du peroxyde a pour effet une domination du module d'élasticité et une augmentation de la contrainte à la rupture avec l'augmentation de la concentration en peroxyde. Les meilleurs résultats sont obtenus pour des temps de séjour réduit avec l'augmentation de la concentration du peroxyde [5].

L'objectif de notre travail consiste alors à élaborer un nouveau matériau **PE-g-MA** qui permet certes d'améliorer les propriétés mécaniques et la stabilité thermique du **PE**

mais qui présente aussi un intérêt pour l'économie nationale.

L'étude des propriétés rhéologique, et l'évaluation des différents échantillons ont été effectuée par des essais faisant intervenir différentes techniques expérimentales : la spectroscopie infrarouge, et la densité

II. MATERIAUX et METHODES

A. Matériaux Utilisé

Le polyéthylène utilisé dans cette étude est un **PEHD** 5502 (de l'unité Polymède CP2k sise à la zone industrielle de Skikda). Ce **PEHD** est obtenu par voie radicalaire selon le procédé de Philips utilisant des basses pressions.

Le peroxyde de dicumyle est de type dialkyle peroxyde, sa forme physique à 23°C est de 90-100% solide (cristalline) sous forme de poudre blanche. Il est considéré comme une source de radicaux libres utilisé comme initiateur pour la polymérisation, un agent de catalyse et de vulcanisation pour les élastomères, ainsi qu'un agent réticulant pour les polyoléfines ou agent de solidification [6]. Le peroxyde de décumyle (**DCP**) vendu par la société « MERCK ».

L'anhydride maléique (**MA**) est le monomère le plus utilisé dans la fonctionnalisation des polyoléfines, **MA** vendu par « ALDRICH CHEMICAL COMPANY INCORPORATION »

B. Greffage du Polyéthylène

L'anhydride maléique **MA** (0.2%, 0.4%, 0.6% en poids) et le polyéthylène haute densité **PEHD** sont mélangés dans un mélangeur interne avec et sans peroxyde. Les différents mélanges sont malaxés et homogénéisés à 170 °C pendant 10 minutes. Un broyage de la matière est nécessaire pour la préparation des échantillons destinés aux analyses spectroscopiques.

Pour simplifier l'écriture, le mélange **PEHD/PEHD-g-MA** sera notée par la lettre *f*, les divers mélanges seront alors désignées par la nomenclature f_1 , f_2 et f_3 pour les **PEHD** modifiés sans peroxyde par la nomenclature f_4 , f_5 et f_6 pour les **PEHD** modifiés en présence de **DCP** et f_0 désignée le polyéthylène vierge

C. Préparation Des Eprouvettes

Les éprouvettes destinées à l'analyse spectroscopique (FTIR) ont été préparées par moulage par compression en utilisant un moule d'épaisseur inférieur à 1 mm. La compression est réalisée à 180°C et sous une pression de 150 kg/cm² pendant un temps total égal à 5 minutes. On obtient des films. A l'aide d'une découpeuse, on découpe les films pour réaliser l'analyse.

D. Analyse Rhéologique

Un plastographe **BRABENDER** est un mélangeur interne qui permet de suivre le couple de rotation en fonction du temps. On obtient en général une courbe sur laquelle on peut déterminer le temps de fusion de la matière, le couple maximal lors de l'introduction de la

matière (encore solide) et le couple minimal (fusion totale) suivi d'un palier de stabilité qui est une indication directe de la viscosité et qui sera pris en considération pour toutes les compositions afin d'optimiser la concentration des extenseurs..

E. Spectroscopie Infrarouge a Transformé de Fourier (IRTF)

L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde auxquelles le matériau absorbe et les intensités de l'absorption. Les échantillons préparés du polymère vierge (**PEHD**) et du polymère greffé par l'anhydride maléique (**PEHD-g-MA**) sont soumis aussi à une caractérisation spectrale. L'analyse est effectuée sur des films fins (100-200 µm). Les spectres infrarouges sont enregistrés à partir des échantillons réalisés avec un nombre d'accumulations égales à 120.

III. RESULTATS et DISCUSSIONS

A. Analyse Spectroscopique Infrarouge A Transformé De Fourier (IRTF) Du PEHD-G-MA

A fin d'améliorer la finesse de la dispersion de l'amorceur, du monomère de greffage nous avons réalisée la modification **PEHD** par de modes de malaxage ; par mélangeur interne et l'extrudeuse réactive ;

Les Figures .1 et 2: illustre les spectres infrarouges enregistrés entre 2000 et 500cm du Polyéthylène haute densité (**PEHD**) vierge, Polyéthylène greffé avec l'anhydride maléique (**PEHD-g-AM**) sans peroxyde de dicumyle (**DCP**) et Polyéthylène greffé avec l'anhydride maléique (**PEHD-g-AM**) avec **DCP** réalisés par les deux modes de malaxage

Fig .1 correspond au spectre infrarouge enregistré entre 2000 et 500cm du **PEHD** et les **PEHD** modifiées dans mélangeur interne ; les spectres (f_1 , f_2 et f_3) de le polyéthylène greffé par anhydride maléique seul ne présente aucun changement quelque soit le taux d'incorporation de l'AM. Par contre dans le spectre .2 (f_4 , f_5 et f_6) de le polyéthylène greffé par anhydride maléique avec peroxyde on distingue une bande d'absorption vers 1790 cm⁻¹ est liée aux vibrations d'élongation du groupe carbonyle de l'anhydride maléique.

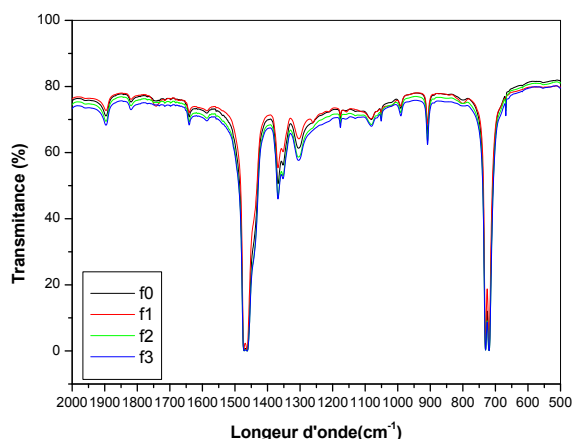


Fig.1: Spectres IRTF enregistré entre 2000 et 500 cm (f_0) Polyéthylène haute densité (PEHD) et (f_1, f_2, f_3) Polyéthylène greffé avec l'anhydride maléique (PEHD-g-AM) sans DCP dans mélangeur.

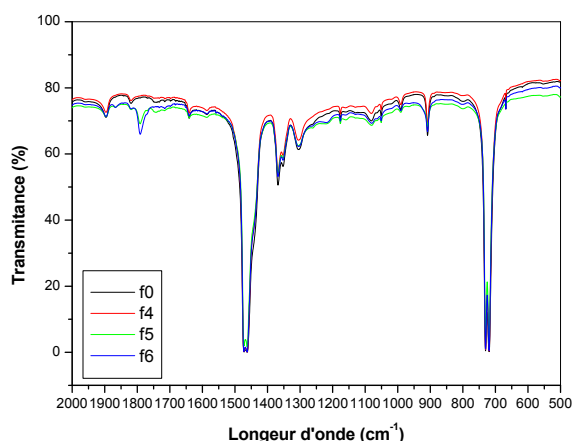


Fig.2: Spectres IRTF enregistré entre 2000 et 500 cm (f_0) Polyéthylène haute densité (PEHD) et (f_4, f_5, f_6) Polyéthylène greffé avec l'anhydride maléique (PEHD-g-AM) sans DCP dans mélangeur

B. Analyse rhéologique

Les figures .6 et 7 présentent l'évolution du couple de résistant avec le temps permet donc de suivre indirectement une réaction chimique se déroulant dans la cellule du mélangeur interne. L'évolution de torque en fonction de temps et le taux d'anhydride maléique introduise dans PEHD sans DCP est reportée dans la figure 7 celle-ci peut être commentée en disant que le torque dans tous les système s'augmente avec l'incorporation de AM ce ci peut être du au l'augmentation de la viscosité de PEHD modifiée par l'anhydride maléique puis le torque n'évolue pas avec la concentration en AM ce comportement s'explique d'un part la réaction de greffage n'est pas terminée (il faut plus de temps) et d'autre part les interaction formées entre PEHD et AM sans physique n'est pas chimique(ce qui confirme FTIR)

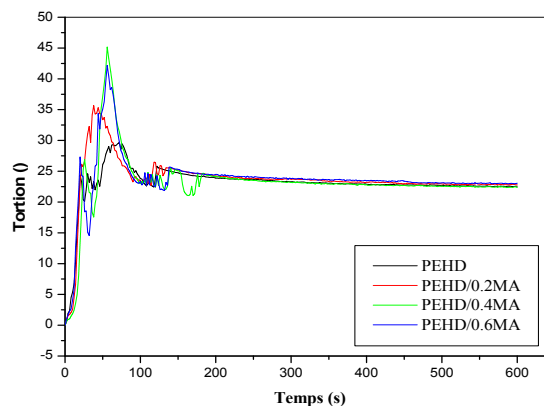


Fig.6 : évolution du couple de résistant en fonction du temps de malaxage et taux d'incorporation de AM pour le système PEHD /AM sans peroxyde

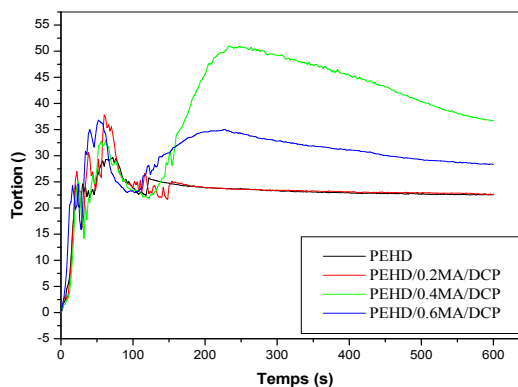


Fig.7: évolution du couple de résistant en fonction du temps de malaxage et taux d'incorporation de AM pour les systèmes PEHD /AM avec peroxyde

D'après les courbes on observe que le torque augmente avec l'augmentation de taux de AM jusqu'à un seuil puis diminuée pour atteindre définitivement un palataux constante est identique à celle du PEHD c'est le cas du PEHD 0.2 AM et 0.2 DCP

Par contre les autre PEHD modifiées montre une augmentation de torque puis une diminution mes il reste toujours supérieur au plateau de PEHD ce ci est due au le greffage chimique de AM sur les chaine polymérique et par conséquence augmente la viscosite du PEHD modifiée

La chute remarque pourrait être attribuée a un effet dit de « plastification interne » de la masse fondue due certainement a une diminution corrélative des interactions entre les chaines,

En effet tous les mélanges ont été préparé dans les conditions vitesse et de température pendant 10 min et on peut considère que ce temps de chauffage est suffisante pour que tout le peroxyde soit décomposé et que l'état de fusion de la masse est plus ou mois homogène

D'après les figures l'effet de peroxyde sur taux de greffage est plus remarquable ; il engage la réaction d'initiation pour génère des radicaux libres ; les radicaux ainsi formes initieront le mécanisme de greffage, De manière assez générale, il semblerait qu'une augmentation de la concentration en amorceur soit susceptible d'augmenter le taux et l'efficacité du greffage [7],[8].

IV. CONCLUSION

Le présent travail avait pour but d'établir des corrélations entre les propriétés rhéologiques et physiques d'une matrice thermoplastique ; d'un monomère de greffage et d'un amorceur organique.

Cependant pour que la modification soit assurée entre la résine et l'AM, nous avons eu recours à réaliser la modification l'état fondu par deux modes de malaxage et à l'incorporation d'un tiers agent. Il s'agit du DCP à taux égal 0.2 % .

Le greffage a été mis en évidence par l'existence des bandes d'absorption à 1790 cm^{-1} et 1713 cm^{-1} du groupement carbonyle au moyen de la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (IRTF).

L'étude des propriétés rhéologiques en régime statistique a permis de connaître les lois d'écoulement sous diverses conditions de température et de cisaillement. Elle a montré que le torque dans tous les systèmes sont augmentés avec l'incorporation de AM ce qui peut être dû à l'augmentation de la viscosité de PEHD et que l'effet de peroxyde sur taux de greffage est plus remarquable sur tout pour 0.4% de AM

V. LES REFERENCES

- [1] J'arvel'a P., Schucaï L. et J'arvel'a P., Dynamic Mechanical Properties and Morphology of Polypropylene/Maleated Polypropylene Blends, *Journal of Applied Polymer Science*, 1996, vol. 62, p. 813–826.
- [2] Dean Shi, Jinghui Yang, Zhanhai Yao, Yong Wang, Hongliang Huang, Wu Jing, Jinghua Yin, Giovanna Costa, Functionalisation of isotactic polypropylene with maleic anhydride by reactive extrusion : Mechanism of melt grafting, *POLYMER*, Elsevier Science Ltd, 42, (2001), 5549-5557.
- [3] R.M. Ho, A. C. Su, CH. Wu and S.I. Chen, Fictionalisation of polypropylene via melt mixing, *POLYMER*, Vol. 34, (1993), 3264-3269.
- [4] N.Gaylord, et M.Mehta.« Role of Homopolymerization in the Peroxide-Catalyzed Reaction of Maleic Anhydride and Polyethylene in the Absence of Solvent», *J. Polym.Sci.: Polymer Letters*, Vol.20, 1982, P.481.
- [5] A.Colbeaux.« Comptabilisation de Mélanges Polypropylène/Polyéthylène par Extrusion Réactive». Thèse de Doctorat, INSA, Lyon, 2001, p.340,
- [6] [A.Deffieux.« Nouvelles tendances en chimie des polymères», Cours GFP,Ed. GFP, 111V), 195 (1996).
- [7] R.Hettema, J.Van Tol, and L.P.B.M.Janssen. "In-situ reactive blending of polyethylene and polypropylene in co-rotating and counter-rotating extruders", *Polym.Eng.Sci.*, 1999, 39 (9), 1628-1641.
- [8] J.B.Wong Shing, W.E.Baker, and K.E.Russell. "The effect of reaction conditions on the grafting of 2-(dimethylamino)ethyl methacrylate onto squalane.", *Polym.Prep.*, 1993, 34 (2), 364-369

The International Publisher & C.O (IPCO) is an organization that promotes science & engineering research worldwide without any discrimination. It acts as a bridge between young and experienced professionals through scientific journals. IPCO depends on researchers, academicians and corporate support for bridging relationships with existing scientific & engineering organizations and customizing relationships with standard bodies. The main purpose of this organization is to promote new research and scientific applications in the field of Control, Energy, Engineering, Computer Science and allied fields. IPCO provides high quality and flexible information solutions to researchers. We currently publish international journals and we provide online solutions to help researchers to achieve better results. Active Peer Review: All our journals, which are run by a group of experienced professional editors, are subject to an efficient, fair, and constructive peer review process. Maximum Global Distribution: Our website guarantees visibility, including social bookmarking services, so that your article reaches those people who need to read and cite it. High Quality, Reliable Rapid Production: Our production teams work together to continuously improve and enhance our services, building issues online and our new, even quicker production workflows. We deliver these innovations without compromising our high quality standards.

International Publisher & C.O (IPCO), in its new aspect, represents a new contribution between North African & International researchers and institutions and cover a wide range of academic disciplines. IPCO serves the world's research and scholarly communities, and aims to be one of the largest publishers for professional and scholarly societies. IPCO's journals maintain the highest standards of peer review, with some internationally-recognized editors serving on the editorial boards of IPCO's journals.

Maghreb Arab Street
Khzema East Sousse - Tunisia
Email : ipco.direction@gmail.com
Phone: (+216) 31 121 155
www.ipco-co.com
ISSN: 1737-9334

Biographies des éditeurs:



Dr. Georges Descombes (France)

Professeur des universités au Cnam

Ingénieur motoriste diplômé du Cnam, spécialiste en conversion d'énergie dans les machines thermiques, professeur des universités au Cnam en énergétique.

descombesgeorges@gmail.com



Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)

Ingénieur en génie Electrique diplômé de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)

Directeur du Centre International for Innovation & Development (ICID).

ahmed.rhif@gmail.com

Biographies des éditeurs:



Dr. Georges Descombes (France)

Professeur des universités au Cnam

Ingénieur motoriste diplômé du Cnam, spécialiste en conversion d'énergie dans les machines thermiques, professeur des universités au Cnam en énergétique.

descombesgeorges@gmail.com



Dr. Ahmed Rhif (Tunisia)

Ingénieur en génie Electrique diplômé de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT)

Directeur du Centre International for Innovation & Development (ICID).

ahmed.rhif@gmail.com