

Préface



Tout à fait consciente du rôle qu'elle joue en tant que locomotive du développement, la Faculté Polydisciplinaire de Béni-Mellal (FP-BM), depuis sa création, n'a cessé de connaître des activités variées dans les différents champs disciplinaires s'inscrivant dans sa vocation afin de contribuer à faire réussir l'Université Sultan Moulay Slimane, dont elle fait partie, dans sa mission d'acteur régional et national.

Dans ce contexte, l'organisation d'évènements scientifiques s'impose dans la stratégie d'épanouissement de notre établissement qui vise à accorder à la recherche scientifique tout l'intérêt qu'elle mérite vue son rôle dans le développement de la région d'appartenance. Ainsi, la tenue de la première rencontre sur la recherche et l'innovation (R2I'18), le 10 et 11 mai 2018, à la FPBM est venue dans cet esprit. Elle fut l'œuvre de l'équipe de recherche en électronique, instrumentation et mesures en collaboration avec des structures de recherche relevant d'autres universités. Elle permit aux différents acteurs (Enseignants chercheurs et étudiants) d'échanger de savoir, de savoir-faire et de prendre connaissance des nouveautés dans le domaine, choses nécessaires pour la formation et le développement.

Au nom de la FP-BM, nous tenons à rendre hommage aux entités de recherche ayant initié conjointement la première R2I et à ceux qui ont veillé à l'édition de ce premier numéro.

Professeur Benachir El Hadadi
Doyen de la Faculté Polydisciplinaire de Béni-Mellal
L'Université Sultan Moulay Slimane
Maroc.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation
Editorial

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Recommandations Aux Auteurs

Ces recommandations donnent des lignes directrices de mise en forme pour les auteurs afin de préparer leur article pour publication dans la Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Le Titre doit être saisi en 20 pt Times New Roman, le nom des Auteurs en 12 pt Times New Roman, leurs affiliations et Adresse en 10 pt Times New Roman.

I. LES MOTS-CLES SERONT UTILISES POUR UN REPERAGE FACILE DU MANUSCRIT A L'AIDE DES MOTEURS DE RECHERCHE. ILS COMPRENNENT AU MOINS CINQ MOTS-CLES SEPARES PAR DES VIRGULES.

Nous mettons à votre disposition une template, Ce document est un modèle. Nous vous demandons de reproduire votre manuscrit en respectant la mise en forme de ce modèle. La meilleure façon de le faire est simplement de télécharger le modèle, et d'y (copier-coller) le texte de votre manuscrit.

Mise en Page Les marges doivent être définies comme suit:

- Haut = 1.7cm
- Bas = 1.7cm
- Gauche = 1.7cm
- Droite = 1.7cm

Votre papier doit être dans un format à deux colonnes avec un espace de 1,27 cm entre les colonnes

Le document en entier doit être en times new roman. Utilisez au maximum 3 niveaux pour les titres

Figures. Tableaux....-les figures sont numérotées en chiffres arabes. Fig. 1.2. ... : les légendes doivent expliciter la signification des illustrations.

-les tableaux doivent être présentés à leur emplacement exact et numérotés en chiffres romains. I.II...

-les titres avec les légendes doivent être placés en bas pour les figures et en haut pour les tableaux (times. Corps 10. Gras. Interlignage simple).

Formules : les formules mathématiques doivent être centrées et éventuellement numérotées selon leur ordre de citation dans le texte : la numérotation doit être portée à droite. Entre parenthèse. En chiffres arabes (times. corps 12).

Références : L'intitulé de la section Références ne doit pas être numéroté. Tous les éléments de référence doivent être en police 8 pt. Se il vous plaît utiliser les styles régulière et Italique pour distinguer les différents champs, comme indiqué dans la section Références. Nombre des éléments de référence consécutivement entre crochets (par exemple [1]).

Bibliographie : les références bibliographiques sont signalées dans le texte par des numéros entre crochets suivant l'ordre de citation : [1] pour une référence. [1.2...] pour plusieurs références.

-la liste bibliographique est présentée selon le modèle suivant :

[1] Michaud A. et Piqué A. Evolution of Tectonophysies . 1992. 12(3).p. 25-42.

[2] Piqué A. et Julteau T .Evolution de Bull.Soc.Géol.Fr..1996.25(2).p.56-78

AVERTISSEMENT

Les données scientifiques publiées dans la revue **REINNOVA** sont sous la responsabilité de leurs auteurs respectifs, et la revue n'est pas responsable des atteintes aux droits d'auteurs et copy-rights

La responsabilité de **REINNOVA** ne saurait en aucune manière être engagée pour tout préjudice et/ou tout dommage aux personnes ou aux biens résultant de toute assertion réelle ou diffamatoire, contrefaçon relative à des droits de propriété intellectuelle ou à des droits privés.

WARNING

The scientific data published in the journal REINNOVA are the responsibility of their respective authors, and the journal is not responsible for copyright infringement.

REINNOVA's liability shall in no way be held liable for any damage and / or damage to persons or property resulting from any actual or defamatory assertion, infringement of intellectual property rights or private rights,

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation
Sommaire

Editorial.....	3
Recommandations Aux Auteurs	4
Avertissement	5
Sommaire	6
Thermosolutal bifurcation phenomena in a rectangular enclosure filled with non –Newtonian fluids	9
K. BIHICHE, M. LAMSAADI, M. NAÏMI, H.ELHARFI, M. KADDIRI, A. LOUARAYCHI	
Contrôle des matériaux cimentaires par résonance ultrasonore.....	15
H. BITA, N. TAIFI, A. MALAOUI, K. TAIFI, B. FAIZ, A. MOUDDEN	
Caractérisation de la décongélation accidentelle de la viande par les ultrasons.....	21
N. Taifi , Abdellah Benhssain, K. Taifi, A. Malaoui, A. Moudden, B. Faiz, H. Bita	
Commande Directe du Couple appliquée au Moteur Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile destiné à la Propulsion Navale	27
M. Hasoun, A. El Afia, K. Chikh, M. Khafallah, K. Benkirane	
Implementation of a Low Cost Software Oscilloscope in Remote Practical Works	34
ABOUHILAL Abdelmoula, MOULAY TAJ Amine, TAIFI Naima, Abdessamad MALAOUI	
Mixed convection heat transfer improvement inside a multiple vented cavity crossed by Al ₂ O ₃ -water nanofluid	39
I. Arroub, A. Bahlaoui, K. Ezzaraa, A. Raji, M. Hasnaoui and M. Naïmi	
Matériaux intelligents par la technologie d'impression 3D: la fabrication intelligente	46
Morade OUHSTI, Benachir EL HADDADI, Soufiane BELHOUIDEG	
Extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire organique à base de (P3HT : PCBM)	51
E. Chahid, N. Hamid, D. Agliz, M. Feddaoui, A. Komina, A. Malaoui	
HEAT TRANSFER OF NON-LINEAR VISCOELASTIC FLUID IN SQUARE CAVITY HEATED FROM VERICAL WALLS	61
H.DAGHAB, M. NAÏMI, M.KADDIRI , M. LAMSAADI , H.ELHARFI , S. RAGHAY	
Strategic analytics as a roadmap for decision-making support in the smart enterprise	66
Jabir Brahim, Nouredine Falih, Khalid Rahmani	
Vibrational study by IR and Raman of ZnNH ₄ P ₃ O ₉	72
El Mehdi Majdi, Youssef Naimi, Mohammed Moutaabbid et Said Belaaouad	

Volume II N° 6

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

L'efficacité des Techniques de Transmissions des Données A Très Haut Débits pour la 5G.....	75
Maryem BOUDAA, Youness MEHDAOUI, Zakia LAKHLAI	
Caractérisation d'un milieu poreux par une nouvelle méthode d'analyse harmonique.....	81
A. Oukhlef, A. Ambari, S. Champmartin, A. Despeyroux	
Greenhouse Temperature and Humidity Estimator Design Based on Least Square SVM.....	89
M. Outanoute, A. Selmani, M. Amini Alaoui, M. Guerbaoui, A. Ed-dahhak, A. Lachhab, B. Bouchikhi	
Commande MPPT utilisant un contrôleur PI-Flou appliqué à un système photovoltaïque autonome.....	96
F.E. Tahiri, K. Chikh et M. Khafallah	
Segmentation par Croissance de Région : Application à la Maladie d'Alzheimer.....	102
K. TAIFI, N. TAIFI, S. SAFI, A. MALAOUI, H. BITA	
New metallic PCMs for thermal energy storage in concentrated solar power (CSP).....	109
Yassine El karim, Abdessamad Faik, Yaroslav Grosu and Rachid Lbibb	
Etude vibrationnelle du monocristal $(C_6H_{15}N_4O_2)H_2PO_4.H_2O$	115
Soufiane Zerraf, Aziz Kheïreddine, Malika Tridane and Said Belaouad	
Amélioration des performances de la commande vectorielle du moteur synchrone à aimants permanents alimenté par un onduleur de tension à MLI.....	121
H. SAHMOUDA, K. CHIKH, A. MALAOUI	



INNOVATIONS ET SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Thermosolutal bifurcation phenomena in a rectangular enclosure filled with non-Newtonian fluids

K. BIHICHE, M. LAMSAADI, M. NAÏMI, H.ELHARFI, M. KADDIRI, A. LOUARAYCHI

Sultan Moulay Slimane University, Faculty of Sciences and Technologies, Physics Department, Laboratory of Flows and Transfers Modelling (LAMET), B.P.523, Beni-Mellal 23000, Morocco

khadija.bihiche@gmail.com

Abstract- *This paper reports an analytical and numerical study of double-diffusive natural convection in a non-Newtonian power-law fluid contained in a horizontal rectangular enclosure submitted to uniform heat and mass fluxes along its short vertical sides, while the horizontal ones are insulated and impermeable. An analytical model, based on the parallel flow approximation, is proposed for the case of a shallow layer ($A \gg 1$). The particular case where the thermal buoyancy forces are dominating the flow ($N = -0.98$) is considered. For this situation the two saddle-nodes bifurcation are predicted. The study is completed by a numerical solution of the full governing equations.*

Keywords : *double-diffusive natural convection, finite volume method, bifurcation phenomena, non-Newtonian fluids.*

II. INTRODUCTION

The study of double diffusive natural convection simultaneously driven by temperature and concentration gradients in a fluid-saturated rectangular cavity has received considerable attention in recent years due to its wide variety of applications in science and technology such as in solar energy collection, nuclear reactor insulation, the cooling of electronic devices, drying technologies, energy storage and chemical vapor deposition processes used for the manufacture of semiconductor devices, etc.

A brief review of some important studies related to double-diffusive natural convection in an enclosure is outlined below. The effect of variable density on thermosolutal natural convection in a binary mixture of ideal gasses contained in a vertical enclosure was numerically

investigated by Sun et al. [1]. The results showed that the effects of non-Boussinesq were more significant in the opposing flow than in the aiding flow where both solutal and thermal forces are equal in intensity. Steady conjugate double-diffusive natural convective heat and mass transfer in a two-dimensional variable porosity layer sandwiched between two walls has been studied numerically by Al-Farhany and Turan [2]. Bera et al. [3] have presented a numerical study to understand the influence of local thermal non-equilibrium (LTNE) state on double-diffusive natural convection in a square cavity filled with fluid-saturated porous medium. The results indicate that the impact of LTNE state on the heat transfer rate and thermal distribution is significant but it is negligible on the mass transfer rate and solute distribution. Harzallah et al. [4] have numerically studied the effects of finite thickness conducting walls as well as the mechanical anisotropy on the unsteady double-diffusive natural convection taking place in a porous material sandwiched between two-vertical finite thickness walls maintained at constant but different temperatures. The two-vertical left and right interfaces wall-porous material are, respectively, kept at constant high and low concentration values. The remaining two-horizontal walls are assumed to be impermeable to mass transfer and thermally insulated. Steady heat and mass transfer by natural convection flow of a heat generating fluid inside a rectangular enclosure in the presence of a transverse

magnetic field was studied numerically by M. Teamah [5]. It has been reported that the heat and mass transfer mechanisms and the flow characteristics inside the enclosure depended strongly on the strength of the magnetic field and heat generation or absorption effects. The magnetic field was found to reduce the heat transfer and fluid circulation within the enclosure. Later, Teamah et al. [6] analyzed the double-diffusive natural convective flow in an inclined rectangular cavity in the presence of magnetic field and heat source. They found that the inclination angle had a considerable influence on heat and mass transfer rate so that the maximum average Nusselt and Sherwood numbers were obtained at two inclination angles, $\gamma = 45^\circ$ and 135° .

Makayssi et al. [7] performed both analytical and numerical analyses of double-diffusive natural convection in a non-Newtonian power-law fluid contained in a horizontal rectangular enclosure. The authors examined the influence of different parameters (aspect ratio, Lewis number, Buoyancy ratio number, power-law behavior index, Prandtl number, thermal Rayleigh number) on the fluid flow and heat and mass transfer characteristics. Natural convection through porous cavity filled with a non-Newtonian binary fluid was studied by Ben khelifa et al [8], Criteria, for supercritical and subcritical onset of motions, are predicted. Oueslati et al. [9] have numerically investigated double-diffusive natural convection with entropy generation in an enclosure partially heated and salted from the left vertical sidewall. They concentrated their study on influences of the major parameters (Rayleigh number, buoyancy ratio, source length, Lewis number and source location) on the rate of heat and mass transfer in the rectangular cavity with an aspect ratio ($Ar = 4$).

The aim of the present investigation is to study the bifurcation character on natural double-diffusive convection problem inside a two-dimensional horizontal rectangular enclosure filled with a non-Newtonian fluid.

III. MATHEMATICAL FORMULATION

The studied configuration, sketched in Fig. 1, is a rectangular enclosure of height H' and length L' with the long horizontal rigid walls insulated and impermeable and the short vertical ones submitted to constant heat and mass densities of fluxes, q' and j' , respectively. In the formulation of the present problem, the following assumptions are made: The fluid is incompressible, the flow of a non-Newtonian fluid through the cavity is governed by the power law, The viscous dissipation is negligible. the flow is laminar, The third dimension of the cavity is such that the problem can be considered as two-dimensional, the Soret and Dufour effect are negligible, the properties of the fluid and the porous medium are constants and Boussinesq approximations are valid.

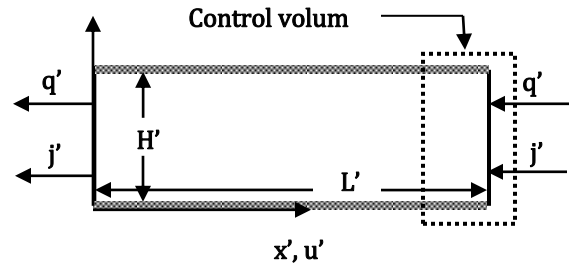


Fig. 1: Schematic diagram of the problem and coordinate system

The dimensionless governing equations describing conservation of mass, momentum, and energy, written in terms of velocity components, pressure, temperature and concentration are given as:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + Pr \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Ra_T \text{Pr}(T + NS) \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{1}{Le} \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

The dimensionless boundary conditions, for the physical system considered here, are

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial S}{\partial y} = 0 \quad \text{for } y = 0 \text{ and } 1 \quad (6)$$

$$u = v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x} = 1 \quad \text{for } x = 0 \text{ and } A \quad (7)$$

The above equations let appears some dimensionless parameters that govern the problem, namely, the aspect ratio of the enclosure, A , the Lewis number, Le , the buoyancy ratio, N , the generalized Prandtl, Pr , and thermal Rayleigh, Ra_T , numbers, whose expressions are

$$A = \frac{L'}{H'}, \quad Le = \frac{\alpha}{D}, \quad N = \frac{\beta_S \Delta S^*}{\beta_T \Delta T^*},$$

$$\text{Pr} = \frac{(k/\rho)H'^{2-2n}}{\alpha^{2-n}} \quad \text{and} \quad Ra_T = \frac{g\beta H'^{2n+2} q'}{(k/\rho)\alpha^n \lambda} \quad (8)$$

IV. NUMERICS

Equations (1) - (5) associated with Equations (6)-(7) have been solved by using a finite volume method and SIMPLER algorithm in a staggered uniform grid system [10]. The convergence has been considered as reached when $\sum_{i,j} |f_{i,j}^{k+1} - f_{i,j}^k| < 10^{-5} \sum_{i,j} |f_{i,j}^{k+1}|$, where stands for the value of u, v, p, T or S at the k^{th} iteration level and grid location (i, j) in the plane (x, y) .

The mesh size has been chosen so that a best compromise between running time and accuracy of the results may be found. The procedure has been based on grid refinement until the numerical results agree, within reasonable accuracy, with the analytical ones, obtained from the parallel flow approach developed in the next section. Numerical tests have been performed to determine the minimum aspect ratio above which the flow can be assumed to be parallel. In the range of the parameters considered in this investigation it was found that the numerical results can be considered independent of the aspect ratio when $A \geq 24$. For this reason most of the numerical results reported here were obtained for $A = 24$ with typically 380×80 mesh points. Typical numerical results are presented in figures 3(a)-(b), on the graphs streamlines, isotherms and isoconcentrates are presented from top to bottom. The results clearly illustrate the fact that for a shallow cavity $A \geq 24$ the flow in the core region of the enclosure is essentially parallel while the temperature and concentration in the core are linearly stratified in the horizontal direction. The analytical solution, developed in the following section, will rely on these observations.

V. ANALYTICAL SOLUTION

The results presented in Fig. 3(a)-(b), allow the following appropriate simplifications:

$$u(x, y) = u(y), \quad v(x, y) = 0$$

$$T(x, y) = C_T(x - A/2) + \theta_T(y), \quad (9)$$

$$\text{and } S(x, y) = C_S(x - A/2) + \theta_S(y)$$

where C_T and C_S are unknown constant temperature and concentration gradients in the x -direction. Using the above approximations, Eqs. (1)–(5) reduce to the following systems of equations

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[\left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|^{n-1} \frac{\partial u}{\partial y} \right] = \frac{d^2}{dy^2} \left(\left| \frac{d^2 \psi}{dy^2} \right|^{n-1} \frac{d^2 \psi}{dy^2} \right)$$

$$= (C_T + NC_S) Ra_T$$

(10)

$$C_T u = \frac{\partial^2 \theta_T}{\partial y^2} \quad \text{and} \quad Le C_S u = \frac{\partial^2 \theta_S}{\partial y^2}$$

(11)

With

$$\int_0^1 u(y) dy = 0 \quad (12)$$

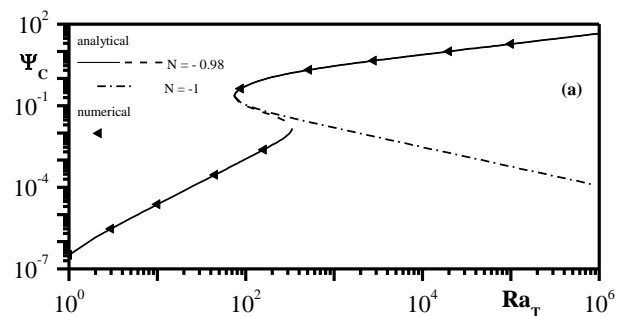
$$\int_0^1 \theta_T(y) dy = 0, \quad \int_0^1 \theta_S(y) dy = 0 \quad (13)$$

as return flow, mean temperature and concentration conditions, respectively. The integration of Eqs. (10) and (11), coupled with the conditions (12) and (13), leads to analytical expressions of velocity, temperature and concentration. However, such an operation is difficult to carry out owing to the particular nature of the governing equations and requires, therefore, a special numerical treatment [11].

VI. RESULTS AND DISCUSSION

The fact of imposing uniform heat and mass fluxes, as boundary conditions, leads to flow characteristics independent on the aspect ratio, A , when this parameter is large enough. The approximate solution, developed in the preceding section, on the basis of the parallel flow assumption, is thus valid asymptotically in the limit of a shallow cavity ($A \gg 1$). The analytical solution, displayed by a solid line, is seen to be in excellent agreement with the numerical solution of the full governing equations, depicted by black dots.

In Fig. 2 the stream function amplitude ψ_C is plotted as a function of Ra_T for $Le = 10$, $N = -0.98$ and -1 and various value of n . As expected, the results indicate that the convective flow increases monotonously with Ra_T . For low values of Ra_T it is observed that for the case $N = -0.98$ convection is weak and can be seen as a degeneracy of the conductive solution obtained for $N = -1$. This type of flow is maintained up to a critical Rayleigh number ($Ra_T = 73.994$ for $n = 0.6$, $Ra_T = 120.233$ for $n = 1$ and $Ra_T = 160.110$ for $n = 1.4$) where a first saddle-node bifurcation occurs. This intermediate branch (shown as a dotted line) is connected to another saddle-node bifurcation occurring at a critical Rayleigh number ($Ra_T = 333.753$ for $n = 0.6$, $Ra_T = 218.587$ for $n = 1$ and $Ra_T = 168.110$ for $n = 1.4$). Then, upon increasing the Rayleigh number the results obtained for $N = -0.98$ and -1 are approximately the same. In the region between $73.994 \leq Ra_T \leq 333.753$ for $n = 0.6$, $120.233 \leq Ra_T \leq 218.587$ for $n = 1$ and $160.110 \leq Ra_T \leq 168.110$ three solutions are possible for a given Rayleigh number.



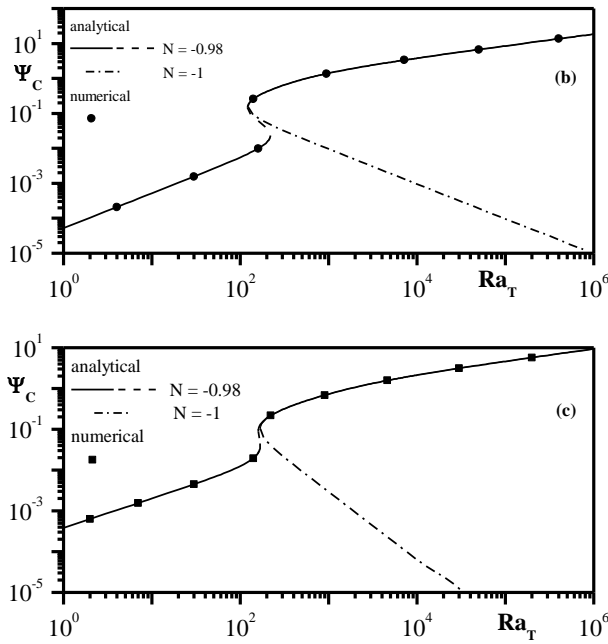


Fig. 2: Bifurcation diagram for $Le = 10$, $N = -1$ and $N = -0.98$ and various value of n ((a) $n=0.6$, (b) $n=1.0$, (c) $n=1.4$)

It is also observed from this figures that the fluid flow seem to be rather sensitive to the flow behavior index, n . Thus, compared to Newtonian case ($n = 1$), the shear-thinning behavior ($0 < n < 1$) enhances the fluid circulation while the shear-thickening one ($n > 1$) produces an opposite effect. Recently, analogous observations were reported by Lamsaadi et al. [11] in their numerical and analytical investigations related to pure thermal convection in the same geometrical configuration.

The existence of multiple solutions in these ranges was demonstrated numerically for the case $Ra_T = 165$, $Le = 10$ and $N = -0.98$. Fig. 3(a) shows the results obtained by using the convective flow as initial conditions for the numerical code. The resulting flow in the core of the layer is observed to be parallel while the temperature and concentration are linearly stratified in the horizontal direction. Starting the numerical solution with the rest state and uniform temperature and concentration yields the results

depicted in Fig. 3(b). The strength of flow circulation is found to be considerably weaker as indicated by the temperature and concentration fields which are now almost purely diffusive. The excellent agreement between the analytical and the numerical solutions is noticed.

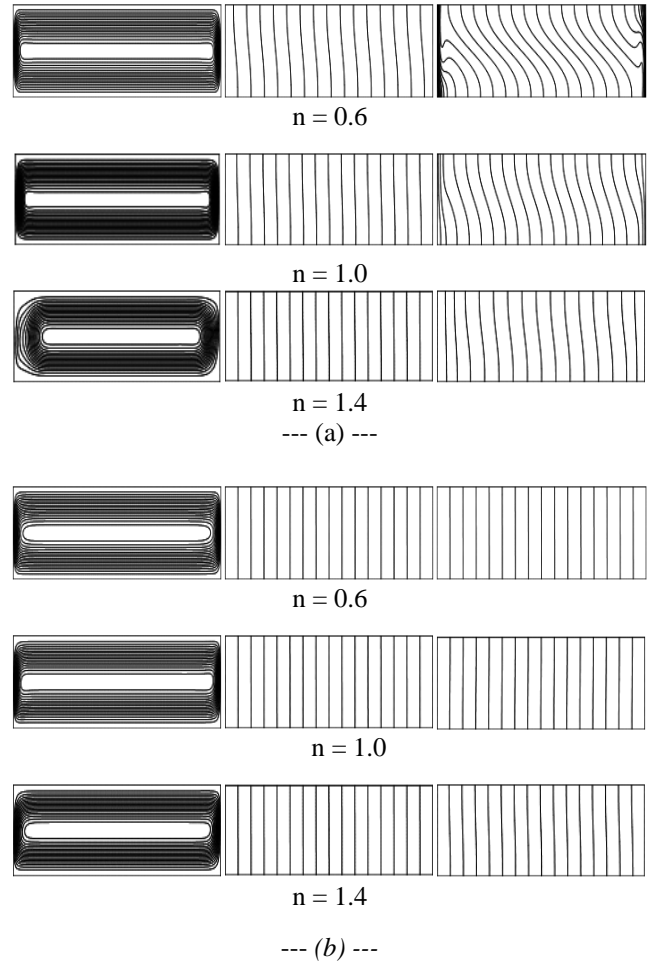


Fig. 3: Streamlines (left), isotherms (middle) and isoconcentrationss (right) for $Ra_T = 10^3$, $Le = 10$, $N = -0.98$ and various values of n

VII. CONCLUSION

The present paper is devoted to numerical and analytical experiments on natural double-diffusive convection in a two-dimensional horizontal shallow enclosure ($A \gg 1$), filled with non-Newtonian power-law fluids, in the case where both short vertical sides are submitted to

uniform heat and mass fluxes (Neumann type condition) while the horizontal boundaries are insulated and impermeable. The summary of the major results is:

(1) An analytical solution, based on the parallel flow approximation, has been derived for the case of an infinite layer ($A = 24$). Solving analytically the full set of governing equations is by far a much easier task than numerical simulations.

(2) For $N = -0,98$, the thermal buoyancy forces are clearly dominating the flow, for this situation two saddle-nodes bifurcation occurs at two different critical Rayleigh numbers. The existence of multiple solutions, for a given set of the governing parameters, in the regions between the first and second saddle-node bifurcation, is demonstrated both analytically and numerically.

References

- [1] H. Sun, G. Lauriat, D.L. Sun, W.Q. Tao. Transient double-diffusive convection in an enclosure with large density variations. 2010. 53. p. 615–625.
- [2] K. Al-Farhany, A. Turan. Non-Darcy effects on conjugate double-diffusive natural convection in a variable porous layer sandwiched by finite thickness walls. 2011. 54. p. 2868–2879.
- [3] P. Bera, S. Pippal, A.K. Sharma. A thermal non-equilibrium approach on double-diffusive natural convection in a square porous-medium cavity. 2014. 78. p. 1080–1094.
- [4] H.S. Harzallah, A. Jbara, K. Slimi. Double-diffusive natural convection in anisotropic porous medium bounded by finite thickness walls: validity of local thermal equilibrium assumption. 2014. 103.p. 207–231.
- [5] M.A. Teamah. Numerical simulation of double diffusive natural convection in rectangular enclosure in the presences of magnetic field and heat source. 2008. 47. p. 237–248.
- [6] M.A. Teamah, A.F. Elsafty, M.Z. Elfeky, E.Z. El-Gazzar. Numerical simulation of double-diffusive natural convective flow in an inclined rectangular enclosure in the presence of magnetic field and heat source, part A: effect of Rayleigh number and inclination angle. 2011. 50. p. 269–282.
- [7] T. Makayssi, M. Lamsaadi, M. Naïmi, M. Hasnaoui, A. Raji, A. Bahlaoui. Natural double-diffusive convection in a shallow horizontal rectangular cavity uniformly heated and salted from the side and filled with non-Newtonian power-law fluids: The cooperating case. 2008. 49. p. 2016–2025.
- [8] N. Ben Khelifa, Z. Alloui, H. Beji, P. Vasseur. Natural convection in a horizontal porous cavity filled with a non-Newtonian binary fluid of power-law type. 2012. 169–170. p. 15-25.
- [9] F. Oueslati, B. Ben-Beya, T. Lili. Double-diffusive natural convection and entropy generation in an enclosure of aspect ratio 4 with partial vertical heating and salting sources. 2012. 52. p. 605–625.
- [10] S. Patankar. Num. Heat Transfer and Fluid Flow. Hemisphere. New York. 1980.
- [11] M. Lamsaadi, M. Naïmi, M. Hasnaoui. Natural convection heat transfer in shallow horizontal rectangular enclosures uniformly heated from the side and filled with non-Newtonian power law fluids. 2006. 47. p. 2535–2551.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Contrôle des matériaux cimentaires par résonance ultrasonore

H. BITA¹, N. TAIFI², A. MALAOU², K. TAIFI³, B. FAIZ¹, A. MOUDDEN¹

¹Laboratoire MTI, Faculté des Sciences, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc

²Laboratoire EREIM, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

³Laboratoire TIAD, Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

Hassan.bita51@gmail.com

Résumé- Nous présentons une application de la résonance ultrasonore, pour la caractérisation, le contrôle et le suivi en continu des propriétés des matériaux cimentaires. La méthode est non destructive, basée sur la mesure de la vitesse des ondes ultrasonores à des fréquences précises à partir du tracé du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence. Les résultats expérimentaux montrent une forte corrélation entre la vitesse ultrasonore des ondes de compressions mesurée à partir des fréquences de résonance et celle mesurée par inter corrélation.

Mots-clés- Caractérisation non destructive, Ultrasons, Matériaux cimentaires, Résonance, Coefficient de réflexion, Vitesse ultrasonore

I. INTRODUCTION

La résonance ultrasonore est une technique non destructive initialement développée pour l'évaluation des constantes élastiques des solides. Les objets solides ont de nombreuses résonances ou des modes de vibration à des fréquences de pointe qui dépendent des propriétés mécaniques de l'objet et de sa géométrie. Suivant le modèle utilisé, nous pouvons inverser les données mesurées pour aboutir aux propriétés élastiques de l'échantillon contrôlé. Les techniques de contrôle non destructif peuvent être appliquées au laboratoire et in-situ pour assurer un contrôle de qualité sans endommager le matériau. Ces méthodes permettent d'évaluer l'état interne du matériau, de prendre plusieurs mesures du même échantillon et à un même emplacement et fournissent ainsi des informations plus précises [1]. Différentes méthodes non destructives sont

utilisées en génie civil [2.3.4]. Les méthodes basées sur la propagation d'ondes mécaniques sont les plus répandues [5.6]. Ces méthodes sont utilisées pour suivre l'évolution du comportement des matériaux cimentaires à très jeune âge [1].

La formation d'une structure interne d'un matériau à base de ciment est un processus très complexe. Immédiatement après le mélange des principaux constituants (ciment, eau, granulats). Des changements importants commencent déjà dans le matériau. Quelques heures après le mélange, en fonction de la composition du matériau et des conditions de durcissement, le mélange se transforme d'une suspension liquide visqueuse en une matrice solide, en suivant un processus de plusieurs étapes. Ce mécanisme est appelé hydratation, il est dû aux réactions chimiques qui ont lieu à la surface des particules de ciment. Au cours de son évolution des produits d'hydratation sont libérés et une structure est formée. Cette structure représente le squelette du produit cimentaire, elle est responsable de sa résistance intrinsèque et de sa durabilité.

Dans ce travail, nous proposons de développer une méthode expérimentale non destructive capable de suivre la transition d'un matériau cimentaire de l'état visqueux à l'état solide. La méthode est basée sur l'analyse de l'évolution des ondes ultrasonores réfléchies par le matériau cimentaire au cours de son hydratation, en exploitant les propriétés remarquables de la

résonance de l'onde dans l'épaisseur du matériau. Pour cela nous avons choisi de suivre la grandeur complexe du coefficient de réflexion plutôt que son module, qui est moins riche en informations. Notre objectif est d'étudier les corrélations entre les propriétés mécaniques du matériau et les paramètres de propagation de l'onde ultrasonore qui s'y propage, en utilisant un code de calcul élaboré sous LabVIEW. Le travail, est la suite des résultats obtenus [7. 8. 9. 10], après une série de mesure par ultrasons sur les matériaux cimentaires.

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental, décrit en détail dans [7] est constitué d'un récipient à faces parallèles. Sa face avant en plexiglas d'épaisseur 2cm, et sa face arrière en verre d'épaisseur 3mm. Le dispositif permet de réaliser une couche de matériau cimentaire à face parallèles d'épaisseur 1,5cm. Les matériaux étudiés sont issus d'un mélange du ciment CPJ 45, Le sable d'Oued Sous et l'eau potable d'Agadir. Le mortier a été fabriqué en utilisant des rapports massiques ; ciment/sable $m_c/m_s=0,5$ et eau/ciment $m_e/m_c=0,65$ (proportions généralement utilisées par les fabricants) et la pâte de ciment sans sable avec un rapport massique eau/ciment $m_e/m_c=0,42$. Les mesures ultrasonores des ondes de compressions ont été réalisées en utilisant un seul transducteur, qui joue le rôle d'émetteur et de récepteur, sa fréquence centrale est de 500KHz. L'enregistrement des signaux réfléchis se fait toutes les 15 minutes pendant trois jours. La température est fixée à 25°C.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III.1. RESONANCE DU COEFFICIENT DE REFLEXION

La figures 1, représente un exemple de signal réfléchi par les différentes interfaces de la structure plexiglas/matériau cimentaire/verre. Le signal est composé principalement de trois échos

$S_{r1}(t)$, $S_{r2}(t)$ et $S_{r3}(t)$, qui sont réfléchis respectivement sur les interfaces eau/plexiglas, plexiglas/échantillon et échantillon /verre.

La partie du signal qui est à l'origine de l'évolution des coefficients de réflexion expérimental est :

$$S_{r2}(t)^* = S_{r2}(t) + S_{r3}(t) \quad (1)$$

La transformée de Fourier permet de déduire le coefficient de réflexion R, en utilisant le rapport de spectres des signaux $S_{r2}(t)^*$ et $S_{r2}(t)$ comme suit :

$$R = R_{pm} \times \frac{S_{r2}^*(f)}{S_{r2}(f)} \quad (2)$$

Où R_{pm} est le coefficient de réflexion de l'interface plexiglas /matériau

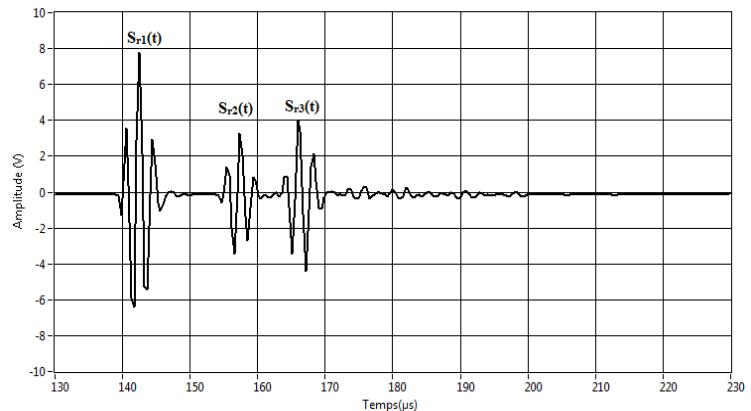


Fig.1 Exemple de signal réfléchi par les différentes interfaces de la structure

Le tracé du coefficient de réflexion expérimental de la couche de mortier à des instants différents de son durcissement est porté sur la figure 2. Sur la figure, nous observons le déplacement vers le haut des fréquences de résonance avec le temps. Durant ce travail, nous avons choisie de suivre le durcissement par la mesure de la fréquence de résonance

correspondante à l'ordre $n=5$, qui est toujours détectable dans la bande passante du transducteur émetteur de l'onde ultrasonore.

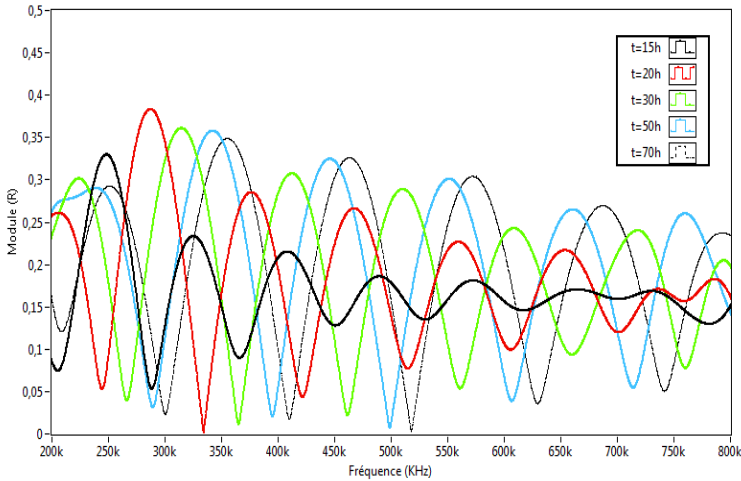


Fig.2 Evolution du module du coefficient de réflexion en fonction de la fréquence et du temps

III.2. FREQUENCE DE RESONANCE

Les résultats de suivi de l'hydratation du mortier et de la pâte de ciment sans sable, par mesure des fréquences de résonance, sont portés sur la figure 3. L'analyse de la figure montre que les deux courbes présentent un comportement semblable et que la fréquence de résonance évolue rapidement au début de l'hydratation. Ce résultat démontre que l'hydratation du mortier dépend de la pâte de ciment et que l'ajout de sable apporte une amélioration des propriétés mécaniques du mortier ce qui explique les valeurs élevées de la fréquence de résonance. Dans les quatre premières heures quand la solution est encore liquide, la progression de ces deux paramètres est très faible, donc une faible variation des propriétés élastique du matériau. Mais à partir de $t=5h$, et pendant 10 heures, la mesure devient difficile voir [7]. Après 20h heures d'hydratation, nous remarquons un changement de pente des deux courbes, ce changement est plus marqué

pour le mortier, indiquant la fin de la phase de prise. Après la fréquence de résonance continue à augmenter dans le temps, mais lentement marquant le début de la phase de durcissement qui peut durer plusieurs jours. Dans cette phase Les propriétés mécaniques du mortier continuent à évoluer dans le temps mais lentement.

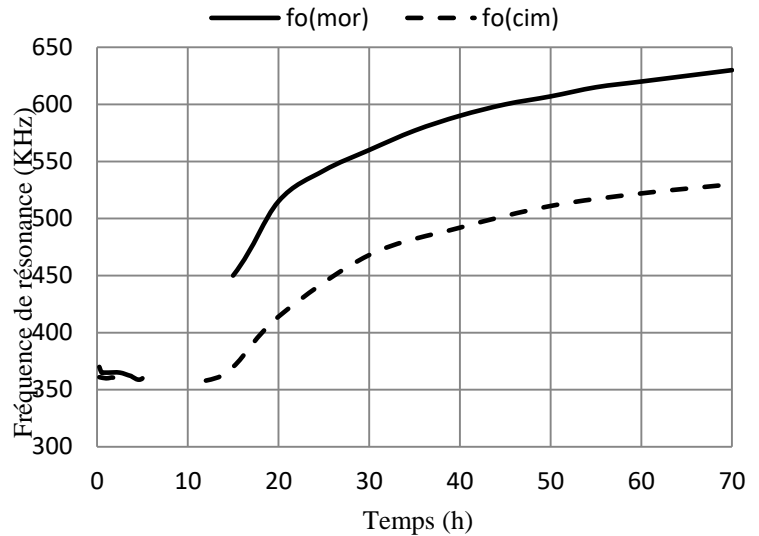


Fig.3 Evolution de la fréquence de résonance du mortier f_0 (mor) et celle de la pâte de ciment f_0 (cim) en fonction du temps

III.3. ESTIMATION DE LA VITESSE ULTRASONORE

III.3.1. A PARTIR DES FREQUENCES DE RESONANCE

L'expression du coefficient de réflexion théorique de la couche de matériau cimentaire voir référence [7], montre que les fréquences de résonances où se situent les minima du coefficient de réflexion sont telles que :

$$f_0 = (2n + 1) \frac{V}{4d} \quad (3)$$

Avec n est l'ordre d'apparition d'un minimum, V la vitesse de l'onde de compression et d l'épaisseur de l'échantillon testé.

En mesurant expérimentalement la fréquence de résonance, nous pouvons déduire la vitesse de l'onde à des fréquences précises.

$$V = \frac{4d}{(2n+1)} f_0 \quad (4)$$

III.3.2. PAR INTER-CORRELATION

La vitesse est le rapport de la distance d parcourue par l'onde sur le temps de propagation t , $V=d/t$. Connaissant l'épaisseur, il est possible de déterminer la vitesse V de propagation de l'onde dans le matériau, en mesurant le décalage temporel entre les échos $S_{r2}(t)$ et $S_{r3}(t)$, elle est exprimée par la relation suivante :

$$v = \frac{2d}{\tau} \quad (5)$$

Avec : d l'épaisseur de l'échantillon et τ Le décalage temporel entre les signaux $S_{r2}(t)$ et $S_{r3}(t)$.

Le temps de vol τ , peut être estimé par inter-corrélation entre le signal $S_{r2}(t)$ choisi comme référence, et le signal $S_{r3}(t)$ traversant le matériau deux fois (en aller-retour) [11.12]. La fonction d'inter-corrélation, que nous avons adopté mesure le degré de similitude, de forme et de position des deux signaux a pour expression[13] :

$$C_{S_{r2}S_{r3}}(t) = TF^{-1}(S_{r2}(f) \times \overline{S_{r3}(f)}) \quad (6)$$

Où :

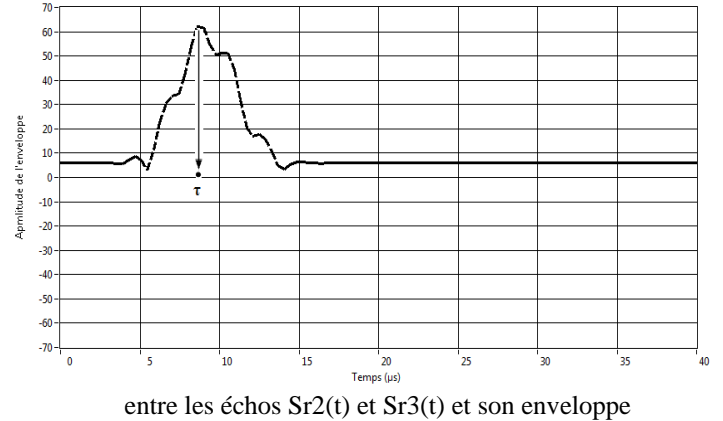
$S_{r2}(f)$: La transformée de Fourier de $S_{r2}(t)$.

$S_{r3}(f)$: La transformée de Fourier de $S_{r3}(t)$.

$\overline{S_{r3}(f)}$ Le complexe conjugué de $S_{r3}(f)$.

La fonction d'inter-corrélation présente un maximum à $t = \tau$, où τ correspond au décalage temporel à appliquer à $S_{r3}(t)$ pour qu'il se superpose exactement à $S_{r2}(t)$ (figures 4 et 5).

Fig.4. Représentation de la fonction d'inter-corrélation



entre les échos $S_{r2}(t)$ et $S_{r3}(t)$ et son enveloppe

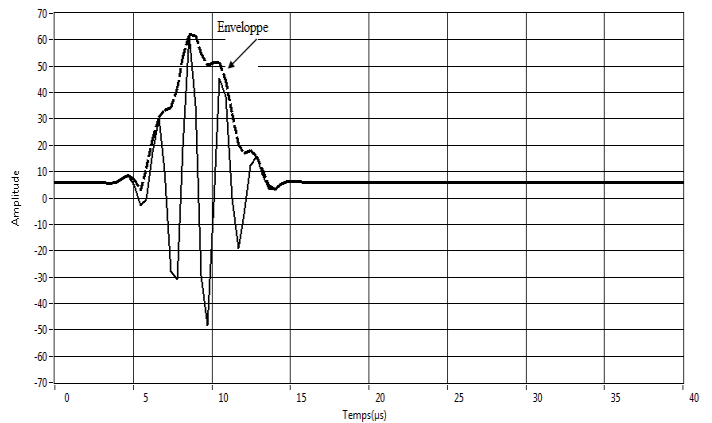


Fig.5. Mesure de décalage temporel τ à partir du maximum de la fonction d'inter-corrélation

Les résultats de mesure de la vitesse en utilisant les deux approches, pour trois modes de résonance et à trois instants différents de l'hydratation du mortier, sont portés sur le tableau 1.

Tableau I

Comparaison entre la vitesse V_i mesurée par inter corrélation et la vitesse V_r mesurée à partir des fréquences de résonance

Temps	Ordre			
	n=3	n=4	n=5	
t = 20h	f_0 (KHz)	334.7	421.8	515.1
	V_i (m/s)	2844	2844	2844
	V_r (m/s)	2868	2812	2809
t = 35h	f_0 (KHz)	375.1	474.12	576
	V_i (m/s)	3200	3200	3200
	V_r (m/s)	3222	3161	3161
t = 70h	f_0 (KHz)	410	517.9	630
	V_i (m/s)	3491	3491	3491
	V_r (m/s)	3514	3452	3436

Nous remarquons que la mesure de la vitesse à partir de la fréquence de résonance est plus précise car elle montre le caractère dispersif du milieu de propagation. Sur la figure 6 nous avons représenté l'évolution de la vitesse en fonction du temps d'hydratation du mortier, en appliquant les deux approches. Nous constatons que les deux courbes sont similaires et que la mesure de la vitesse à partir des fréquences de résonance ne présente pas de fluctuations. La même remarque est observée pour l'hydratation de la pâte de ciment sans sable (figure 7), mais la vitesse dans ce cas est plus faible, indiquant que les propriétés mécaniques ; de point de vue résistance est faible. Nous notons aussi que le comportement de la vitesse avant et après la phase de prise est similaire à celle trouvée par d'autres auteurs [14.15]. Nous pouvons donc déduire le temps de début et de fin de prise du mortier [5h, 20h], en utilisant l'intersection des asymptotes [15.16], ou bien en cherchant des points d'inflexion sur la

courbe (figure 8). Nous pouvons utiliser cette méthode aussi bien pour la vitesse, que pour la fréquence résonance.

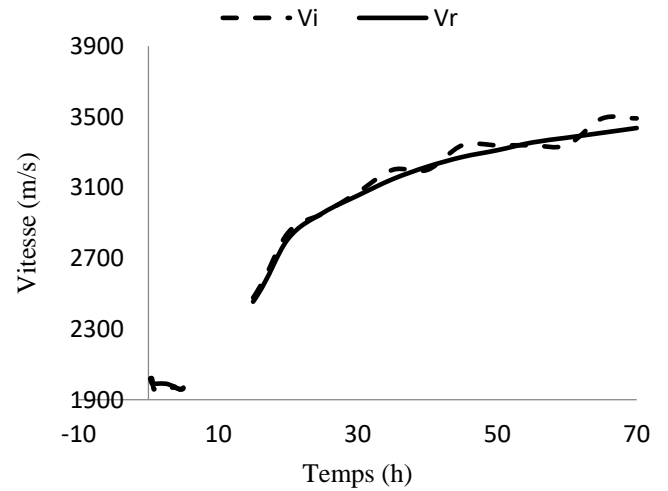


Fig.6. Evolution de la vitesse V_i comparée à la vitesse V_r en fonction du temps d'hydratation du mortier

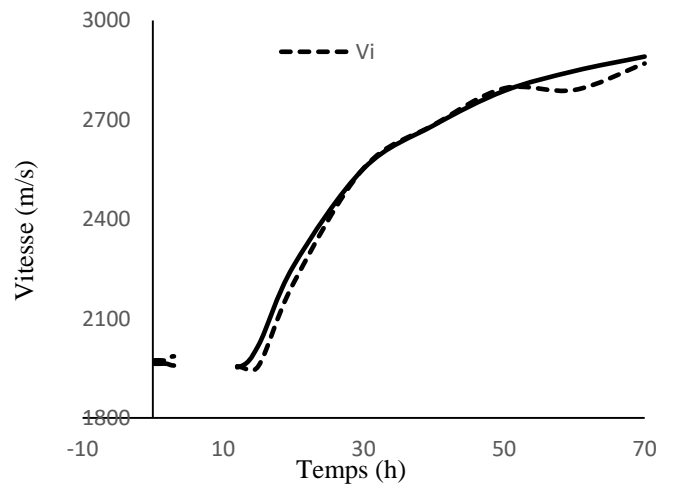


Fig.7. Evolution de la vitesse V_i comparée à la vitesse V_r en fonction du temps d'hydratation de la pâte de ciment

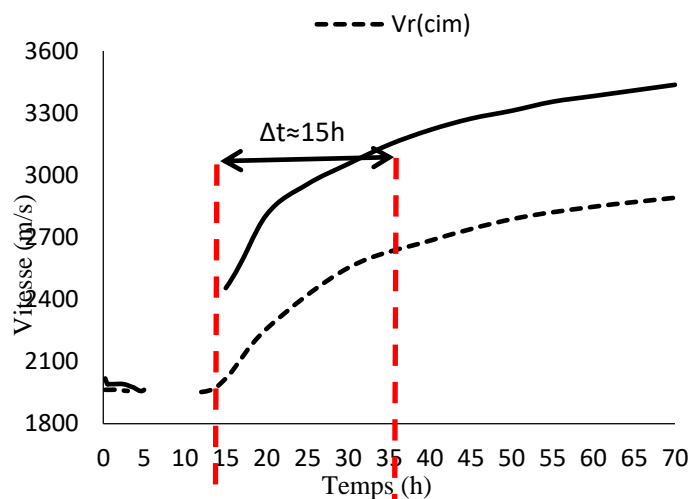


Fig.8. Evolution de la vitesse Vr dans la pâte de ciment comparée à la vitesse Vr dans le mortier en fonction du temps

CONCLUSION

Dans un premier temps, ce travail a été mené pour étudier la relation entre la fréquence de résonance et la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans un matériau à matrice cimentaire. Dans un deuxième temps, la vitesse est mesurée par inter-corrélation des signaux réfléchis par les deux interfaces de la structure cimentaire. Les corrélations entre les vitesses mesurées montrent que la mesure de la vitesse à partir des fréquences de résonance est plus précise. Cette mesure permet de suivre l'évolution des propriétés mécaniques du matériau cimentaire et de localiser en particulier la phase de prise.

Références

[1] Naji, S. La caractérisation des propriétés physiques et mécaniques des matériaux cimentaires à l'aide des ondes de cisaillement. Thèse de doctorat. Sherbrooke (Québec) Canada (2016)

[2] Bungey, J. H., Millard, S. G., & Grantham, M. Testing of concrete in structures (p. 49). New York, NY, USA: Blackie Academic & Professional. (1996)

[3] V.M. Malhotra and N.J. Carino, editors. Handbook on non-destructive testing of concrete. CRC Press LLC. (1991)

[4] D. Breyse and O. Abraham. Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en bétons. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. (2005)

[5] Robeyst, N., Gruyaert, E., Grosse, C. U., & De Belie, N. Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity. Cement and Concrete Research, 38(10), (2008) 1169-1176.

[6] Trtnik, G., Kavčič, F., & Turk, G. Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. Ultrasonics, 49(1), (2009) 53-60.

[7] Hassan Bita, Bouazza Faiz, Ali Moudden, Hicham Lotfi, EL Houssaine Ouacha, Hicham Banouni. Ultrasound monitoring of a mortar hydration using Argand Diagram: The effect of sand grain size and temperature. Construction and Building Materials, vol. 155, (2017) p. 1003-1012.

[8] H Bita, B Faiz, A Moudden, H Lotfi, EL H Ouacha, Ultrasonic nondestructive characterization of mortars by the width of the resonances. Materials Science and Engineering, Vol. 186, No. 1, (2017) p. 012027.

[9] Hassan Bita, Bouazza Faiz, Ali Moudden, Hicham Lotfi, EL Houssaine Ouacha, Mustapha Boutaib « Evaluation of ultrasonic attenuation in mortars structures using the Argand Diagram ». International Journal of Materials Engineering . Vol.6, No.3, (2016), pp. 77-84

[10] Hassan bita, Ali Moudden, Bouazza Faiz, Hicham Lotfi. " Non Destructive Characterization of Mortars by the Frequency Offset Method" Journal of Civil Engineering Research, Vol. 5 No. 6, (2015), pp. 136-143

[11] PLOIX, Marie-Aude. Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique. Thèse de doctorat. INSA de Lyon (France). (2006)

[12] DUBUGET M., Evaluation Non Destructive des Matériaux par Ultrasons : Caractérisation de l'Etat Initial et Suivi Sous Charge des Propriétés d'Elasticité Linéaire et Non Linéaire d'Alliages d'Aluminium, Thèse de Doctorat. Lyon : INSA Lyon, 194 p. (1996)

[13] MOUCHTACHI A., Evaluation Non Destructive par Ultrasons des Propriétés d'Elasticité des Matériaux Anisotropes : Mesure de Vitesses et Résolution du Problème Inverse, Thèse de Doctorat. Lyon : INSA Lyon, 181 p. (1996)

[14] Lootens, D. Ciments et suspensions concentrées modèles. Écoulement, encombrement et floculation (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI). (2004)

[15] Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., & Bae, D. B. Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, 34(4), (2004), p: 631-640.

[16] Trtnik, G., Turk, G., Kavčič, F., & Bosiljkov, V. B. Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste. Cement and Concrete Research, 38(11), (2008), p: 1336-1342.

Caractérisation de la décongélation accidentelle de la viande par les ultrasons

N. Taifi^{1,2}, Abdellah Benhssain², K. Taifi³, A. Malaoui¹, A. Moudden², B. Faiz², H. Bit²

¹ Laboratoire EREIM, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

² Laboratoire d'Instrumentation et de Mesures, Département de Physique, Université Ibn Zohr
Faculté des Sciences, B.P. 8106, Agadir-Maroc

³ Laboratoire TIAD, Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc
Email :taifinaïma@yahoo.fr

Résumé- Ce travail présente une technique de mesure par ultrasons permettant de suivre, en temps réel, le processus de décongélation de deux types de viande: le mouton et la dinde. Cette technique est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par la viande congelée lors de sa décongélation. Le suivi est effectué à partir du tracé de l'évolution temporelle du signal rétrodiffusé qui montre l'aspect et la position des échos, l'amplitude crête-crête et les spectres fréquentiels nous ont permis de détecter si la viande congelée a subi une décongélation accidentelle ou non .

Mots-clés ultrasons, viande congelé, décongélation, spectre fréquentiel, amplitude crête à crête

I. INTRODUCTION

L'industrie agroalimentaire connaît une importante évolution. Elle est devenue par ce fait, très compétitive. L'implantation des outils de contrôle de qualité devient alors, une exigence du marché. Le froid dans cette industrie devient un moyen incontournable à tous les niveaux de la chaîne de production et de commercialisation des produits alimentaires. Il permet de préserver la qualité hygiénique des produits en ralentissant les réactions d'altération qui peuvent être dues à des facteurs endogènes ou exogènes [1,2]. Les produits congelés et surgelés sont devenus courants. Ils présentent de nombreux avantages à condition de savoir les utiliser et de les contrôler correctement [3]. La connaissance du phénomène de la décongélation et de son mécanisme permettra de prendre les mesures pour tirer le meilleur profit de ce type du processus.

La congélation est la transformation de la teneur de l'eau dans les aliments de nourriture en

cristaux de glace. Ce phénomène se fait afin d'inactiver les enzymes et les levures qui pourraient continuer à détériorer la nourriture. Au cours de la décongélation, il y a une perte de liquide contenant des vitamines solubles et des sels minéraux ce qui oblige à bien maîtriser le processus de décongélation.

Dans le cadre de cette étude, nous nous proposons d'utiliser la technique ultrasonore pour caractériser la cinétique de la décongélation de la viande et de contrôler l'effet de la récongélation. En effet la décongélation et la récongélation des viandes peut provoquer des intoxications alimentaires dues à une bactérie : Clostridium perfringens (deuxième cause d'intoxication alimentaire).

Les ultrasons aux basses fréquences peuvent être employés pour fournir des informations sur les sujets des propriétés physico-chimiques de plusieurs nourritures [3-10].

Ils ont des avantages par rapport à beaucoup de techniques analytiques traditionnelles, parce que les mesures sont rapides [3-4]. Dans ce travail nous nous intéresserons à l'évolution des signaux rétrodiffusés par la viande lors de sa décongélation. L'objectif est d'en déduire le temps optimum de la décongélation et de caractériser la décongélation accidentelle de la viande à partir l'évolution de l'amplitude crête à crête de l'écho rétrodiffusé par la viande congelé et du spectre fréquentiel du signal rétrodiffusé par

la viande au cours la première et la deuxième décongélation.

II. MATIERES ET METHODES

II.1 Matières

Vu l'extrême diversité des types de viande (différentes qualités, différentes constitutions, selon le type), l'efficacité des expériences et la généralisation des résultats nécessitent des manipulations sur deux types. Nous avons réalisé nos expériences avec deux types de la viande : mouton, dinde.

La viande achetée fraîche puis elle est coupée se forme d'un cube d'épaisseur de 2cm pour être placé sur la cuve de plexiglas puis on le dépose immédiatement dans un congélateur à -20°C pour une durée au minimum de 36 heures.

II.2 Méthode expérimentale

Les expériences sont réalisées avec un transducteur de type Paramétriques à large bande, de fréquences centrales 1 MHz et de diamètre 1cm. Le transducteur est une pastille émettrice piézoélectrique.

Le transducteur est installé sous une plaque de Plexiglas qui joue le rôle d'une ligne à retard. Cette ligne à retard sert à éviter le chevauchement entre le signal émis par le transducteur et le signal rétrodiffusé par la viande. La viande congelée est placée sur la ligne à retard. Les méthodes expérimentales employées mettent en jeu une émission impulsionnelle en incidence normale. Le transducteur fonctionne alternativement en émetteur et en récepteur (Fig. 1). Le signal électrique d'excitation du transducteur émetteur est constitué d'impulsions envoyées, avec une période de répétition réglable, par un générateur d'impulsion Sofranel type 5052 PR ,30 Mhz. La pression rétrodiffusée est captée par le même transducteur. Le signal reçu transite par le même câble que le signal d'émission et arrive sur le connecteur T/R depuis

lequel le signal d'émission a été envoyé. Grâce à une porte et à un système à retard intégré au générateur d'impulsion, le signal reçu est visualisé en reliant par un câble coaxial le connecteur de signal de sortie à une voie d'un oscilloscope numérique type HP 54600 B, 100 Mhz. L'oscilloscope numérique est relié à un micro-ordinateur par un bus GPIB via une carte National Instrument IEEE et a l'aide d'un diagramme qui a été fait avec les instruments virtuelle de l'environnement LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) on a fait l'acquisition de 300 fichiers pendant 2 heures et 30min c'est-à-dire un fichier par 30s qui contient 2000 valeurs (informations) en temps réel du signal rétrodiffusé par la viande.

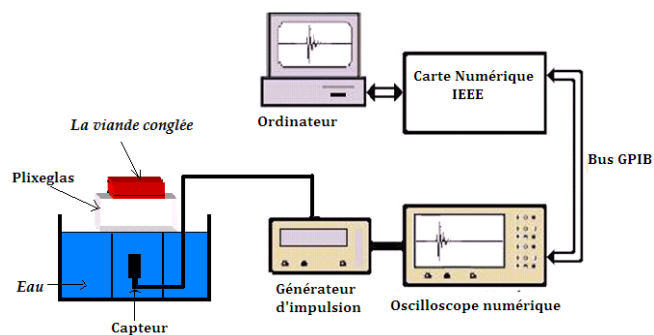


Fig. 1: Système de contrôle de la décongélation de la viande

La Fig. 2 représente un exemple du signal rétrodiffusé par la viande lors de sa décongélation. On note l'écho rétrodiffusé par l'interface Plexiglas A1, A2 représente l'écho rétrodiffusé par l'interface plexiglas/viande décongelée qu'on va suivre au cours de notre étude par ce que c'est l'écho qui est en chevauchement avec l'écho de décongélation. L'écho A3 représente deuxième aller-retour de l'écho A2, L'étude consiste à suivre l'évolution de ces échos au cours de la décongélation.

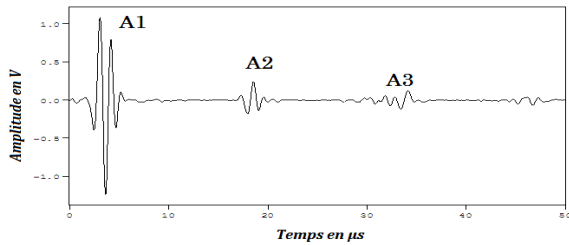


Fig. 2: Type du signal rétrodiffusé par la viande lors de sa décongélation

III. Résultats et discussions

***Evolution de la position des échos du signal rétrodiffusé par la viande lors de sa première et deuxième décongélation :**

La Fig. 3 représente la superposition des signaux qu'on a capté à l'aide de diagramme qui fait par LABview, aux cours de la première décongélation de la viande, cette image nous permettons d'assimiler le phénomène de décongélation, en effet les couleurs (le jaune, le bleu et le vert) au début de l'image représente l'écho A2 qui correspondant à la décongélation de la viande.

A partir de l'observation de l'image on peut dire que l'amplitude de l'écho A2 (le jaune) augmente, comme on va le voir plus loin, pendant 62.5min jusqu'à une valeur (0,25V) puis il reste constant où il apparaîtra un autre écho d'une partie non décongelé au cœur de la viande qui disparaître pendant long temps à la fin de la décongélation, comme on peut imaginer intuitivement, la décongélation s'effectue de l'extérieur vers le cœur de la viande.

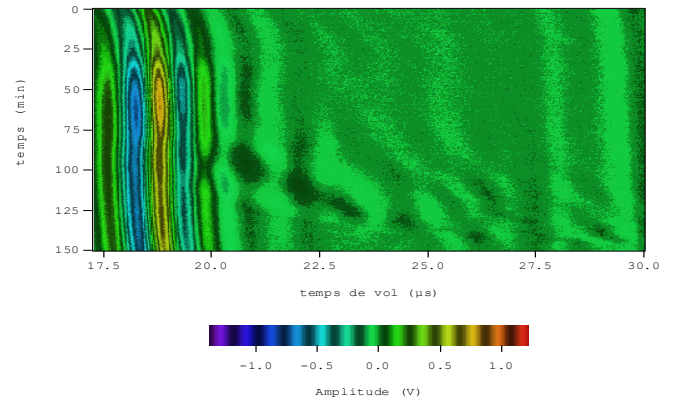


Fig. 3: Superposition des signaux rétrodiffusés lors de la *première décongélation* de la viande (mouton)

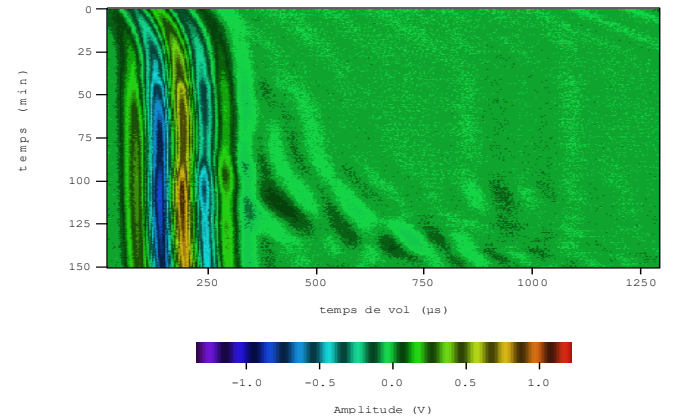


Fig. 4: Superposition des signaux rétrodiffusés lors de la *deuxième décongélation* de la viande (mouton)

***Spectre de la 1ère et la 2ème décongélation de la viande (mouton) :**

Les Fig. 5 et 6 représente la superposition des spectres des signaux qui sont capté au cours de la première et la deuxième décongélation de la viande, a partir de ces images on peut remarquer que l'amplitude est importante (la couleur rouge) autour de la valeur 1Mhz qui correspond à la fréquence centrale de notre transducteur avec lequel on a travaillé, mais leurs distribution et différentes selon le type de décongélation, en effet la distribution de l'amplitude spectrale qui correspondent à les valeurs élevés (la couleurs

rouge) et importante dans l'image de la première décongélation que celle de la deuxième décongélation.

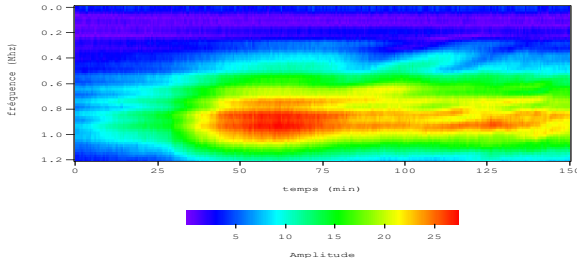


Fig. 5 : spectre de première décongélation de la viande (mouton)

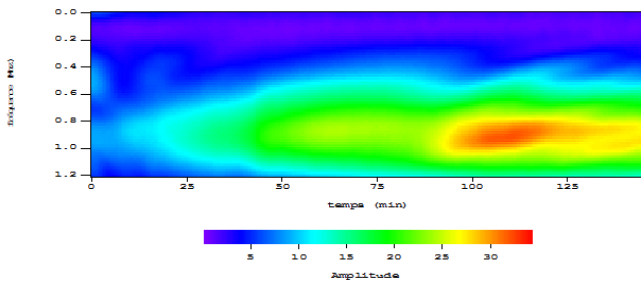


Fig. 6 : spectre de la deuxième décongélation de la viande (mouton)

***L'évolution de l'amplitude crête à crête de l'écho A2 de la 1ère et la 2ème décongélation de la viande (mouton) :**

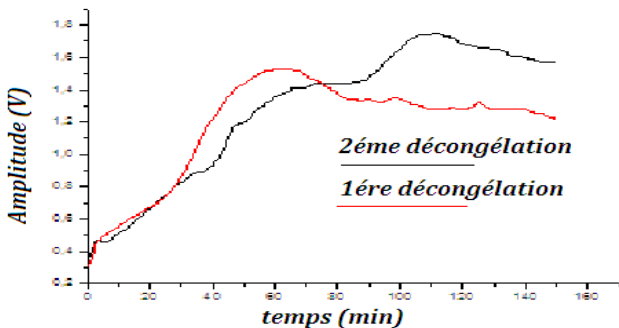


Fig. 7: L'évolution de l'amplitude crête à crête de l'écho A2 au cours la 1ère et la 2ème décongélation de la viande (mouton)

La troisième technique pour contrôler la décongélation est le suivi de l'amplitude crête à crête de l'écho A2. En effet l'amplitude de cet écho dépend de l'état de l'interface entre la viande et la ligne à retard (plexiglas). La viande congelé et décongelé se comporte de façon différente avec la ligne à retard. En plus, au fur et à mesure de la décongélation la viande congelée perd de son eau. Cette eau se positionne entre la viande et la ligne à retard avant de couler au fond de la cuve. La Fig. 7 présente l'évolution de cette amplitude en fonction de la durée de la décongélation lors de la première décongélation de la viande. Si on compare cette évolution avec celle relative à la deuxième décongélation, (Fig. 7), on constate que, dans la première décongélation l'amplitude varie d'une façon plus brutale ,en effet il atteind le maximale (1.5v) pendant 62.5min puis il descende a une valeur 1.25v où laquelle il reste constante a longue temps , par contre dans la seconde décongélation le maximale de l'amplitude atteind 1.75v pendent 112.5min puis il descende a une valeur 1.6v où il reste constante à court temps.

Cette différence de comportement dans les évolutions des amplitudes entre la première et la seconde décongélation peut être un moyen efficace pour contrôler la décongélation accidentelle. La deuxième décongélation est plus rapide que la première.

La différence de ces courbes résulte du changement de la structure de la viande durant la première décongélation car il y a une perte de l'eau congelé.

***Spectre de la 1ère et la 2ème décongélation de la viande (dinde) :**

Les mêmes remarques peuvent être déduites des représentations spectrales des échos pour la dinde (Fig. 8 et 9), donc la différence de la distribution spectrale de l'amplitude ne dépende pas de la structure de la viande mais de nombre de décongélation de la viande, puisque on a la distribution de l'amplitude spectrale de les valeurs élevés (la couleur rouge) est important dans la première décongélation relativement à la deuxième, pour les deux type de viande (dinde et mouton).

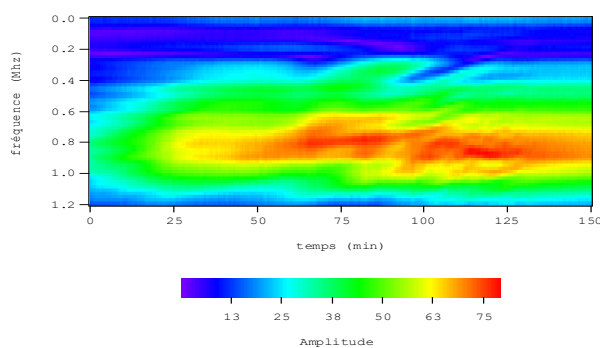


Fig. 8 : spectre de la première décongélation de la viande (dinde)

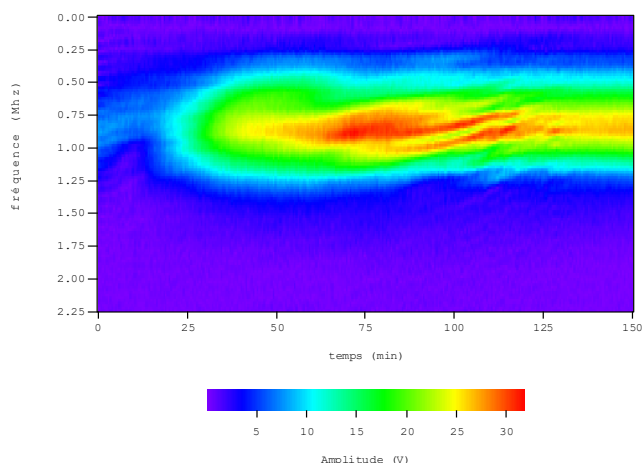


Fig. 9 : spectre de la deuxième décongélation de la viande (dinde)

***L'évolution de l'amplitude crête à crête de l'écho A2 au cours la 1ère et la 2ème décongélation de la viande (dinde) :**

L'évolution de l'amplitude crête à crête de l'écho A2 (Fig. 10) au cours la 1ère et la 2ème décongélation pour un type de viande (dinde) est semblable que celle du mouton. En effet la différence entre les deux on voit que la deuxième partie de la première décongélation (dinde) c.à.d. la phase de la perte de l'eau où on a la décroissance de l'amplitude du signal est très grande que celle de la première décongélation de la viande du mouton et peut ça liée à la différence de la texture de la viande.

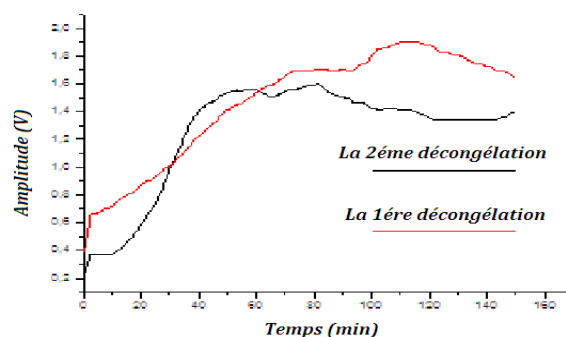


Fig. 10: L'évolution de l'amplitude crête à crête de l'écho A2 au cours la 1ère et la 2ème décongélation de la viande (dinde)

Conclusion

Nous avons présenté dans ce travail une technique de mesure ultrasonore pour suivre, en temps réel, le processus de décongélation de deux types de viande : le mouton et la dinde.

Cette technique est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par la viande congelée. Le suivi est effectué à partir du tracé de l'évolution temporelle du signal rétrodiffusé qui marque l'apparition et la position des échos, de

l'amplitude crête à crête, les spectres fréquentiels qui nous ont permis de suivre la cinétique de la décongélation. Les résultats indiquent un temps et une cinétique de décongélation propre à chacun de ces deux types. Elles montrent également un effet néfaste de la ré-congélation sur la texture de la viande.

Dans ce travail nous avons montré la possibilité du contrôle par ultrasons la décongélation accidentelle. Il serait intéressant dans la suite de cette étude de faire l'analyse biologique de la texture de la viande afin de confirmer les résultats obtenus physiquement.

References

- [1] Dincer, I. . Heat transfert in food cooling applications. Washington, DC : Taylor & Francis. 1997
- [2] Fennema, O. R. Water and ice. In O. R. Fennema (Ed.), Food chemistry (3rd ed.), 1996 , pp. 17-94). New York : Marcel Dekker.
- [3] Keshava prakash M. N., & Ramana K. V. R. Ultrasound and its application in the food industry. J. Food sci. technol., 2003, 40, 563-570.
- [4] McClements, D. J. Advances in the application of ultrasound in food analysis and Processing. Trends Food Sci. Technol., 1995, 6, 293-299.
- [5] McClements, D. J. Ultrasonic NDT of foods and drinks. In International Advances in Nondestructive Testing, ed. McGonnagle, W. J., Vol. 17. Gordon and Breach Science.Yverdon, Switzerland, 1994, pp. 63-95.
- [6] Povey, M. J. W. & McClements, D. J. Ultrasonics in food engineering : part I. Introduction and experimental methods. J. Food Engng, 1988. 8, 217-245.
- [7] Povey, M. J. W. Ultrasonics in food engineering : part II. Applications. J. Food Engng, 1982, 9, 1-20.
- [8] Javanaud, C. Applications of ultrasound to food systems. Ultrasonics, 1988, 26, 117-123.
- [9] Freese, M., & Makow, D. High-frequency ultrasonic properties of fresh water fish tissue. J. Acoust. Soc. Am., 1968, 44, 1282-1289.
- [10] Hafsteinsson, H., Parker, K., Chivers, R., & Rizvi, S. S. H. Application of ultrasonic waves to detect sealworms in fish tissue. J. Food Sci., 1989, 54, 244-247.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Commande Directe du Couple appliquée au Moteur Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile destiné à la Propulsion Navale

M. Hasoun¹, A. El Afia², K. Chikh^{3,1}, M. Khafallah¹, K. Benkirane⁴

⁽¹⁾ Laboratoire d'Énergie et Systèmes Électriques (LESE), ENSEM, Université Hassan II, Casablanca, Maroc.

⁽²⁾ Laboratoire des structures d'ingénierie, systèmes intelligents et Énergie électrique, ENSAM, Université Hassan II, Casablanca, Maroc.

⁽³⁾ Laboratoire d'Ingénierie et Technologies Appliquées (LITA), EST, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc.

⁽⁴⁾ Ecole Royale Navale (ERN), Casablanca, Maroc.

E-mail: mhammedhasoun@gmail.com

E-mail: azelafia@gmail.com

E-mail: genielectrique@gmail.com

E-mail: m.khafallah@gmail.com

E-mail: karbenkirane@yahoo.fr

Résumé- Dans les applications de fortes puissances comme la propulsion navale et la traction ferroviaire, les actionneurs multi-phases sont très utilisés. La Machine Synchrone Double Etoile (MSDE) constitue la machine la plus répandue des machines multi-phases. L'inconvénient majeur du double triphasé habituel des machines à courant alternatif lorsqu'elles sont alimentées par un onduleur de source de tension (VSI), est l'évènement de courants harmoniques supplémentaires. Ces courants supplémentaires circulent uniquement dans les enroulements du stator et causent des pertes supplémentaires. Le présent travail consiste en la Commande Directe du Couple (ou DTC : Direct Torque Control) de la Machine Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile (MSAPDE). Les résultats de la simulation ont été présentés pour montrer l'efficacité de la DTC classique appliquée à la MSAPDE.

Mots-clés : Machines multi-phases, Machine Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile (MSAPDE), Commande Directe du Couple (DTC), onduleurs de tension, modélisation en vue de la commande, couplage magnétique, inductances de fuites, simulation numérique.

I. INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, le concept « Navire Tout Électrique » est devenu particulièrement important, ce qui a conduit à un grand nombre de réalisations civiles et militaires.

L'objectif est de faire de l'électricité le seul vecteur énergétique dans les navires. Par conséquent, la propulsion électrique a connu une croissance considérable ces dernières années et plusieurs navires sont déjà propulsés électriquement. Ce type de propulsion présente de nombreux avantages en termes de manœuvrabilité des navires, de maintenance et de bruit acoustique.

Le type de machines multiphasées le plus attractif et le mieux débattu, est celui des Machines Double Etoile (MDE). Ces dernières sont caractérisées par la structure multiphase ayant deux enroulements statoriques triphasés montés en étoile et décalés entre eux d'un angle électrique de 30 degrés. Parmi toutes les MDE utilisées dans la propulsion électrique, le Moteur Synchrone à Aimants Permanents Double Etoile (MSAP-DE) est le plus utilisé. Il a une grande fiabilité et une bonne tolérance de défauts [1].

Le contrôle direct du couple pour un moteur double étoile a été étudié ces dernières années, notamment, le moteur à induction. Le principal problème d'un tel système est l'apparition des harmoniques du courant statorique [2-3]. Ils n'ont

aucune contribution à la production de couple, mais peuvent augmenter les pertes au niveau du stator. Le contrôle du flux des deux enroulements peut réduire les harmoniques du courant, mais augmente la complexité du système de contrôle. Le contrôle et la décomposition de l'espace vectoriel « Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM) » sont introduites dans la DTC du moteur à induction double étoile [4-5].

Cette méthode a permis d'avoir également de bons résultats. Mais chacun des deux algorithmes effectuera trop de temps de calcul. C'est donc difficile à le réaliser en pratique. Un contrôle de couple et de flux basé sur des régulateurs [6-7] et une décomposition triphasée SVPWM [8-9] relatifs au MSAP-DE sont proposés dans cet article. Ceci permet de réduire l'ondulation de couple et les harmoniques du courant avec minimum de calcul. Les résultats de simulation, dans l'environnement Matlab/Simulink, confirment la validité de la stratégie choisie.

II. MODÉLISATION DE LA MSAP-DE

La machine qui fera l'objet de notre étude est un moteur synchrone à aimants permanents double étoile, alimenté par deux onduleurs de tension à deux niveaux (Fig.1-2).

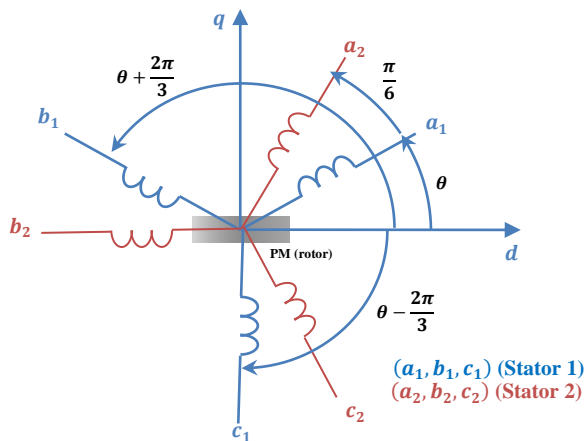


Fig.1. Représentation schématique de la MSAP-DE

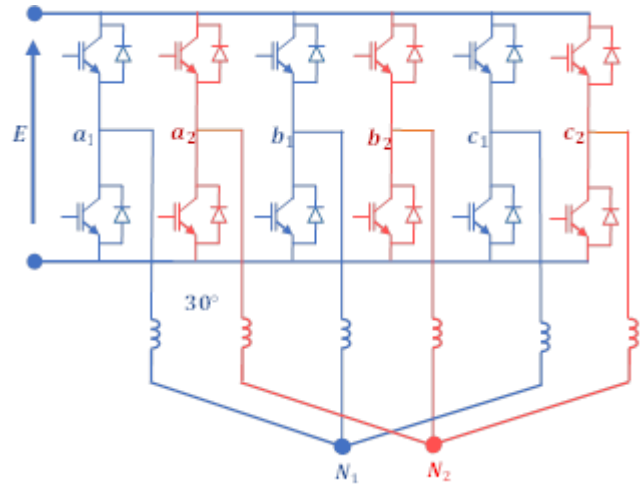


Fig.2. Deux onduleurs triphasés à 2 niveaux avec 2 neutres isolés

Le modèle électromagnétique de la dite machine est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile. En effet, l'utilisation d'une transformation convenable des variables, permet de détourner cette difficulté et d'obtenir un modèle facilement exploitable.

La théorie relative à la Décomposition de l'espace Vectoriel « Vector Space Decomposition (VSD) » [1], permet d'obtenir un modèle pratique et propre à la commande basée sur un découplage via la matrice de transformation suivante qui offre le passage d'un système hexaphasé à un système équivalent découplé :

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/2 & 1/2 & -1 \\ 1 & -1/2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 0 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 & 1/2 & 1/2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

En utilisant cette transformation, le système compliqué de la machine est décomposé en trois

sous-espaces orthogonaux et découplés mutuellement à savoir : $(\alpha\text{-}\beta)$, $(z_1\text{-}z_2)$ et $(o_1\text{-}o_2)$.

Afin de réduire la complexité du modèle non linéaire, nous adoptons les hypothèses simplificatrices concernant les enroulements distribués de façon sinusoïdale et la négligence de la saturation magnétique et des pertes de fer :

On définit les nouvelles variables de la machine, exprimées dans le nouveau référentiel $((\alpha\text{-}\beta)$, $(z_1\text{-}z_2)$, $(o_1\text{-}o_2))$, qui sont obtenues en diagonalisant la matrice des inductances, par la matrice T :

$$[V_{\alpha\beta}] = [R_s][i_{\alpha\beta}] + \frac{d}{dt}[\psi_{\alpha\beta}] \quad (2)$$

$$[\psi_{\alpha\beta}] = [L_{\alpha\beta}][i_{\alpha\beta}] + \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \psi_{PM} \quad (3)$$

$$[V_{z_{1,2}}] = [R_s][i_{z_{1,2}}] + [L_z] \frac{d}{dt}[i_{z_{1,2}}] \quad (4)$$

$$[\psi_{z_{1,2}}] = [L_z][i_{z_{1,2}}] \quad (5)$$

$$[V_{o_{1,2}}] = [R_s][i_{o_{1,2}}] + [L_o] \frac{d}{dt}[i_{o_{1,2}}] \quad (6)$$

$$[L_{\alpha\beta}] = \begin{bmatrix} \frac{(L_d + L_q)}{2} + \frac{(L_d - L_q)}{2} \cos 2\theta & \frac{(L_d - L_q)}{2} \sin 2\theta \\ \frac{(L_d - L_q)}{2} \sin 2\theta & \frac{(L_d + L_q)}{2} - \frac{(L_d - L_q)}{2} \cos 2\theta \end{bmatrix}$$

L_d, L_q : inductances directe et quadratique.

L_z, L_o : inductances statoriques transformées.

ψ_{PM} : Flux produit par aimant permanent.

θ : Angle électrique entre phase a_1 et position du rotor.

On remarque que :

- La machine MSAP-DE peut-être décomposée en trois machines fictives totalement découplées.

- La totalité de conversion électromagnétique s'effectue dans le repère $(\alpha\text{-}\beta)$. Donc la machine fictive dans ce repère contribue à la création du couple électromagnétique.

- Le modèle de la MSAP-DE dans le repère $(z_1\text{-}z_2)$ ne crée pas de couple. Les courants i_{z1} , i_{z2} sont appelés courants de circulation, ils dépendent fortement de l'angle entre les deux étoiles ainsi que du type d'alimentation de la MSAP-DE.

- Le modèle de la machine dans le repère $(o_1\text{-}o_2)$ est formé par les composants homopolaires qui sont nulles lorsque le neutre est isolé.

Le passage au référentiel de Park est obtenu en appliquant la matrice de rotation suivante :

$$T_r = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les équations électriques de la machine s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\Gamma_{em} = p(i_q \psi_d - i_d \psi_q) \quad (9)$$

Avec : p est le nombre de paires de pôles.

Le modèle de la machine obtenu dans le référentiel de Park est similaire au modèle de la machine simple étoile classique.

III. STRATEGIE DE COMMANDE DTC _ MSAP-DE

Les tensions simples des différentes phases des deux étoiles de la machine, sont exprimées, selon les états des interrupteurs des deux onduleurs qui l'alimentent, par l'équation ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \\ V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \\ S_{a2} \\ S_{b2} \\ S_{c2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

En utilisant la matrice T, les vecteurs de tensions dans le nouveau référentiel, sont exprimés par l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_{z1} \\ V_{z2} \\ V_{o1} \\ V_{o2} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \\ V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Selon la théorie VSD, Le double triphasé comporte 64 différents vecteurs de tension. Un nombre décimal, correspondant aux nombres binaires [Sa₁ Sb₁ Sc₁ Sa₂ Sb₂ Sc₂], est utilisé pour représenter chaque vecteur. Où (S = Sa₁, Sb₁, Sc₁, Sa₂, Sb₂, Sc₂) correspond aux états de commutation des interrupteurs d'onduleurs et E la tension du bus continue. Ainsi, dans les deux sous-espaces (α-β) et (z₁-z₂), il y a 60 vecteurs non nuls et 4 autres nuls « zéro » (0,7,56,63), représentés dans les deux figures 4 et 5.

Selon les deux figures 3 et 4, le vecteur de tension déterminé dans le sous-espace (α-β), peut- être décomposé en 4 dodécagones avec différents amplitudes (d'intérieur vers l'extérieur : D₁, D₂, D₃, D₄). Leur amplitude est donnée par l'équation suivante:

$$\begin{cases} U_{D1} = \frac{\sqrt{(2-\sqrt{3})}}{\sqrt{3}} E \\ U_{D2} = \frac{1}{\sqrt{3}} E \\ U_{D3} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} E \\ U_{D4} = \frac{\sqrt{(2+\sqrt{3})}}{\sqrt{3}} E \end{cases} \quad (12)$$

Les vecteurs de tension d'amplitude maximale dans (α-β) obtiennent une amplitude minimale dans (z₁-z₂), tandis que les autres conservent la même amplitude.

Dans (α-β), les 12 vecteurs d'amplitude maximale dans lequel 12 secteurs sont choisis, sont donnés dans la figure 6. Le choix de ces vecteurs permet d'avoir une faible d'amplitude dans (z₁-z₂), en vue de garantir le moindre contenu d'harmonique du courant statorique dans (z₁-z₂), et de réduire les pertes statoriques.

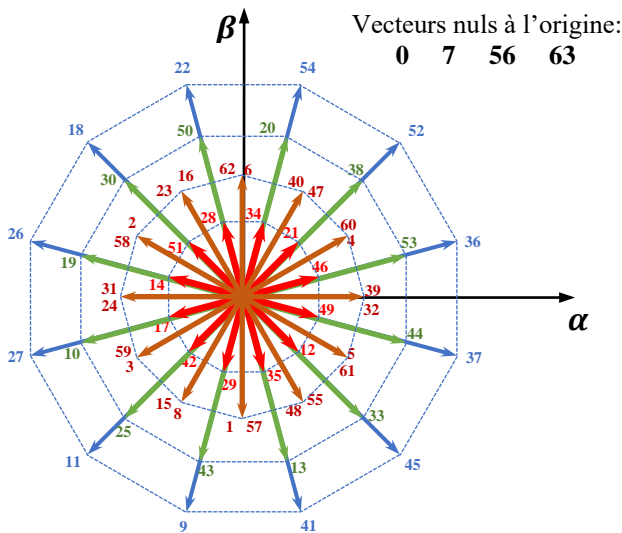


Fig.3. Diagramme d'espace vectoriel dans (α-β)

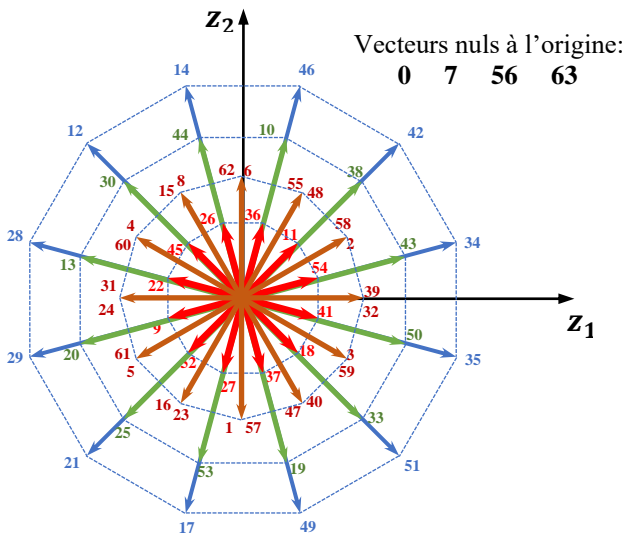


Fig.4. Diagramme d'espace vectoriel dans (z₁-z₂)

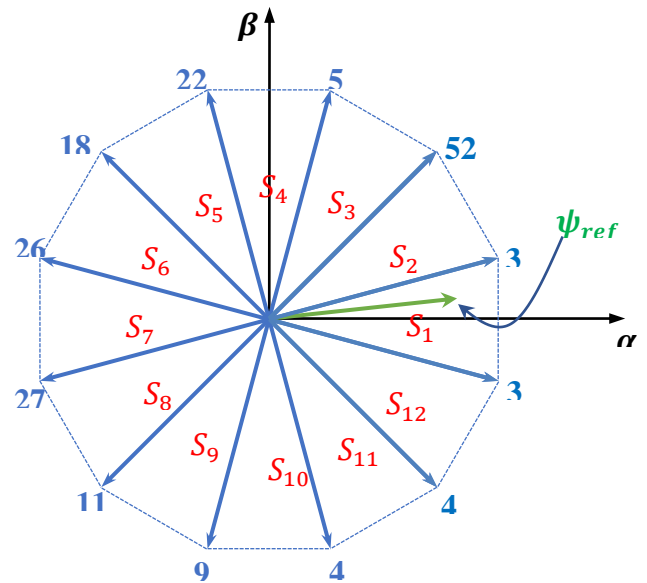


Fig.5. Diagramme de 12 vecteurs d'amplitude maximale dans (α-β).

Dans la table de commutation relative à la stratégie de commande classique DTC pour MSAP-DE, le couple et le flux sont estimés. Ensuite, des régulateurs de flux statorique et de couple sont utilisés pour générer les vecteurs de tensions au niveau onduleurs en utilisant une table de commutation, comme le montre la Fig.6.

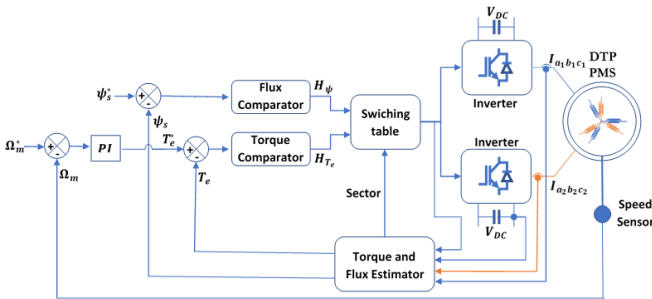


Fig.6. Diagramme DTC conventionnel pour MSAP-DE

Le sous-espace (α - β) est divisé en 12 secteurs; chaque secteur est délimité par deux vecteurs maximum, comme le montre la figure 7. Lorsque le flux du stator est dans le secteur k , le vecteur responsable de l'augmentation du flux et du couple est $V_{(k+2)}$ et que le responsable de la réduction du flux et du couple est $V_{(k-4)}$. Le vecteur $V_{(k+3)}$ conduit à la réduction du flux mais l'augmentation du couple et le vecteur $V_{(k-3)}$ entraîne une augmentation du flux mais une réduction du couple.

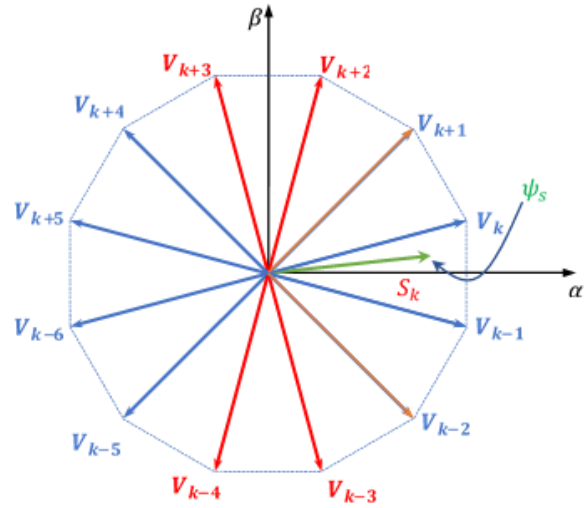


Fig.7. Sélection vecteur tension où le flux statorique se situe dans le secteur k

Des régulateurs d'hystérésis de couple et de flux sont utilisés pour générer un vecteur de tension approprié selon le tableau suivant:

Table I. Table de commutation appliquée à MSAP-DE

	k Sector					
H_ψ	1			-1		
H_{T_e}	1	0	-1	1	0	-1
Applied vector	V_{k+2}	V_{zero}	V_{k-3}	V_{k+3}	V_{zero}	V_{k-4}

Les signaux de commande de couple et de flux générés H_ψ et H_{T_e} , sont définis comme suit :

$$H_{T_e} = \begin{cases} 1 & \text{if } T_e^* - T_e \geq \varepsilon_T \\ 0 & \text{if } T_e^* - T_e = 0 \\ -1 & \text{if } T_e^* - T_e \leq -\varepsilon_T \end{cases} \quad (13)$$

$$H_\psi = \begin{cases} 1 & \text{if } \psi_s^* - \psi_s \geq \varepsilon_\psi \\ -1 & \text{if } \psi_s^* - \psi_s \leq -\varepsilon_\psi \end{cases} \quad (14)$$

IV. RESULTATS DE SIMULATION

Les simulations ci-dessous sont illustrées en utilisant la machine MSAP-DE prototype de 3-KW, destinée à la propulsion électrique navale,

dont les paramètres utilisés sont mentionnés dans le tableau ci-dessous:

Table II. Principaux paramètres MSAP-DE

La figure 10 montre la présence d'une distorsion d'harmoniques affectant le courant statorique tout en rendant son signal non sinusoïdal (7th), dont le

Désignation	Valeur/ unité
Tension bus continu : E	400 V
Résistance statorique : R_s	1 Ω
Inductance direct: L_d	8.5 mH
Inductance quadratique : L_q	8.5 mH
Flux aimant permanent : Ψ_{PM}	0.175 Wb
Moment d'inertie total : J	89.10 kgm^2
Coefficient frottement: f	0.01 Nms/rad
Nombre de paires de pôles : p	4

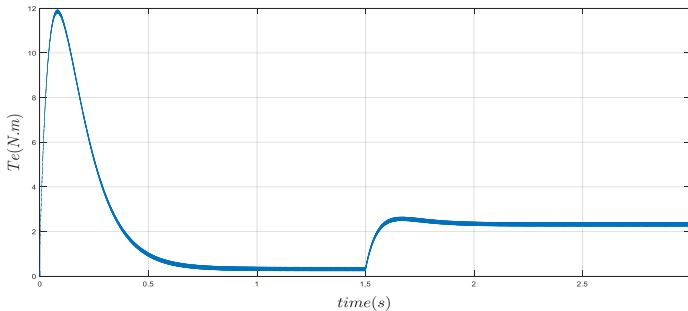


Figure.8. Couple électromagnétique avec charge

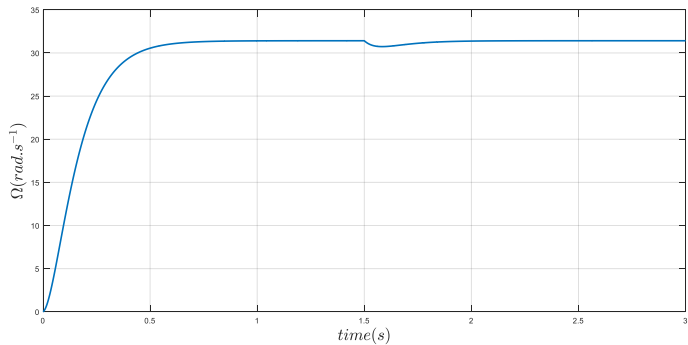


Figure.9. Vitesse de rotation machine

THD est environ 36%.

V. CONCLUSION

Quand la DTC conventionnelle basée sur la table de commutation est appliquée sur la MSAP-DE, une large quantité d'harmoniques du courant se produisent. Ces harmoniques ne contribuent pas dans la conversion d'énergie électromagnétique, mais augmentent les pertes statoriques. Les résultats de simulation montrent bien la présence d'harmoniques du courant statorique qui affecte considérablement l'efficacité du système. Afin de minimiser l'amplitude des courants harmoniques sur le plan (z_1-z_2) , une table de commutation plus élaborée est envisagée, et ce sujet fera l'objet de travaux futurs.

REFERENCES

- [1] Y. Zhao and T. A. Lipo, "Space Vector PWM Control of Dual Three-Phase Induction Machine Using Vector Space Decomposition", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.31, no.5, pp.1100-1109, Sept./Oct. 1995.
- [2] R.Kianinezhad, B.Nahid, F.Betin, G.A.Capolino, " A Novel Direct Torque Control (DTC) method for dual three phase induction motors, " IEEE International Conference on Industry Technology, Mumbai, India, 2006, pp. 939-943.
- [3] K.Marouani, F.Khoucha, et al, "Study and simulation of direct torque control of double-star induction motor drive," 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, Portoroz, Slovenia, 2006, pp. 1233-1238.

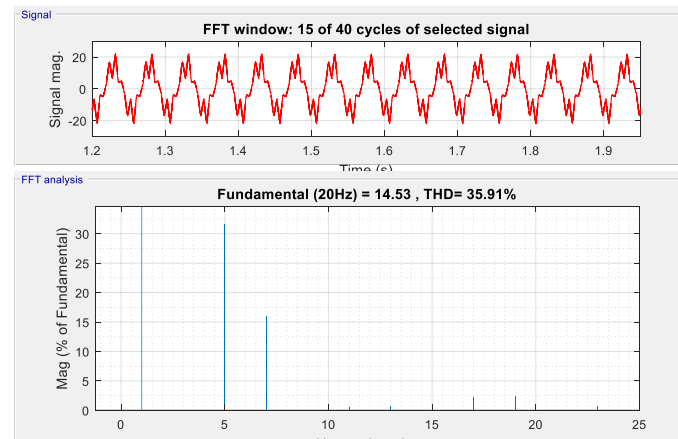


Figure.10. Analyse harmoniques courant MSAP-DE

Les deux figures 8 et 9, montrent l'efficacité des performances statiques et dynamiques relatives au contrôle de la vitesse et à la commande direct du couple appliquée à la machine.

- [4] A. Khajeh, J.S.Moghani and M. Shahbazi, " An efficient direct torque control scheme for split phase induction motor," 7th International Conference on Power Electronics and Drive System, Bangkok, Thailand, 2007, pp. 1285-1289.
- [5] R.Bojoi, F.Farina, G.Griva, et al, " Direct torque control for dual three-phase induction motor drives, " IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no.6, pp.1627-1636, 2005.
- [6] D. Yazdani, S. A. Khajehoddin, A. Bakhshai, *et al.*, " Full utilization of the inverter in split-phase drives by means of a dual three-phase space vector classification algorithm," " IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no.1, pp.120-129, 2009.
- [7] G. Grandi, G. Serra, A. Tani, "Space vector modulation of a six-phase VSI based on three-phase decomposition," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 2008, pp. 674-679.
- [8] C. Lascu, I. Boldea and F. Blaabjerg, "A modified direct torque control for induction motor sensorless drive," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1, pp. 122-130, 2000.
- [9] Yen-Shin Lai, Jian-Ho Chen, "A new approach to direct torque control of induction motor drives for constant inverter switching frequency and torque ripple reduction," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 3, pp. 220-227, 2001.

Implementation of a Low Cost Software Oscilloscope in Remote Practical Works

ABOUHILAL Abdelmoula¹, MOULAY TAJ Amine¹, TAIFI Naima¹, Abdessamad MALAOUI¹

¹Research team in electronics, instrumentation and measurements, Polydisciplinary faculty, Sultan Moulay Slimane University, Beni Mellal, Morocco
a.abouhilal@usms.ma

Abstract- This paper presents the implementation of a software oscilloscope in a remote electronics laboratory. The architecture of this lab is based on the cooperation of two embedded systems, Arduino and Raspberry. The latter plays the role of a server in which we implemented a web page provided by NodeJs and the software oscilloscope using Processing; while the Arduino deals by measurements comes from the practical work card. The results of this approach will be compared by a real hardware oscilloscope. This architecture is beneficial for low cost labs and low bandwidth connections.

KEY-WORDS: REMOTE LABS, PRACTICAL WORKS, PROCESSING, SOFTWARE OSCILLOSCOPE, ELECTRONIC EXPERIENCES.

I. INTRODUCTION

Learning activities of technical disciplines in engineering education based on experiment [1]. Practical teaching is among the most persistent methods of education in the field of electrical engineering [2], [3]. And this, to develop the skills and critical thinking of students [4]. Several approaches have been developed to ensure the necessary resources of practical education, classical hands-on lab where access is local and resources are real, virtual lab when we have a local access and simulated resources and remote laboratories where there is a remote access and real resources [5].

Online Remote laboratories allow remote access to the physical resources of practical manipulations [6], in order to minimize the financial burden on the one hand and to allow a large number of students to access the practical work and also It is very promising as it provides

many advantages to know [7]: Accessibility for people with disabilities who need an unavoidable effort to move to the institution; Availability at any time and from any place in the world; Observability from where the manipulation can be followed by several people and even be recorded; Safety in such a way the material and the manipulator have no risk during a PW.

Remote labs are based on the development of Internet and Information Technologies[8], both are considered as a great innovation in engineering education[7]. Electronics is a discipline that is based on practical work (PW)[9]; there are several remote laboratories that offer electronic online PW [10][11]. All of these labs rely on the use of costly Internet-based measuring instruments[9], [12].

There are several laboratories that use emulated systems to minimize the cost of developing remote labs instead of using expensive servers [13]–[15]. In our work we used 2 embedded systems, Arduino and Raspberry. In this paper we propose architecture of less expensive practical work based on a software oscilloscope based on two microcontrollers; Arduino[16] and Raspberry[17], which his architecture is shown in the first paragraph. In the following paragraph the hardware part is presented include all parts of the discussed solution. The software part, NodeJs and Processing is presented in the next paragraph. Then, as results, a description of the

software oscilloscope and its functionalities is presented.

source code of Arduino. This, to prepare the data before sending them to Raspberry.

II. MATERIALS AND METHODS

1.1. Used architecture

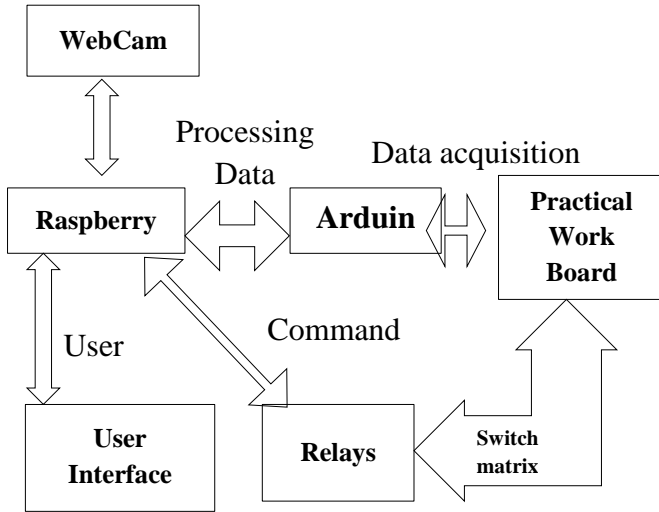


Figure 1. Architecture of the proposed approach

1.2. Description of the material part

The architecture of our remote practical work is based on the cooperation of two embedded systems:

Raspberry: responsible for the main processing of data measured via Arduino [18]. It acquires the data via the USB serial port, and then it processes them with processing, in order to make them usable for the display. The measured signals will be displayed in an interface using a JavaScript module. In addition, Raspberry plays the role of a server that provides a web page to the user. This page contains command buttons that represent the status of relay commands and a webcam area.

Arduino: used to measure signals comes from the PW card, and then process them before sending them to Raspberry through the USB port. The Arduino treats the measured voltages with its analog gates thanks to the digital analog converter; after, part of the processing of its signals is done by the script implemented in the

In addition, the PCB of the PW contains the editing of the manipulation, in our case a RC circuit of charge / discharge of a capacitor Fig.2. This card is controlled via a relay card that acquired commands through the Raspberry's digital outputs, in order to open or close the circuit in the TP card. These changes will be viewed from the webcam installed on the Raspberry to keep the interaction in real time between the user and the TP card.

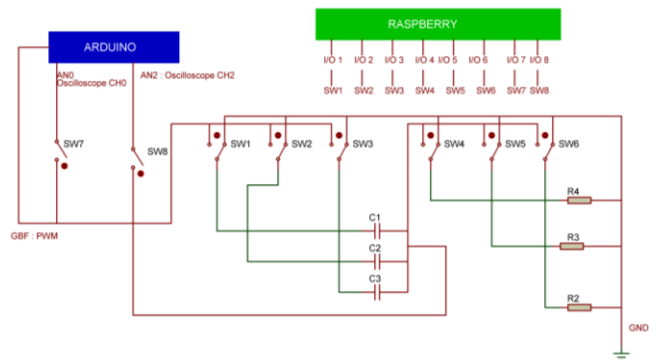


Figure 2. Electronic schema of the practical word

1.3. Description of the software part

The development of the oscilloscope is based on processing. The latter is an open source development tool that allows a computer to communicate with Arduino to back up, process, and display data.

Using the data received from Arduino via USB, processing can draw and make animations in 2 or 3 dimensions.

After implementing the program in both Arduino and Raspberry, and to ensure real-time communication, we send the signals to be displayed via a web interface, using NodeJs technology. The interest of NodeJs is to ensure real-time communication between the client and the server in an asynchronous way.

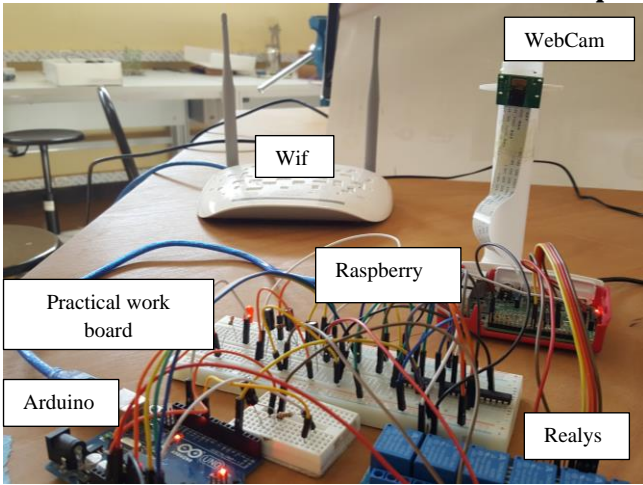


Figure 3. Prototype of the remote practical work

III. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Description of the oscilloscope

This 4-channel oscilloscope allows the student to visualize and manipulate the following actions:

- The detection of frequencies ;
- Control and configuration of the 4 channels by varying the horizontal and vertical sensitivities;
- The backup of measured data in txt format for any use in another application.
- The generation of rectangular signals with PWM, with the possibility to change the frequency, the period and the duty cycle.
- The measurement of the value of resistors or capacitors.

3.2. Comparaison between hardware and software oscilloscope

To test the reliability of our oscilloscope we compared its results with another hardware oscilloscope. Fig.4 and Fig.5.

Fig. 4 represents the signal of the charge / discharge of a capacitor, knowing that the rectangular signal of 5V is that of the input of the circuit, while the second signal is that of the output. These measurements are displayed via the

software oscilloscope. However, fig.5 shows the signals measured with the hardware oscilloscope. Note that both instruments whether software or hardware, they have a likelihood.

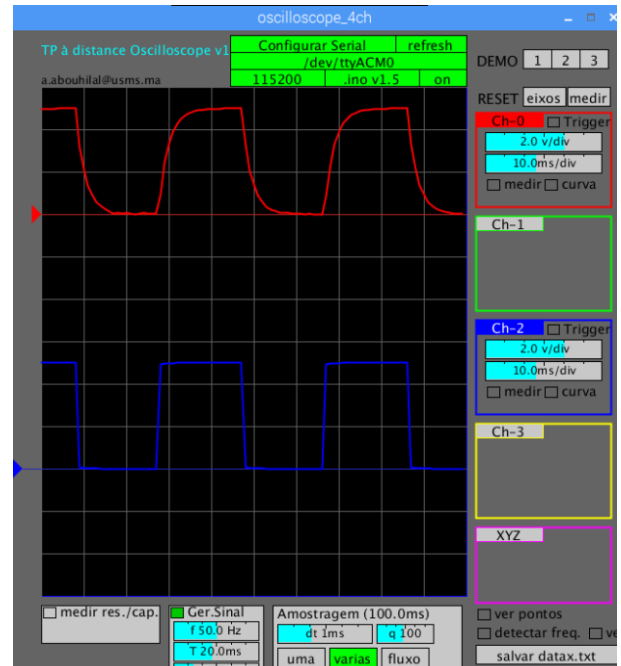


Figure 4. Visualisation of the Charge/Discharge signal on the software oscilloscope

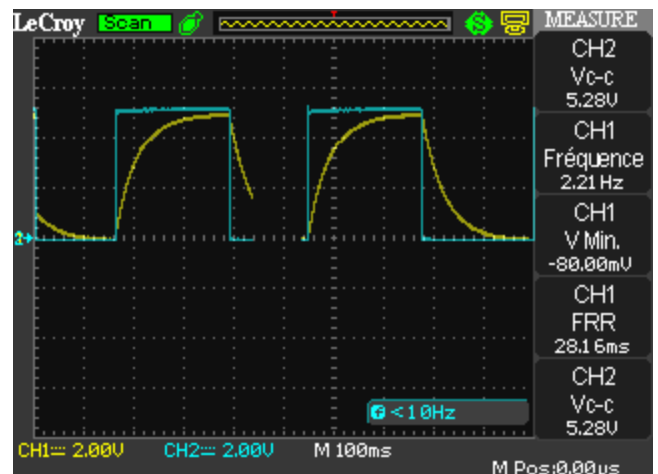


Figure 5. Visualization of the Charge/Discharge signal on the hardware oscilloscope



Figure 6. Used hardware oscilloscope

This software oscilloscope has several advantages to know that it is low cost, simple to integrate as it is flexible and portable, connected to the Internet and open source. But our solution is limited in terms of frequency, it depends on the frequency of operation and sampling of the embedded system used during data acquisition, is not suitable for negative voltages.

IV. CONCLUSION

This paper presents the description of the implementation of a software oscilloscope, in a laboratory of practical work, controlled remotely. This work describes the architecture of the proposed solution, the embedded systems used, the software implemented as well as the integration of the oscilloscope within this lab. This fully open source solution minimizes the cost of developing this type of laboratory for electronics.

V. FUTURE WORK

Future work will involve developing a complete oscilloscope to overcome the limitations of this version, improve bandwidth, use the negative signals, and develop an electronic card adaptation

for voltage greater than 5V. On the other hand, we will test this solution in a full practical work scenario in order to solve other problems.

References

- [1] G. Farias, F. Gomez-Estern, L. De La Torre, D. Muñoz De La Peña, C. Sánchez, and S. Dormido, "Enhancing virtual and remote labs to perform automatic evaluation," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 9, no. PART 1, pp. 276–281, 2012.
- [2] A. Abouhilal, A. M. Taj, M. Mejdal, and A. Malaoui, "Design of a Remote Experience for Electrical Engineering Using Embedded Systems," in *Proceedings of the 2Nd International Conference on Big Data, Cloud and Applications*, 2017, p. 100:1–100:5.
- [3] M. Tawfik, E. Sancristobal, S. Martin, G. Diaz, and M. Castro, "State-of-the-Art Remote Laboratories for Industrial Electronics Applications," *Tae*, pp. 567–572, 2012.
- [4] R. B. Kuriakose, "South African Student Perceptions of Practical Laboratory Work – a Case Study from Digital Systems 1," 2015.
- [5] J. Djordjevi, "Remote Laboratory Development for the Education in the Field of Electronic Measurement," vol. 1, pp. 37–44, 2009.
- [6] M. Gourmaj, A. Naddami, A. Fahli, and M. Moussetad, "Integration of virtual instrument systems in reality (VISIR) OpenLabs with Khouribga OnlineLab," *Proc. 2015 Int. Conf. Interact. Collab. Learn. ICL 2015*, no. September, pp. 793–797, 2015.
- [7] R. Heradio, L. de la Torre, and S. Dormido, "Virtual and remote labs in control education: A survey," *Annu. Rev. Control*, vol. 42, pp. 1–10, 2016.
- [8] S. Shelke, M. Date, S. Patkar, R. Velmurugan, and P. Rao, "A Remote lab for real-time digital signal processing," *5th Eur. DSP Educ. Res. Conf.*, pp. 266–270, 2012.
- [9] A. Malaoui, M. Kherallah, L. Ghomri, G. Andrieu, T. Fredon, and D. Barataud, "New strategy for remote practical works in power electronics for embedded systems: Application in EOLES European project," in *The Third International Afro-European Conference for Industrial Advancement, Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, vol. 565, pp. 149–158.
- [10] A. Abouhilal, A. M. Taj, R. Irkettou, M. Mejdal, and A. Malaoui, "Development and Testing of a Remote Laboratory for Practical Work Based on Embedded Electronics," *J. Fundam. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4S, pp. 487–490, 2018.
- [11] A. Malaoui *et al.*, "Implementation and validation of a new strategy of online practical works of power electronics for embedded systems," *Int. J. Online Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 29–44, 2017.
- [12] A. V. Fidalgo *et al.*, "The EOLES project remote labs across the mediterranean," *Proc. 2014 11th Int. Conf. Remote Eng. Virtual Instrumentation, REV 2014*, no. 530466, pp. 211–216, 2014.
- [13] M. Kalúz, L. Čirka, R. Valo, and M. Fikar, *ArPi Lab: A low-cost remote laboratory for control education*, vol. 19, no. 3. IFAC, 2014.
- [14] C. A. Matarrita and S. Beatriz Conconi, "Remote laboratories used in physics teaching: A state of the art," *Proc. 2016 13th Int. Conf. Remote Eng. Virtual Instrumentation, REV 2016*, no. February, pp. 385–390, 2016.
- [15] Y. Khazri, M. Moussetad, and A. Fahli, "Implementing a Remote experience for engineering education," *Proc. 2015 Int. Conf. Interact. Collab. Learn. ICL 2015*, no. September, pp. 48–50, 2015.
- [16] V. M. Cvjetkovic and M. Matijevec, "Overview of architectures

Volume II N° 6

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

with Arduino boards as building blocks for data acquisition and control systems," *Int. J. Online Eng.*, vol. 12, no. 7, pp. 10–17, 2016.

- [17] J. Bermudez-Ortega, E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco, J. A. Bonache-Seco, and J. M. D. La Cruz, "Remote Web-based Control Laboratory for Mobile Devices based on EJS, Raspberry Pi and Node.js," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 29, pp. 158–163, 2015.
- [18] "arduino website." [Online]. Available: www.arduino.cc.

Mixed convection heat transfer improvement inside a multiple vented cavity crossed by Al_2O_3 -water nanofluid

I. Arroub¹, A. Bahlaoui¹, K. Ezzaraa¹, A. Raji², M. Hasnaoui³ and M. Naïmi²

¹ Team of Applied Physics and New Technologies (EPANT), Polydisciplinary Faculty, Béni-Mellal, Morocco;

² Laboratory of Flows and Transfers Modeling (LAMET), Faculty of Sciences and Technics, Béni-Mellal, Morocco;

³ Laboratory of Fluid Mechanics and Energetics (LMFE), Faculty of Sciences Semlalia, Marrakech, Morocco;
ismail.arroub@gmail.com

Abstract: The goal of this work is to study the laminar mixed convection of water- Al_2O_3 nanofluid in a multiple vented cavity. The effects of various controlling parameters, such as Reynolds number, $200 \leq Re \leq 3000$, solid volume fraction of nanoparticles, $0 \leq \phi \leq 0.7$, and mode of imposed external flow (injection and suction) on flow and thermal patterns and resulting heat transfer inside the cavity are investigated. The obtained results show that, the addition of nanoparticles leads to an improvement of heat transfer rate and an increase of mean temperature inside the enclosure. In addition, the suction mode was found to present higher heat performances and better cooling effectiveness, in comparison with the injection one.

Keywords : Numerical study, mixed convection, nanofluid, multiple vented cavity, injection, suction.

I. INTRODUCTION

Mixed convection heat transfer is an important phenomenon in engineering systems due to its wide applications in electronic cooling, heat exchangers and solar collectors. Enhancement of heat transfer in such systems is very essential from the industrial and energy saving perspectives. The low thermal conductivity of conventional heat transfer fluids, such as water, is considered a primary limitation in enhancing the performance and the compactness of such thermal systems. With this aim, an innovative technique for improvement of heat transfer using nano-scale particles dispersed in a base fluid (known as nanofluid) has been extensively experimented. Consequently, the presence of the nanoparticles in the base fluids enhances the heat transfer characteristics of nanofluids [1, 2].

Some studies were focused on mixed convection flow in a lid-driven cavity. Among

the recently published works, we quote that by Sebdani et al. [3] dealing with mixed convection of nanofluid in a lid-driven square cavity locally heated from below with heat source. They showed that for high Rayleigh numbers, the rate of heat transfer decreases with increase in nanoparticle volume fraction. Moreover it was found that when the heat source moved toward the cold side walls, the rate of heat transfer increases. In the case of variable heating, Abbasian et al. [4], investigated numerically mixed convection flow in a lid-driven square cavity filled with the Cu-water nanofluid with sinusoidal heating sidewalls. They proved that for a constant Grashof number, the rate of heat transfer increases with decrease in Richardson number and increase of volume fraction of nanoparticles.

Mixed convection of nanofluids in ventilated cavities has been also the object of interest during the last years. Such problems are encountered in many industrial applications such as heat exchangers, lubrication technology, chemical processing equipments, solar energy collectors and cooling of electronic equipment. Hence, in the case of applied uniform heat flux, Shahi et al. [5] conducted a numerical study of mixed convection in a partially heated square ventilated cavity, filled with copper-water nanofluid. The reported results showed an increase of heat transfer rate at the heat source surface and a decrease in the mean bulk temperature with the solid concentration. The same problem was

reconsidered by Mahmoudi et al. [6] for different locations of inlet and outlet ports in the case of total constant heating. It was found that the presence of nanoparticles is more effective in Bottom-Top configuration than in the other considered configurations, while the solid concentration increase has the least effects in Top-Top arrangement.

The objective of this work is to study the effects of nanoparticles volume fraction, Reynolds number and the modes of imposed external flow on the heat transfer characteristics for steady mixed convection in a vented rectangular enclosure filled with a nanofluid.

II. PROBLEM DESCRIPTION AND MATHEMATICAL FORMULATION

The schematic diagram of the geometry considered in this work is displayed in Fig. 1. It consists of a vented horizontal rectangular enclosure of length L' , height H' and having an aspect ratio $A = 2$. The enclosure is heated from the bottom wall by a sinusoidal hot temperature (Fig. 1c) whereas the other solid boundaries are assumed to be thermally insulated. The system is cooled by an injected (Fig. 1a) or sucked (Fig. 1b) imposed flow, through the tow openings located on the lower part of the right and left vertical walls. These ports have a constant dimensionless height, $B = 1/4$. A third opening ($B = 1/2$) is localized in the middle of the upper wall in order to assure the ventilation. Thus, it is assumed that both the fluid phase and nanoparticles are in thermal equilibrium and the shape and size of solid particles are assumed to be uniform. Also, the thermo-physical properties of the nanofluid are constant except for the density variation, which is approximated by the Boussinesq model.

Therefore, using the following dimensionless variables:

$$A = L'/H', \quad B = h'/H', \quad x = x'/H', \quad y = y'/H',$$

$$\begin{aligned} u &= u'/u'_o, & v &= v'/u'_o, & t &= t'u'_o/H', & \Psi &= \Psi'/u'_oH' \\ T &= (T' - T'_c)/(T'_h - T'_c), & \Omega &= \Omega' H'/u'_o, & Pr &= \nu_f/\alpha_f \\ Ra &= g \beta_f (T'_h - T'_c) H'^3 / \alpha_f \nu_f, & Re &= u'_o H' / \nu_f \end{aligned}$$

The mixed convection governing equations using the vorticity-stream function formulation (Ω - Ψ), can be written in the non-dimensional form as follows:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial t} + u \frac{\partial \Omega}{\partial x} + v \frac{\partial \Omega}{\partial y} &= \frac{Ra}{Re^2 Pr} \left[\left(\frac{\phi}{\left((1-\phi) \frac{\rho_f}{\rho_s} + \phi \right)} \right) \frac{\beta_s}{\beta_f} + \frac{1}{\left((1-\phi) \frac{\rho_s}{\rho_f} + 1 \right)} \right] \frac{\partial T}{\partial x} \\ &+ \frac{1}{Re} \left[\frac{1}{(1-\phi)^{2.5} \left(\phi \frac{\rho_s}{\rho_f} + (1-\phi) \right)} \right] \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{1}{Re Pr} \left(\frac{\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f}}{(1-\phi) + \phi \frac{(\rho c_p)_s}{(\rho c_p)_f}} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} &= -\Omega \end{aligned} \quad (2)$$

The dimensionless tangential and normal velocities are converted to:

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} ; \quad v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad \text{and} \quad \Omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

The nanofluid effective density, thermal diffusivity, heat capacity and the thermal expansion coefficient are, respectively, calculated as follow:

$$\rho_{nf} = \phi \rho_s + (1-\phi) \rho_f \quad (5)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{\lambda_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (6)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = \phi (\rho c_p)_s + (1-\phi) (\rho c_p)_f \quad (7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = \phi \rho_s \beta_s + (1-\phi) \rho_f \beta_f \quad (8)$$

The effective thermal conductivity, λ_{nf} , and the effective dynamic viscosity, μ_{nf} , can be predicted using the following correlations produced by M. Corcione [7] using a wide number of

experimental data obtained by several research groups:

$$\lambda_{nf} = \lambda_f \left[1 + 4.4 \text{Re}_s^{0.4} \text{Pr}^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{0.03} \phi^{0.66} \right] \quad (9)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f \left[\frac{1}{1 - 34.87 (d_s / d_f)^{-0.3} \phi^{1.03}} \right] \quad (10)$$

Where Re_s is the nanoparticle Reynolds number, T_{fr} is the freezing point of the base liquid, d_s is the diameter of the suspended nanoparticles (d_s retained in this study is 100 nm) and d_f is the equivalent diameter of a base liquid molecule. “ f ”, “ s ” and “ nf ” indicate fluid, solid particles and nanofluid respectively.

II.1 Boundary Conditions

The common boundary conditions applied to the two ventilation modes would be adjusted as follows:

$u = v = 0$ on the rigid walls

$T = 1 + a \sin\left(\frac{2\pi x}{A}\right)$ on the bottom wall

$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ on the adiabatic walls

Where the parameter ‘ a ’ stands for the amplitude of the sinusoidal temperature (‘ a ’ is taken equal to 0.5 in this study) and ‘ n ’ denotes the outward normal to the adiabatic wall.

The appropriate boundary conditions associated to each mode are given in the subsequent sections

Injection case:

$T = v = \Omega = 0, u = 1$ and $\Psi = y$ at the left inlet of the cavity

$T = v = \Omega = 0, u = -1$ and $\Psi = -y$ at the right inlet of the cavity

$\Psi = B$ between the left inlet port and the upper outlet port

$\Psi = -B$ between the right inlet port and the upper outlet port

Suction case:

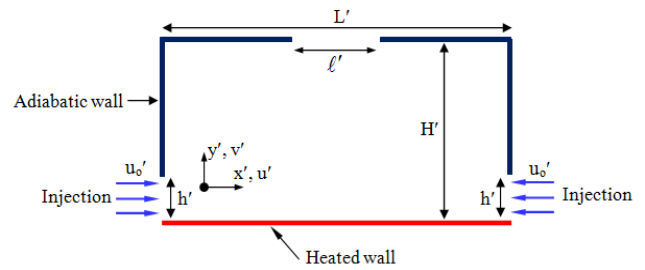
$T = 0$ at the upper inlet port

$u = -1, v = 0, \Psi = -y, \Omega = 0$ at the left outlet port

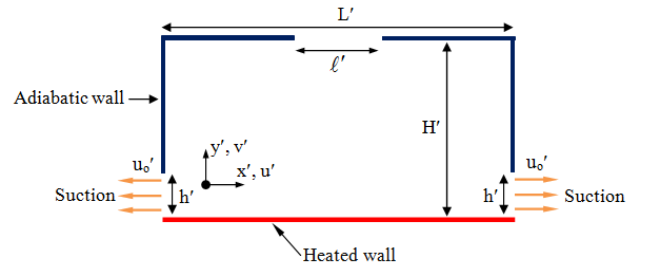
$u = 1, v = 0, \Psi = y, \Omega = 0$ at the right outlet port

$\Psi = -B$ between the left outlet port and the upper inlet port

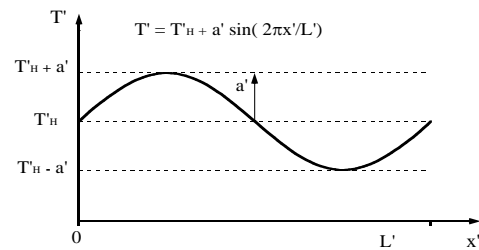
$\Psi = B$ between the right outlet port and the upper inlet port



a) Injection case



b) Suction case



c) Sinusoidal temperature profile on the heated wall

Fig. 1: Geometry and coordinates system: a) Injection case, b) Suction case and c) Heating temperature profile.

II.2 Heat Transfer

The rate of heat removal from the heating element is expressed in terms of average Nusselt number, Nu , calculated on the heated bottom wall

of the cavity, which is defined by:

$$Nu = -\frac{1}{A} \left(\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_f} \right) \int_0^A \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} dx \quad (11)$$

III. NUMERICAL PROCEDURE

The two-dimensional governing equations, (1)-(3), are solved by using the finite difference method with a regular mesh size. The advection terms are approximated by the second-order upwind differencing scheme which leads to a stable solution. Also, the second-order central differencing scheme is utilized to approximate the diffusive terms. The integration of the vorticity and energy equations, (1) and (2), is performed with the ADI (Alternating-Direction Implicit) method. To satisfy the mass conservation, the Poisson equation, (3), is solved by a PSOR (Point Successive Over-Relaxation) method with an optimum over-relaxation factor equal to 1.95 for the grid (201×101) retained in this work.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the Rayleigh number was kept at a constant value $Ra = 10^6$ and the Reynolds number Re ranging between 200 and 3000. Values of these parameters involves values of the Richardson number, $Ri = Ra / Re^2 Pr$, varying in the range $[1.79 \times 10^{-2}, 4.03]$ which simulates natural convection, mixed convection and forced convection dominating regimes. In the following, effects of nanoparticles and modes of imposed external flow on flow patterns and thermal structures and on efficient cooling are investigated. Before dealing with this part of the results, it is to note that in the injection case, the flow is unsteady as Re is very weak. Therefore, the dynamical and thermal structures could not be presented in this situation.

Streamlines and isotherms plots illustrating the effect of Re on the dynamical and thermal fields, for the injection case, are shown in Figs. 2a-2c for both $\phi = 0$ (solid line —) and $\phi = 0.07$ (dashed line - - -). For a moderate value of Re

($Re = 500$), the streamlines show the presence of four closed cells [Fig. 2(a)]. More precisely, the two big cells surmounting the open lines of the forced flow, engendered by shear effects, are located in the right (clockwise cell) and left (trigonometric cell) upper corner of the cavity. While the two small closed cells, located under the open lines and near the heated wall, are due to buoyancy forces and shear effect. Indeed, the heat evacuated by the hot wall is received by the open lines, via these small cells, and then transferred to the outlet of the cavity. A very limited qualitative effect can be observed in the flow structure by increasing ϕ from 0 to 0.07. The corresponding isotherms are generally tightened near the heated wall but especially from the inlet to the middle, indicating a good convective heat exchange, between the lower surface along its first half and the nanofluid. This behavior is in accordance with the imposed temperature profile at the bottom, which gives rise to a temperature higher than the average hot one, T'_H , as displayed in Fig. 1c. Also, the space above the open lines of the forced flow is at a uniform cold temperature. This aspect testifies to the absence of thermal interaction between the active wall and the others walls. The effect of ϕ is more perceptible in the region occupied by the small cells since the isotherms corresponding to pure fluid and $\phi = 0.07$ are spaced. An increase of Re up to 1000 leads to an increase in the size and intensity of the two lower cells as a result of the increase of the effect of forced convection [Fig. 2(b)]. A further increase of Re up to 3000 (dominating forced convection regime) promotes the lower cells as shown in Fig. 2c. This promotion occurs to the detriment of the open streamlines that become relatively straight. However, no changes have been noted about flow structures by passing from $\phi = 0$ to $\phi = 0.07$. The corresponding isotherms show that the addition of 7 % of nanoparticles to the base fluid affects clearly the temperatures distribution. Indeed, the presence of solid particles homogenizes relatively

the temperature within the thermally active zone of the cavity.

In the case of the suction mode, the effect of Re on the streamlines and isotherms is presented in Figs. 3a-3c for both pure water and Al_2O_3 -water. As shown in Fig. 3a, the streamlines obtained for low values of Re ($Re = 200$) show that the flow descends vertically from the upper horizontal inlet and then leaves the cavity horizontally through the vertical two outlets. Consequently, the open lines are parallel to the heated wall allowing more thermal interaction between the fluid and this wall. The structure is characterized too by the presence of two big closed cells surmounting the open streamlines. Such cells are straight and large in size and intensity compared to the upper cells presented in the injection mode (see Fig. 2a). These two cells, having opposite directions of rotation, reflect the considerable shearing effect. Moreover, it can be noticed that the dynamic field is symmetrical with respect to the median of the cavity. For both base fluid and nanofluid, the corresponding isotherms take the form of parallel and dense streamlines at the vicinity of the hot wall; which forms a very limited thermal boundary layer. Consequently, the heat released by the bottom hot wall is quickly and directly transferred to the exit through the thermal boundary layer without ascending under the buoyancy forces. In addition, the cold zone is larger in comparison with the other mode. It results from this behavior that the suction mode is thermally strong. A progressive increase of Re up to 1000 and 3000 [Figs. 3(b)-3(c)] (dominating forced convection regime) leads to a small increase in the size of the two closed cells as a result of the forced flow intensification. The isotherms show that the thermal boundary layer thickness is reduced in favour of the cold zone testifying the growing effect of the forced convection. Finally, it should be underlined that the presence of nanoparticles does not promote the change in the flow and thermal structures whatever the value of Re .

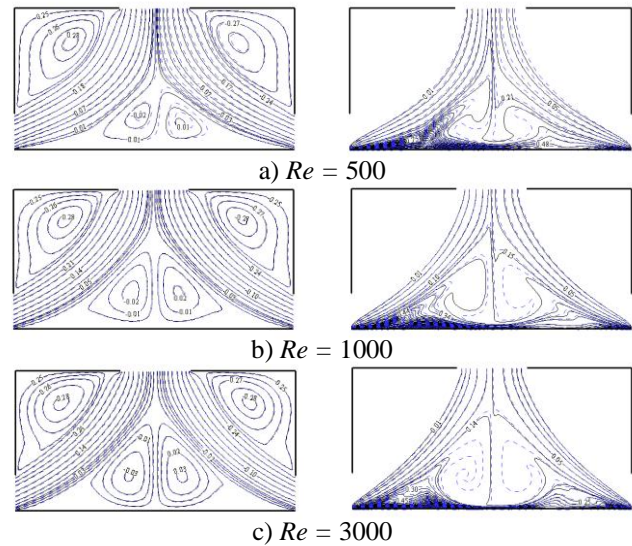


Fig. 2: Streamlines and isotherms, in the injection mode, for $\phi = 0$ (—) and $\phi = 0.1$ (- - -) at different values of Re : a) $Re = 500$, b) $Re = 1000$ and c) $Re = 3000$

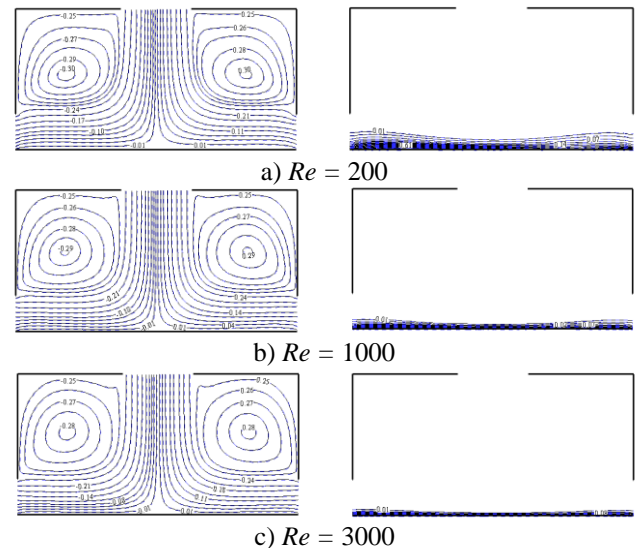


Fig. 3: Streamlines and isotherms, in the suction mode, for $\phi = 0$ (—) and $\phi = 0.1$ (- - -) at different values of Re : a) $Re = 200$, b) $Re = 1000$ and c) $Re = 3000$

In order to illustrate the performances of injection and suction modes in the heat removal, variations versus Re of the average Nusselt number evaluated along the heated wall, are presented in Fig. 4 for various values of ϕ . As

expected, this figure shows that globally, an increase of Nu with Re is observed for both injection and suction modes. The rate of this increase becomes more important from $Re \approx 500$ (an increase in the slope of the curves is observed from this threshold). This tendency is justified by the flow intensification with the inertia effect, promoted by the increase of Re . However, in the injection case, it can be noted that Nu remains almost constant as long as $Re < 500$. Such behavior is explained by the fact that natural convection dominates for this range of Re ($Re < 500$) and any increase in Re within this range has a negligible effect on heat transfer. This effect is due to the presence of the two convective cells between the entire heated wall and the open lines and consequently the delaying of heat released by the hot wall towards outside through the open lines. This singularity is absent in the suction mode where the forced flow remains directly in contact with the hot wall what involves a continuous increase in Nu with Re . For a fixed value of Re , the increase of the solid volume fraction ϕ up to 0.07 leads to a noticeable growing effect of the convection in both the injection and suction cases. This is due to the increase in effective thermal conductivity of the nanofluid with the increase in ϕ . More precisely, by increasing ϕ from 0 to 0.07, Nu is increased for the more favorable case, obtained for $Re = 3000$, from 38.76 / (91.15) to 41.47 / (98.72) for the injection / (suction) mode. Also, it should be noted that, in comparison with the injection mode, the fluid suction mode yields the best heat transfer performance. Quantitatively, for $\phi = 0.07$ and $Re = 2000$ passing from the injection mode to the suction one, Nu increases from 33.68 to 83.66 which corresponds to an enhancement in heat transfer of almost 2.5 times.

For practical reasons, the evaluation of mean temperature of the fluid inside the cavity is of a great importance. Thus, variations of this parameter with Re are plotted in Fig. 5 for both injection and suction modes and different values

of ϕ . Particularly, in the injection case, the average temperature \bar{T} increases by increasing Re up to a critical value $Re_c = 500$. This reheating of the cavity is justified by the constant value of the Nusselt number in this range of Re (see Fig.4 for the injection case). Then, this tendency is reversed because the growing of Re is marked by a decrease of \bar{T} ; this behavior is due to the forced convection predominant effect which drives out the heat towards the outside. For the other case (suction), the evolution of mean temperature \bar{T} with Re , is characterized by a notable decrease with increase in Re , and is due to the stronger convection heat transfer at higher flow velocities. For a fixed value of Re , we can see that the addition of nanoparticles contributes to reduce the average temperature within the cavity for the injection case only. Also, it is interesting to observe that the suction mode leads to a better cooling of the cavity since the resulting values of \bar{T} are lower than those obtained in the injection mode. For reasons of clarity, it is noted that, for $\phi = 0.07$ and $Re = 1000$, a reduction of about 86% of \bar{T} occurs when passing from the injection mode to the suction one.

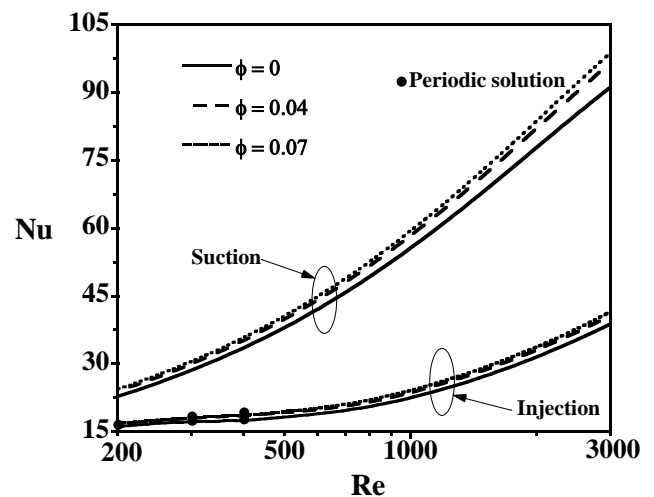


Fig. 4: Variations, with Re , of the average Nusselt number, Nu , for both injection and suction modes and different values of ϕ

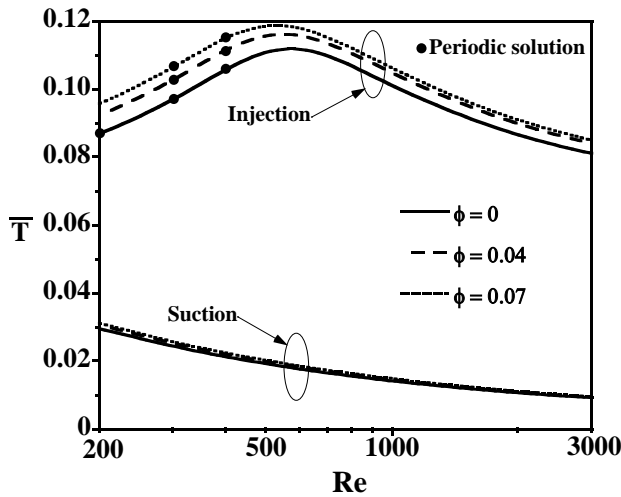


Fig. 5: Variations, with Re , of the mean temperature, \bar{T} , for both injection and suction modes and different values of ϕ

V. CONCLUSION

In the present work, a numerical study was performed to investigate laminar mixed convection of Al_2O_3 -water nanofluid in a horizontal multi-vented enclosure heated from the bottom by a sinusoidal hot temperature. The study was carried out by considering two modes of imposed external flow (injection and suction). From the study, it has been found that the flow and temperature patterns are affected by the ventilation mode. Also, the results illustrate that the suspended nanoparticles substantially increase the heat transfer rate through the cavity and the average temperature within the enclosure by applying both injection and suction modes. In addition to that, it is showed that the suction mode gives a better thermal efficiency and a better cooling effectiveness in comparison with the injection case.

References

[1] Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M. 2003. Buoyancy-Driven Heat Transfer Enhancement in a Two-Dimensional Enclosure Utilizing Nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 46. p. 3639-3653.

[2] Chandrasekar, M., Suresh, S., and Bose, A. C. 2010. Experimental Investigations and Theoretical Determination of Thermal Conductivity and Viscosity of Al_2O_3 /Water Nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 34. p. 210-216.

[3] Sebdani, S. M., Mahmoodi M., and Hashemi, S. M. 2012. Effect of Nanofluid Variable Properties on Mixed Convection in a Square Cavity. *International Journal of Thermal Sciences*. 52. p. 112-126.

[4] Abbasian, A. A., Sebdani, S. M., Mahmoodi, M., Ardeshiri A., and Aliakbari, M. 2012. Numerical Study of Mixed Convection Flow in a Lid-Driven Cavity with Sinusoidal Heating on Sidewalls using Nanofluid. *Superlattices and Microstructures*. 51(6). p. 893-911.

[5] Shahi, M., Mahmoudi, A. H., and Talebi, F. 2010. Numerical Study of Mixed Convective Cooling in a Square Cavity Ventilated and Partially Heated from the Below utilizing Nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37(2). p. 201-213.

[6] Mahmoudi, A. H., Shahi M., and Talebi, F. 2010. Effect of Inlet and Outlet Location on the Mixed Convective Cooling inside the Ventilated Cavity subjected to an External Nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 37(8). p. 1158-1173.

[7] Corcione, M. 2011. Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids. *Energy Conversion and Management*. 52(1). p. 789-793.

Matériaux intelligents par la technologie d'impression 3D: la fabrication intelligente

Morade OUHSTI¹, Benachir EL HADDADI¹, Soufiane BELHOUIDEG²

¹ *Laboratoire Développement Durable, Faculté des Sciences et Techniques, Université Sultan Moulay Slimane, Béni-Mellal, Maroc*

² *Equipe de Physique Appliquée et Nouvelles Technologies, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni-Mellal, Maroc*

Email : soufianebelhouideg@gmail.com

Résumé- *Avec l'avènement de la quatrième révolution industrielle (Industrie 4.0), l'innovation dans les technologies numériques devra s'accompagner d'avancées dans les procédés de fabrication et les matériaux. En effet, la fabrication additive ou Impression tridimensionnelle (3D) est une nouvelle technologie qui a un impact majeur sur l'innovation, la conception et les pratiques de fabrication. Elle est le pilier de l'industrie 4.0. Dans ce travail, nous présentons les principes fondamentaux de la technologie d'impression 3D et son utilisation dans la production de matériaux intelligents.*

Mots-clés *Impression 3D, fabrication intelligente, matériaux intelligents, capteurs.*

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, nous sommes en train de vivre la quatrième révolution industrielle qui va transformer les façons et les méthodes de production et de fabrication [1]. Nous sommes entourés des machines interconnectés, des véhicules autonomes et des robots intelligents. Même à l'intérieur de nous, nous vivons des changements dans notre façon de vivre, avec la surveillance de la santé, les prothèses motorisées, les technologies d'assistance augmentées, et même la connexion du cerveau avec les ordinateurs.

La première révolution industrielle a apporté des innovations mécaniques comme les machines à vapeur, la deuxième révolution industrielle a

introduit le concept de production de masse avec l'introduction des chaînes de montage, la troisième révolution industrielle a fait recours aux ordinateurs et Internet [1]. Actuellement, nous sommes dans l'ère de la quatrième révolution industrielle ou industrie 4.0 qui combine les puissances des avancées numériques comme les réseaux sans fil, l'informatique, le big data et l'intelligence artificielle d'une part; et les progrès physiques dans les matériaux intelligents, la nanotechnologie et l'impression 3D, d'autre part.

Les usines intelligentes adoptent les concepts de l'industrie 4.0 et de la fabrication intelligente en insérant des capteurs lors de la mise en forme de matériaux [2]. Avec l'avènement de l'informatisation de la fabrication, et l'appui d'autres technologies telles que l'Internet des objets, la fabrication numérique et les systèmes cyber-physiques, la mise en œuvre de la vision d'Industrie 4.0 se développe rapidement [3]. En parallèle des avancements dans l'implémentation numérique [4], la contrepartie physique comprennent des avancements dans les matériaux, les systèmes embarqués, les capteurs et les systèmes matériels [5]. L'intégration de ces

progrès dans des usines intelligentes pour les technologies de fabrication serait importante pour s'adapter rapidement et évoluer avec le rythme de l'innovation technologique, et continuer à produire des biens et des services de haute qualité.

Dans cet article, nous allons discuter le concept de matériaux intelligents. Ensuite, nous présentons les principes fondamentaux de la technologie d'impression 3D. De plus, nous discuterons les défis de cette technologie, et les directions de recherche possibles que la communauté scientifique peut poursuivre.

II. MATERIAUX INTELLIGENTS

Le développement de matériaux intelligents est un domaine potentiel pour faire avancer la surveillance des endommagements et de la durée de vie des structures. La production automatisée à haut volume de pièces intelligentes est l'une des technologies clés pour l'industrie de matériaux et la révolution industrielle 4.0. Les concepts modernes introduisent des parties intelligentes en intégrant les réseaux de capteurs dans le matériau. Ces réseaux enregistrent des signaux physiques différents et peuvent même travailler comme composants actifs [2]. Un scénario d'application populaire est la surveillance de la santé structurelle permanente [6]. Une étape d'intégration des composants électroniques est d'inclure une unité de transmission de données sans fil : ASIC (Application-Specific Integrated Circuit = circuit intégré propre à une application) et d'autres composants peuvent être intégrés dans le matériau composite avec succès (Voir figure 1 et figure 2):

- Une IrDA (Infrared Data Association) qui permet de transférer des fichiers avec l'infrarouge, est aussi peut être inclus dans le matériau.
- La radio-identification, le plus souvent désignée par le sigle RFID (de l'anglais radio frequency identification), peut être utilisée. La RFID est une méthode pour mémoriser et récupérer des données à distance en utilisant des marqueurs appelés « radio-étiquettes ».

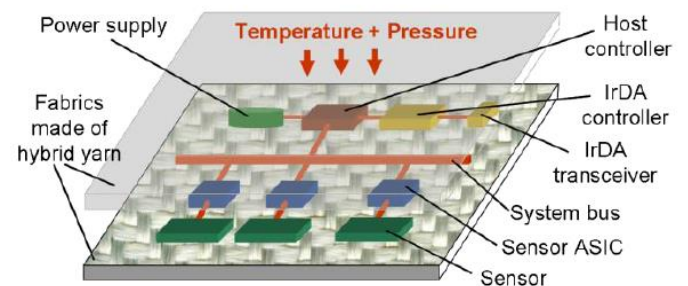


Fig. 1 Schéma de principe d'intégration d'un réseau de capteurs dans un composite renforcé de textile [7]

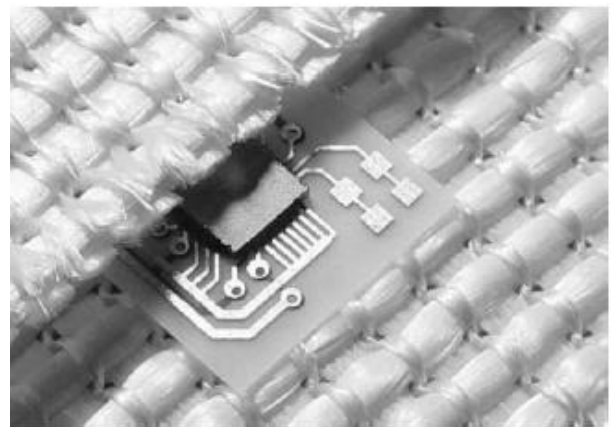


Fig. 2 Une ASIC entre les couches d'un composite renforcé de textile [7]

Pour améliorer la fiabilité dans l'utilisation de matériaux, il est essentiel de comprendre les réponses physiques et surveiller le rendement de chaque constituant dans le matériau sous des

sollicitations physiques et environnementales externes [2].

Un enjeu important pour le développement de matériaux intelligents est l'alimentation des appareils électroniques internes. Une façon de résoudre ce problème est d'utiliser des transpondeurs passifs (RFID). Ces transpondeurs sont en fonctionnement que s'ils sont alimentés par un champ électromagnétique extérieur qui est fourni par un dispositif de lecture. Ainsi, il a été un grand défi technologique que tous les composants électroniques et optiques résistent à la haute température et à la haute pression pendant le processus de consolidation. Aussi, le développement d'un produit ASIC spécial prend beaucoup de temps et il ne devient rentable qu'à partir d'une production de très haut volume.

III. IMPRESSION 3D

La fabrication additive ou l'impression 3D (en anglais Additive Manufacturing (AM)) est une nouvelle technologie utilisée pour produire des pièces en trois dimensions [8]. Il existe de nombreuses et différentes technologies, mais elles sont basées sur le même principe : l'objet 3D est créé en ajoutant le matériau couche par couche. Cette nouvelle technique de fabrication est diamétralement opposée aux méthodes de fabrication traditionnelles telles que fraisage ou tournage. Ces méthodes partent d'un bloc compact de matériau qui est usiné jusqu'à l'obtention de la pièce finale souhaitée par soustraction de matière (généralement par enlèvement de copeaux).

Il existe plusieurs techniques d'impression 3D où les principales différences entre elles sont la forme dans laquelle les couches sont déposées

pour créer des pièces et les matériaux utilisés. Les méthodes les plus connues de fondre ou ramollir le matériau pour produire les couches sont le frittage laser (Selective Laser Sintering SLS) et le dépôt de matière fondue (Fused Deposition Modeling, FDM). Autres techniques utilisent le principe de photo-polymérisation pour fabriquer des modèles comme la Stéréolithographie (SLA). Il existe également la fabrication d'objet par laminage (Laminated Object Modelling, LOM), qui consiste à découper des couches individuelles et, après, collées l'une sur l'autre [9].

Une gamme de matériaux tels que les polymères, les céramiques ou les métaux peut être utilisée par les imprimantes 3D [8]. Cependant, de nombreuses difficultés apparaissent dans la fabrication additive, telles que le coût élevé des machines commerciales, les restrictions de matériaux et l'optimisation de paramètres de l'impression [9].

Un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) est utilisé pour concevoir la pièce à imprimer. Aussi, le scanner 3D peut être utilisé pour récupérer la forme générale d'une pièce qui existe déjà. Ensuite le fichier CAO devra être exporté au format .STL (Standard Tessellation Language). Ce format ne décrit que la géométrie de surface d'un objet en 3 dimensions et ne comporte pas d'informations concernant la couleur, la texture ou les autres paramètres habituels d'un modèle CAO. Ensuite, le fichier .STL est traité par un logiciel spécifique fourni avec l'imprimante, qui découpe en tranches le fichier numérique et fourni à l'imprimante les informations nécessaires pour réaliser l'impression 3D. La pièce est définie par

un ensemble de données telles que l'épaisseur des couches, la quantité de matières, la vitesse d'impression... Généralement les informations sont écrites dans un langage appelé G-Code ; cela permet de piloter les machines-outils à commande numérique. Le processus de création d'un objet 3D est résumé sur la figure 3.

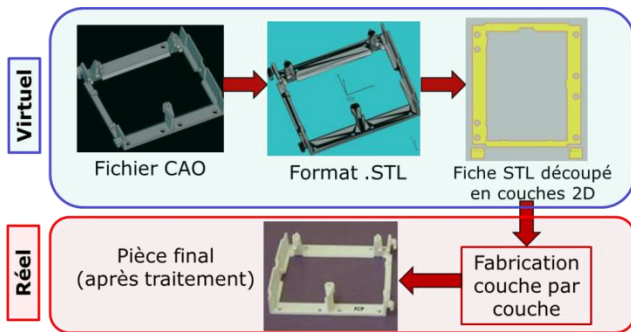


Fig. 3 Diagramme du processus de création d'un objet 3D

Cette technologie a un impact majeur sur l'innovation, la conception et les pratiques de fabrication dans les entreprises. La fabrication additive (AM) est utilisée dans plusieurs domaines tels que la médecine clinique (chirurgie dentaire / orthopédie), le génie civil, l'aéronautique, bijouterie et l'architecture [10, 11]. Généralement, l'impression 3D est utilisée pour le prototypage rapide dans l'industrie. En revanche, les industries qui fabriquent de petites séries comme l'aéronautique, commencent à l'utiliser pour fabriquer des pièces fonctionnelles [12]. Dans le secteur médical, l'impression 3D permet de réaliser des implants orthopédiques et des prothèses personnalisées [13].

On signale que l'impression 3D peut être utilisée avec succès pour créer des composants électroniques et des antennes de télécommunications. Pour l'électronique flexible,

les procédés d'impression ont évolué de la micro-architecture 2D à la micro-architecture 3D et même au 4D [5]. Des modèles complexes peuvent être fabriqués par la technologie de la fabrication additive (comme le montre la figure 4), ce qui est difficile à réaliser par d'autres méthodes [14].

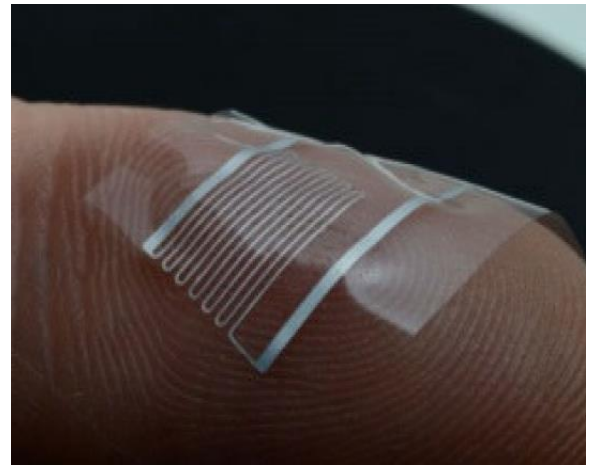
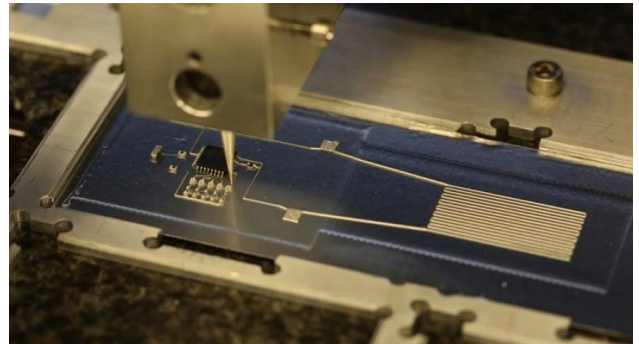


Fig. 4 3D Impression 3D de capteurs sur des surfaces flexibles [15]

IV. CONCLUSION

En plus des avancées en fabrication numérique, les innovations dans les méthodes et matériaux de fabrication seront importantes pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0. L'impression 3D est le pilier de l'industrie 4.0. C'est une nouvelle technologie qui peut être utilisée pour fabriquer de pièces de n'importe quelle forme et de

géométrie complexe. Pour créer un objet, un modèle numérique 3D est nécessaire. Ce modèle peut être réalisé par un logiciel CAO ou un scanner 3D, puis enregistré sous format STL et envoyé à l'imprimante 3D. L'impression 3D permet aux concepteurs et aux développeurs de passer de l'idée à un objet réel.

Les avancées récentes dans les procédés et les systèmes de fabrication ont été présentées dans cet article. Cependant, il reste encore des défis technologique à surmonter par la communauté scientifique tels que : production en masse de matériaux intelligents, résistance de composantes électroniques à la haute pression et à la haute température, alimentation de composantes électroniques inséré dans le matériau.

REFERENCES

- [1] Schwab, K. 2017. The fourth industrial revolution. Crown Business,
- [2] Belhouideg, S. and Lagache, M. 2018. Effect of Embedded Strain Gage on the Mechanical Behavior of Composite Structures. *Journal of Modern Materials* 5(1), p. 1-7.
- [3] Urbina Coronado, P. D., Ahuett-Garza, H., Morales-Menendez, R., Orta Castañón, P., Dávila, L. D. and Flores Escalera, M. R. 2017. Connectivity of a modular electric vehicle by the use of a mobile device. *Advances in Mechanical Engineering* 9(7), p. 1-9.
- [4] Chen, A., Dinar, M., Gruenewald, T., Wang, M., Rosca, J. and Kurfess, T. R. 2017. Manufacturing apps and the Dynamic House of Quality: Towards an industrial revolution. *Manufacturing Letters* 13(August 2017), p. 25-29.
- [5] Khoo, Z. X., Teoh, J. E. M., Liu, Y., Chua, C. K., Yang, S., An, J., Leong, K. F. and Yeong, W. Y. 2015. 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping* 10(3), p. 103-122.
- [6] Amezcua-Sanchez, J. P. and Adeli, H. 2016. Signal processing techniques for vibration-based health monitoring of smart structures. *Archives of Computational Methods in Engineering* 23(1), p. 1-15.
- [7] Heinig, A., Deicke, F., Kunadt, A., Starke, E. and Fischer, W.-J. 2010. Optical wireless data transmission with a sensor network integrated in a textile-reinforced composite. in: *Sensors*, 2010 IEEE, 965-969.
- [8] Ford, S. and Despeisse, M. 2016. Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production* 137(November 2016), p. 1573-1587.
- [9] Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar, A. and Hou, L. 2013. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67(5-8), p. 1191-1203.
- [10] Goyanes, A., Wang, J., Buanz, A., Martínez-Pacheco, R., Telford, R., Gaisford, S. and Basit, A. W. 2015. 3D printing of medicines: engineering novel oral devices with unique design and drug release characteristics. *Molecular pharmaceutics* 12(11), p. 4077-4084.
- [11] Manoharan, V., Chou, S. M., Forrester, S., Chai, G. B. and Kong, P. W. 2013. Application of additive manufacturing techniques in sports footwear. *Virtual and Physical Prototyping* 8(4), p. 249-252.
- [12] Bernard, A., Taillandier, G. and Karunakaran, K. 2009. Evolutions of rapid product development with rapid manufacturing: concepts and applications. *International Journal of Rapid Manufacturing* 1(1), p. 3-18.
- [13] Cronskär, M., Bäckström, M. and Rännar, L.-E. 2013. Production of customized hip stem prostheses—a comparison between conventional machining and electron beam melting (EBM). *Rapid Prototyping Journal* 19(5), p. 365-372.
- [14] Su, W., Wu, Z., Fang, Y., Bahr, R., Raj, P. M., Tummala, R. and Tentzeris, M. M. 2017. 3d printed wearable flexible SIW and microfluidics sensors for internet of things and smart health applications. in: *Microwave Symposium (IMS), 2017 IEEE MTT-S International*, 544-547.
- [15] Kumar, A. 2018. Methods and Materials for Smart Manufacturing: Additive Manufacturing, Internet of Things, Flexible Sensors and Soft Robotics. *Manufacturing Letters* 15(January 2018), p. 122-125.

Extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire organique à base de (P3HT : PCBM)

E. Chahid^{1,2}, N. Hamid², D. Agliz², M. Feddaoui², A. Komina³, A. Malaoui¹

¹ Equipe de Recherche en Electronique, Instrumentation et Mesures (E.R.E.I.M) & Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, Maroc.

² Laboratoire Génie de l'Énergie, Matériaux et Systèmes (LGEMS) & Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Agadir, Maroc.

³ Laboratoire de Physique, de Nanostructure (LPN) & Ecole Normale Supérieure, Marrakech, Maroc.

Email: chahid2016@yahoo.com

Résumé- Les cellules photovoltaïques organiques (PVO) suscitent depuis quelques années un intérêt croissant en tant qu'alternative possible au silicium et pourraient apporter de significatives réductions de coût. L'optimisation du rendement de conversion d'énergie des cellules PVO est basée sur la compréhension et l'analyse des paramètres limitatifs de leurs performances. Notre travail présenté porte sur l'extraction des paramètres électriques d'une cellule PVO à base de d'un polymère de poly (3-hexylthiophene) (P3HT) et [6,6]-phényl-C61-butanoate de méthyle (PCBM) à partir de la caractéristique expérimentale courant-tension. La cellule étudiée est modélisée par un circuit électrique à simple diode contenant un photocourant, une diode de courant de saturation et de facteur d'idéalité, une résistance série, une résistance parallèle. La technique d'extraction proposée de ces cinq paramètres électriques est effectuée par la méthode des moindres carrés linéaire. Les résultats du modèle de simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux dans les mêmes conditions de fonctionnement et d'environnement climatique et un bon accord a été observé entre les valeurs extraites et les caractéristiques courant-tension (I-V).

Mots-clés : Cellule photovoltaïque organique, modèle à une diode, paramètres électriques, extraction.

I. INTRODUCTION

Les cellules PhotoVoltaïques Organiques (PVO) ont attiré une attention significative, en raison de la fabrication peu couteuse et de la grande variété de fonctionnalité des matériaux organiques [1-3]. Les PVO n'ont pas pour but de remplacer les technologies existantes mais de venir les compléter en s'adaptant aux besoins du marché. Ses caractéristiques de mise en œuvre permettent d'espérer des applications nouvelles telles que des applications flexibles plus adaptées à l'architecture, ou encore permettre le

développement de technologies nomades adaptées aux téléphones et aux ordinateurs. Ce pendant, les cellules PVO présentent certains inconvénients qui limitent leur utilisation global dans le domaine de l'énergie solaire, tels que leur faible rendement de photoconversion et leur durée de vie limitée vie jugées inférieures à celles des cellules inorganiques. Ces inconvénients nécessitent par conséquent des améliorations pour parvenir à une fiabilité économique et un développement industriel à grande échelle. Dans ce but, des recherches sont activement menées pour améliorer ces points ainsi que pour faciliter la mise en œuvre des matériaux. Ainsi, les rendements de conversion ont doublé au cours des dix dernières années et de nombreux progrès ont été faits notamment concernant la stabilité des matériaux. La performance des cellules organiques dépend de la couche active constituée de matériaux organiques entre les électrodes. Au cours des deux dernières décennies, deux types de cellules solaires organiques ont été intensivement étudiés: celles qui utilisent une seule couche (monocouche) et celles construites avec un empilement de deux couches organiques (bicouches). La conduction de ces matériaux est assurée par la présence du système d'électrons π , ou d'électrons délocalisés sur l'ensemble du squelette de la macromolécule, confère aux systèmes conjugués des propriétés originales par rapport aux systèmes saturés. Par conséquent, la

délocalisation des électrons π induit une rigidité de la molécule ou d'une partie de la molécule et, inversement, une distorsion de la planéité des systèmes entraîne une diminution de la longueur de conjugaison. La conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande HOMO, d'une bande LUMO, d'une bande interdite [4].

Nous proposons dans cet article, contrairement à la littérature où les résultats sont seulement expérimentaux, une méthode d'estimation des paramètres électriques basé sur la méthode des moindres carrés linéaire pour déterminer les paramètres électriques de la cellule PVO. Cette technique a testée sur une cellule à d'hétérojonction Donneur/Accepteur formée d'un polymère de poly (3-hexylthiophene) (P3HT) qui constitue un semi-conducteur organique donneur et d'une macromolécule fullerene de butanoate de méthyle (PCBM) qui constitue un semi-conducteur organique accepteur.

II. STRUCTURE DES CELLULES PHOTOVOLTAIQUES ORGANIQUES

La structure d'une cellule bicouche type hétérojonction est représentée sur la figure 1. La cellule solaire à base de polymères est constituée d'un substrat en verre, d'une anode généralement en ITO (Oxyde d'Etain dopé Indium), d'une cathode métallique (Al), d'une bicouche active constituée de deux semi-conducteurs organiques de types différents dont l'un est un donneur « D » d'électrons et l'autre est un accepteur « A » d'électrons [5]. Cette hétérojonction développent une interface D/A capable de séparer les charges et les donneurs et accepteurs sont choisis du fait que Les niveaux HOMO et LUMO adaptés au transfert et au transport de charges. La couche donneur D est formée d'un polymère de poly (3-hexylthiophene) (P3HT) et la couche A est de grande molécule accepteur (PCBM). Ce choix de molécules pour avoir différence d'énergies entre les LUMO des donneur et accepteur menant à une performance Les électrodes sont choisies de

telle sorte que l'on obtienne des contacts ohmiques avec les films organiques. L'anode est en contact avec le donneur d'électrons et la cathode avec l'accepteur d'électrons. L'ITO est souvent utilisé comme électrode semi transparente, car d'une part, il présente une transmittance de plus de 85 % dans le visible et d'autre part il présente un contact ohmique avec certains matériaux transporteurs de trous (MPC, PTCDA...). L'électrode arrière est constituée de métaux comme Al, Ag ou d'alliage Mg:Ag,... qui permettent d'obtenir un contact ohmique avec les matériaux de type n.

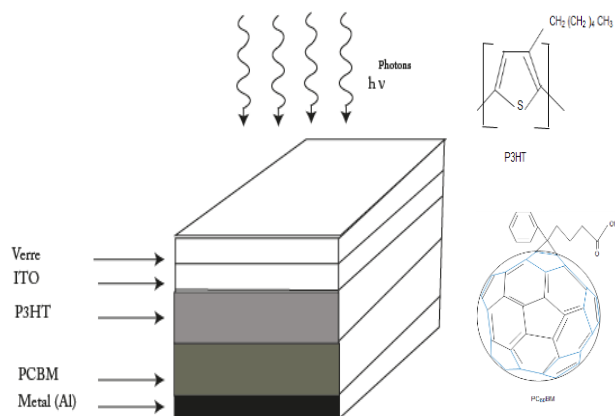


Fig.1. Structure d'une cellule hétérojonction organique.

III. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CELLULE SOLAIRE ORGANIQUES

Le principe général de fonctionnement d'une cellule à hétérojonction D/A, appelé aussi bicouche, est représenté sur la Figure 2 peut être décrit par les étapes suivantes :

1. ABSORPTION PHOTONIQUE

Lors du passage de la lumière dans la couche active de la cellule photovoltaïque, un photon peut être absorbé par cette couche pour produire une paire électron-trou nommée exciton. La création de cet exciton correspond à la transition d'un électron de la HOMO d'une molécule vers sa LUMO, transition permise par l'apport en énergie du photon absorbé.

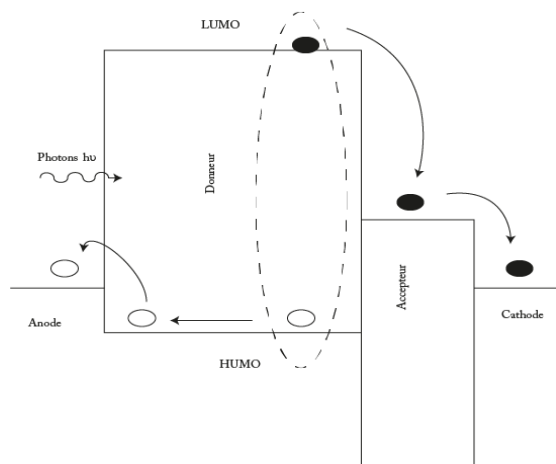


Fig.2. Schéma illustrant le fonctionnement de la PVO.

2. DIFFUSION DE L'EXCITON

L'exciton diffuse vers l'interface (donneur d'électrons /accepteur d'électrons) entre les matériaux organiques. Si les excitons sont générés à une distance inférieure à (appelée longueur de diffusion de l' exciton), ils peuvent diffuser jusqu'à l'interface, sinon ils se recombinent [6]. Cette grandeur varie d'un matériau à l'autre et est comprise entre 5 et 20 nm dans les matériaux organiques [7-8].

3. SEPARATION DES CHARGES

Lorsque les excitons rejoignent la jonction D/A, La dissociation de l'exciton se fait à l'interface entre les deux matériaux, on obtient alors une paire de polarons: une charge positive (trou) dans le donneur d'électrons et une charge négative (électron) dans l'accepteur[9]. Le facteur déterminant de la dissociation est la différence des niveaux d'énergie entre le niveau LUMO du donneur d'électrons et le niveau LUMO de l'accepteur d'électrons. Si la différence entre ces deux niveaux n'est pas d'au-moins 0.3 eV, la dissociation est peu probable. En revanche, au-delà de cette valeur, le transfert de charge s'effectue normalement et l'exciton est dissocié. En plus, Si la durée de vie de l'excitation est suffisante pour que l'exciton

rencontre un champ interne, il apparaît une séparation du trou et de l'électron. Cela signifie que l'excitation induite par l'absorption de la lumière ne conduit pas directement à la création des porteurs de charges électriques libres. Pour dissocier les excitons créés par l'absorption de la lumière, nécessite une énergie supérieure à l'énergie de liaison de la paire électron-trou. Dans les semi-conducteurs organiques, cette énergie de liaison est fonction du matériau et peuvent varier de 0.1 ev à 1.6 ev. De ce fait, à température ambiante, aucune dissociation thermique n'est envisageable, contrairement aux semi-conducteurs inorganiques, dont l'énergie des excitons n'est que de quelques millivoltes.

4. TRANSPORT DES CHARGES VERS LES ELECTRODES.

Le transport des porteurs de charges électriques vers les électrodes est assuré par le donneur d'électrons pour les trous et par l'accepteur d'électrons pour les électrons. Les matériaux organiques, sont plus connus pour leurs propriétés isolantes. Les valeurs publiées, qui silicium monocristallin [11]: $\mu_e = 500 \text{ cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ et $\mu_h = 450 \text{ cm}^{-2}\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ Le PCBM est un semi-conducteur oraganique de type -n, possédant une mobilité d'électrons entre 2×10^{-3} et $4.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [12-14]. Cette mobilité augmente d'un facteur 2 quand il est mélangé avec des polymères.

5. COLLECTE DES CHARGES AUX ELECTRODES

Pour collecter les électrons et les trous dans les matériaux accepteurs et donneurs respectivement, on utilise des électrodes métalliques. Les métaux dont le travail de sortie est faible (Al, Ag, Ca) sont utilisés pour collecter les électrons et quant aux métaux à fort travail de sortie (Au, Pt) pourront être utiliser pour collecter les trous. Cependant, pour les cellules solaires, une des deux électrodes devra impérativement être transparente pour laisser passer la lumière. Actuellement, la cathode la plus utilisée dans les cellules solaires organiques est l'oxyde d'indium et d'étain ITO (Indium Tin Oxyde- oxyde

d'indium et d'étain) dont la largeur de la bande interdite est de 3.7 eV et dont le travail de sortie est compris entre 4.5 et 4.9 eV.

IV. DIAGRAMME D'ENERGIE DES ORBITALES FRONTIERES

Dans le cas des matériaux organiques, et par analogie avec les semi-conducteurs inorganiques, on assimile l'orbitale moléculaire la plus haute occupée (HOMO pour Highest Occupied Molecular Orbital) avec la bande de valence (BV) et l'orbitale moléculaire la plus basse non occupée (LUMO pour Lowest Unoccupied Molecular Orbital) avec la bande de conduction (BC). La HOMO est constituée des niveaux électroniques liants π , quant à La LUMO est constituée des niveaux électroniques antiliants π^* vacants. Les bandes HOMO et LUMO ainsi établies permettent alors de définir l'énergie d'oxydation de la molécule ou potentiel d'ionisation (I_p), l'affinité électronique (AE) et la largeur de la bande interdite ou band gap (E_g) comme étant la différence d'énergie entre les bandes permises (Figure 3). Le PCBM est un semi conducteur de type -n, de niveaux d'énergies se situent à la position -3.7 eV pour la LUMO et -6.1 eV pour la HUMO. De même le P3HT est un semi-conducteur de type-p de niveaux d'énergies sont pour la LUMO se

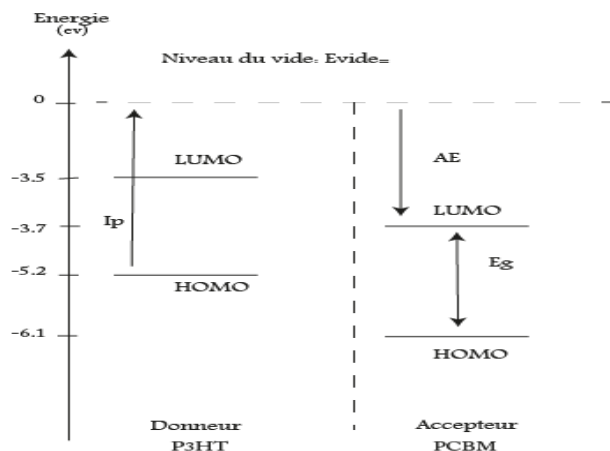


Fig.3. Diagramme d'énergie des polymères donneur et accepteur utilisés dans la cellule étudiée[15].

située à la position -3.5 eV et quant à la HUMO est à -5.2 eV. LA TENSION DE CIRCUIT OUVERT V_{oc} peut être déterminée facilement de la différence entre le niveau LUMO du donneur et le niveau HOMO de l'accepteur (Figure 3).

V. CARACTERISATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE PVO

5.1. SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE E

Si l'on considère le cas simple d'une cellule idéale à jonction donneur-accepteur soumise à un flux lumineux, celle-ci fonctionne comme un générateur de courant. Son schéma équivalent (Figure 4) est représenté par une diode idéale montée en parallèle avec une source de courant. R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe $I(V)$ au point V_{co} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$). R_{sh} est une résistance parallèle liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe $I(V)$ au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$). Pour minimiser les pertes, il faut diminuer R_s et augmenter R_{sh} . Le cas idéal est représenté par R_{sh} égale à l'infini et R_s égale à zéro [16]. Le circuit électrique équivalent est donné par figure 4.

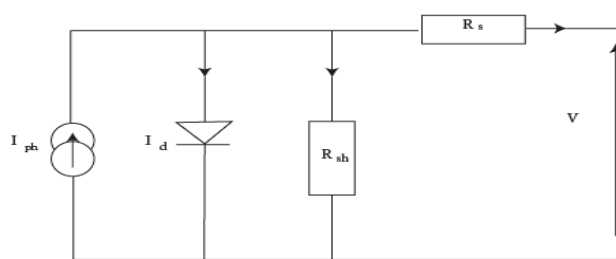


Fig4: Equivalent circuit scheme for an organic solar cell

Le modèle à une diode a été proposé par B. Mazhari pour modéliser les cellules solaires organiques [17-19], le circuit électrique équivalent est montré dans la figure (4). Ce modèle contient un générateur à photo-courant

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

I_{ph} , une diode qui représente le courant de diffusion de Shockley [20], avec son courant de saturation I_0 et son facteur d'idéalité n , deux résistances parasites: la résistance série R_s et la résistance parallèle R_{sh} . L'équation de la caractéristique I(V) de la cellule est:

$$I(V) = I_{ph} - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} - I_0 \left[\exp\left\{\frac{q}{nKT}(V + IR_s)\right\} - 1 \right] \quad (1)$$

Où, q est la charge électrique, k est la constante de Boltzmann et T est la température en Kelvin.

5.2. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Le soleil est modélisé par un corps noir hors atmosphère émet un rayonnement sphérique sous forme d'onde électromagnétique de longueur d'onde λ possédant une énergie E liée à λ .

Le rayonnement solaire (hors absorption atmosphérique), est assez proche du rayonnement du corps noir à $T = 6000K$, donc son flux d'émission (F) ou la puissance issue initialement de la surface du soleil traverse ultérieurement une sphère de rayon R , obéit à la loi de Planck.

La loi de Planck donne la répartition suivant la longueur d'onde du flux émis (F) d'un corps noir à la température T .

$$F_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp((hc/\lambda kT) - 1)} \quad (2)$$

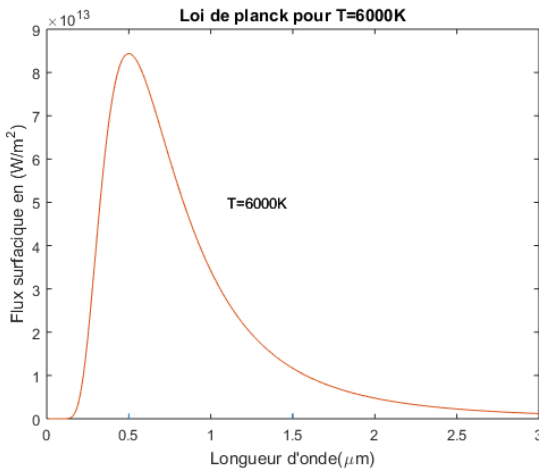


Figure 5. Rayonnement solaire hors absorption atmosphérique à $T = 6000 K$

La loi de Stefan est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde. Ce qui donne :

$$\int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp((hc/\lambda kT) - 1)} d\lambda = \sigma T^4 \quad (3)$$

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^4$ est la constante de stefane. On vérifie que pour le soleil ($T= 5770K$), le maximum de l'émission se situe dans le visible alors que pour la Terre il se situe dans l'infrarouge.

- Pour $T= 6000K$, on a $F_i=73\ 000\ kW.m^{-2}.K^{-4}$.
- Pour $T=300K$, on a $F_i=459\ W.W.m^{-2}.K^{-4}$.

La puissance reçue, hors atmosphère, est en moyenne d'environ $1360\ W/m^2$ pour une direction perpendiculaire au rayonnement. Elle est noté AM_0 (Air Masse 0). Après la traversée de l'atmosphère, cette puissance diminue, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau et on définit de nouvelles références: $AM_{1.5}$ et AM_2 (ou le rayonnement a traversé 1.5 et 2 fois l'épaisseur de l'atmosphère). Ainsi, La puissance reçue à la surface de la terre $AM_{1.5}$ standard est de l'ordre de $100\ mW/cm^2$ est la référence pour le calcul énergétique au sol. Dans les cellules PVO, le matériau doit absorber les photons au cours de leur propagation dans le matériau. L'atténuation du flux absorbé des photons, en profondeur (x) et la longueur d'onde, est décrite par la loi de Beer-Lambert [21].

$$\phi(\lambda, x) = (1 - R(\lambda))\phi_0(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (4)$$

Où α est le coefficient d'absorption du semi-conducteur, $\phi_0(\lambda)$ le flux de photon incidents d'énergie E , c'est-à-dire de longueur d'onde $\lambda(\mu m) = 1.24/E(eV)$, $R(\lambda)$ le coefficient de réflexion du semi-conducteur pour le rayonnement d'énergie E . Les photons d'énergie supérieure au gap du matériau entrant dans le semi-conducteur génèrent des paires électron-

trous. Le nombre de paires électron-trous créées par seconde est

égal au nombre de photons disparus. Le taux de génération de paires électron-trous est donc le taux de disparition des photons [22] :

$$g(\lambda, x) = (1 - R(\lambda))\phi_0(\lambda)\alpha(\lambda)\exp(-\alpha(\lambda)x) \quad (6)$$

Obtenu par la dérivation du flux:

$$g(E, x) = -\frac{d\phi(E, x)}{dx} \quad (5)$$

VI. PARAMETRES INFLUENÇANT SUR LE RENDEMENT D'UNE CELLULE PVO

Les cellules solaires sont caractérisées par la courbe représentant la densité de courant en fonction de la tension appliquée sous illumination et dans l'obscurité (Figure 6). La performance d'une cellule solaire est évaluée en mesurant quatre caractéristiques principales : la tension de circuit ouvert (V_{oc}), la densité de courant de court circuit (J_{sc}), le facteur de forme de la courbe (FF) et le rendement de conversion (η).

- La tension de circuit ouvert V_{oc} :

Elle correspond à la tension mesurée lorsque le courant généré par le dispositif est nul. Cette tension est proportionnelle à l'écart entre la HOMO du composé donneur et la LUMO du composé accepteur. Elle est cependant influencée par la recombinaison des charges qui ne peut être totalement évitée et qui va donc provoquer une diminution de V_{oc} .

- La densité de courant de court-circuit :

La densité de courant de court-circuit J_{sc} correspond à la densité maximale générée par le dispositif sous illumination. Il est mesuré lorsque la tension appliquée aux bornes du dispositif est nulle. Sa valeur dépend du nombre de photons absorbés par le matériau et donc de l'épaisseur de la couche active ainsi que de son spectre d'absorption. La mobilité des porteurs de charge et l'efficacité de la séparation des charges à l'interface donneur/accepteur jouent aussi un rôle important sur la valeur du J_{sc} .

- Le facteur de forme de la courbe (FF) :

Le facteur de forme correspond au rapport de puissance maximale sur la puissance théorique idéale. Il informe sur la capacité du transport des charges dans le dispositif et sur la qualité de l'interface entre le donneur et l'accepteur. On peut définir le facteur de remplissage ou facteur de forme FF par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot J_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot J_{max}}{V_{oc} \cdot J_{cc}} \quad (7)$$

- Le rendement de conversion (η) :

Il est déterminé par le rapport de la puissance maximale délivrée par le dispositif sur la puissance lumineuse incidente P_{in} . C'est le rendement énergétique externe de conversion de puissance. Il est défini par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot J_{cc}}{P_{in}} \quad (8)$$

Ce rendement peut être optimisé en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. C'est un paramètre essentiel, car la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule.

- Le rendement quantique (EQE) :

Il est défini comme étant le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons perdus par transmission à travers toute l'épaisseur de la cellule (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (Internal Quantum Efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (External Quantum Efficiency). Le rendement quantique externe est défini comme suit :

$$EQE(\lambda) = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\phi(\lambda)} \times \frac{hc}{\lambda e} \quad (9)$$

où $\phi(\lambda)$ est le flux lumineux incident, e la charge de l'électron et E_{ph} l'énergie du photon

(avec $E_{ph}(\lambda) = \frac{hc}{\lambda}$, h étant la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde). En remplaçant les trois constantes par leurs valeurs numériques, on obtient :

$$EQE(\lambda) = 1.24 \times \frac{J_{cc}(\lambda)}{\lambda \times \phi(\lambda)} \quad (10)$$

où J_{cc} est exprimé en $A.cm^{-2}$, $\phi(\lambda)$ en $W.cm^{-2}$ et λ en μm .

VII. LA METHODE DES MOINDRES CARES (LSM)

L'extraction des paramètres électriques des jonctions D/A des cellules PVO est effectuée par nombreuses techniques. Les méthodes les plus utilisées sont la méthode graphique[23], la méthode de Newton-Raphson [24] et celle de Levenberg Marquardt [25]. Par la suite, nous utiliserons la méthode des moindres carrés linéaire (Least Mean Square LMS) [26].

Le principe de la méthode des moindres carrés consiste à minimiser la somme des carrés des écarts E appelée fonction objective, entre les N mesures expérimentales (I_i^{exp}, V_i^{exp}) et le l'ensemble de N résultats $I_i^{th}(V_i^{exp})$ issu du modèle analytique prédéterminé basé sur l'équation (1).

$$\text{Avec: } E = \sum_{i=1}^N (I_i^{exp} - I_i^{th})^2 = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i^2$$

Où $\varepsilon_i = I_i^{exp} - I_i^{th}$: le résidu et $N =$ nombre de points mesurés. La minimisation de la fonction objectif ne peut pas être fait de manière analytiquement intuitive en raison de la forte non-linéarité de la caractéristique $I(V)$. D'où les méthodes numériques pour la régression non linéaire basée sur le principe des moindres carrés pour estimer d'une manière optimale les paramètres électriques I_{ph}, I_s, R_s, R_{sh} et n .

Le principe de la méthode des moindres carrés (Least Mean Square LMS) [27] consiste à approximer la caractéristique I-V par deux

droites linéaires dans les deux régions de tensions suivantes :

Pour les tensions basses et négatives, l'équation (1) peut se simplifier sous la forme :

$$I_c = I_{pA} + G_A V \quad (11)$$

Ou, $I_{pA} = \frac{I_{ph}}{1+G_{sh}R_s}$, $I_0 = \frac{I_s}{1+G_{sh}R_s}$, $G_A = \frac{G_{sh}}{1+G_{sh}R_s}$, $G_{sh} = \frac{1}{R_{sh}}$. La régression linéaire permet d'évaluer I_{pA} et G_A .

Pour les tensions assez grandes $((V + IR_s) \gg kT)$, le comportement de la caractéristique $I(V)$ est exponentiel; le courant à travers la cellule s'écrit comme suit:

$$I(V) = I_{pA} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q}{nKT} (V + IR_s) \right\} - 1 \right] \quad (12)$$

Pour évaluer la résistance série R_s , le facteur de qualité n et le courant de saturation I_s , on utilise I au lieu de V comme une variable indépendante dans l'équation (12), et nous obtenons :

$$V(I) = \frac{n}{\beta} \ln \left(\frac{I_{pA}}{I_0} \right) - R_s I + \frac{n}{\beta} \ln \left(1 - \frac{I_c}{I_{pA}} \right) \quad (13)$$

VIII. RESULTATS

Dans la suite, nous présentons les résultats obtenus grâce à l'application de la méthode des moindres carrés (LSM). Le test d'application a été appliqué sur la cellule PVO formée de l'hétérojonction D/A (P3HT/ PCBM) qui est représenté par les cinq paramètres électriques $[I_{ph}, I_0, R_s, R_{sh}, n]$ selon le modèle à une diode. Les paramètres PV extraits, à partir des données mesurées (I_i, V_i) de la cellule PVO de structure P3HT: PCBM, sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau I
Paramètres calculés basés sur la courbe I(V).

Paramètres électriques	Nos calculs	Ref [28]
$I_{ph}(mA)$	6.59	6.4
$I_s(A)$	1.46×10^{-14}	2.21×10^{-12}
n	0.84	1.068
$R_{sh}(\Omega)$	1038.13	36400
$R_s(\Omega)$	38.85	38.24

La figure 5 représente la caractéristique expérimentale I(V) et celle calculée à partir de l'équation (1). Les courbes obtenues montrent une bonne concordance entre nos résultats théoriques et ceux donnés par l'expérience [28], ce qui prouve la validité de notre technique numérique d'extraction utilisée.

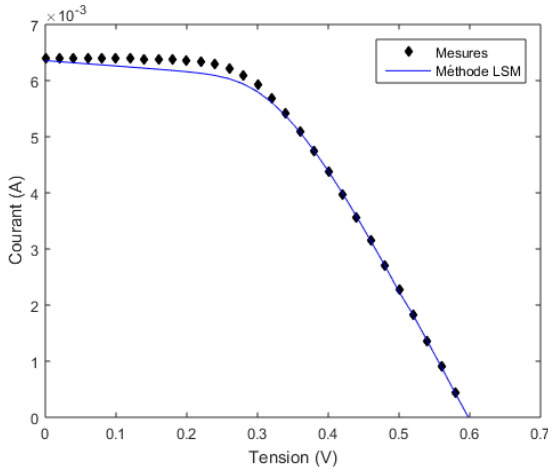


Fig.5. Caractéristiques I-V expérimentale et calculée de la cellule PVO à base de P3HT:PCBM.

La courbe de la variation de la puissance électrique produite par la cellule est représentée sur la figure 6 lorsqu'elle est soumise aux Conditions Standard de Test (STC), éclairement solaire de 1000 W/m², température de la cellule PVO égale à 25°C et de répartition spectrale du rayonnement dit AM=1,5.

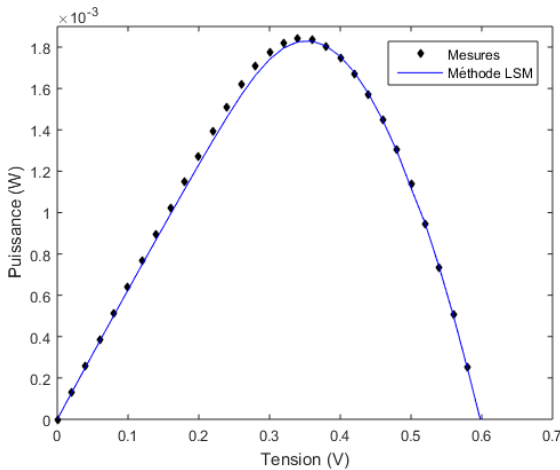


Fig. 6. Caractéristiques P-V expérimentale et calculée de la cellule à base de P3HT:PCBM.

A partir de cette caractéristique, la puissance maximale fournie par 1cm² de la cellule est de 1.82 mW. Le tableau 2 présente les valeurs des paramètres photovoltaïques de la cellule solaire obtenues à partir de la caractéristique P-V.

Tableau II
Paramètres électriques de la cellule PVO.

Paramètres électriques	Nos calculs
$V_{oc}(V)$	0.6
$P_m(mW/cm^2)$	1.82
$FF(\%)$	46.02
$\eta(\%)$	1.82

Ce résultat est en accord avec les résultats rapportés dans des études réalisées par plusieurs chercheurs [28]. L'énergie électrique produite par cette cellule PVO est très faible, ceci peut être expliqué par le fait que l'absorption des polymères constituant la couche active est d'une faible gamme des spectre d'absorption en UV-visible. En effet, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur; c'est pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a). De plus, les polymères de bas-gap sont définis comme des polymères absorbant la lumière avec des longueurs d'onde au-dessus de 600 nm. Les polymères traditionnels utilisés dans les photovoltaïques organiques, tel que le P3HT, ont une absorption qui se prolongent aux longueurs d'onde de 650 nm[29, 30]. Enfin, la déconjugaison du polymère explique la perte d'absorbance dans le visible et donc la décoloration de l'échantillon constatée à l'échelle macroscopique.

IX. CONCLUSION

Dans ce travail, nous sommes intéressés à l'extraction des paramètres électriques d'une cellule solaire organique de configuration ITO/(P3HT :PCBM)/Al à partir de la caractéristique expérimentale courant-tension (I-V). Le modèle à une diode de l'hétérojonction D/A a été choisi pour caractériser toutes les propriétés et les phénomènes physiques qui se produisent dans la cellule. La technique développée à base de l'algorithme de la méthode des moindres carrés a été effectuée pour extraire les cinq paramètres électriques [I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} , n] décrivant la cellule PVO à base de P3HT: PCBM. Les résultats obtenus sont : la densité de photocourant I_{ph} est de 6.59 mA, la tension de circuit ouvert $V_{oc}(V)$ est de 0.6 V, avec un rendement de conversion égale à 1.82%. Ce résultat obtenu est en bon accord avec la littérature éditée auparavant et qui a permis, en outre une meilleure maîtrise des performances des cellules organiques, en vue de leur amélioration.

References

- [1] B imitrakopulos, C.D and Malenfant, P.R.L. 2002. Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics. *Advanced Materials*. Vol. 14 (2), 99 – 117.
- [2] A.J. Mozer, A.J., and Sariciftci, N.S. 2006. *Conjugated Polymer Photovoltaic Devices and Materials*. *Comptes Rendus Chimie*. 9 (5-6), 568 – 577.
- [3] Galagan Y.J., Andriessen R., Rubingh, E., Grossiord N, Blom P. 2010. Toward fully printed Organic Photovoltaics: Processing and Stability. In *Proceedings LOPE-C 2010*: 88-91.
- [4] Moliton, A. 2003. *Optoélectronique Moléculaire et Polymère: des concepts aux composants*, Springer .
- [5] Nunzi, J.M. 2002. *Organic Photovoltaic Materials and Devices*. *Comptes Rendus Physique*. 3, 523 - 542
- [6] Ravi Kishore, V.V.N., Aziz, A., Narashiman, K.L., Periazamy, N., Meenakshi, P.S., Wategaonkar, S. 2002. *On the assignment of the absorption bands in the optical spectrum of Alq3*. *Synthetic. Metals*. 126, 2-3,199-205.
- [7] Theander, M., Yartsev, A., Zigmantas, D., Sundström, V., Mammo, W., Andersson, M.R., et Inganäs, O. 2000. *Photoluminescence quenching at a polythiophene /C₆₀ heterojunction*. *Physical. Review B*. 61, 12957.
- [8] Kroeze, J.E., Savenije, T.J., Vermeulen, M.J.W. et Warman, J.M. 2003. Contactless Determination of the Photoconductivity Action Spectrum, Exciton Diffusion Length, and Charge Separation Efficiency in Polythiophene-Sensitized TiO₂ Bilayers. *Journal Physical Chemistry B*. 107, 7696.
- [9] Lemaur, V., Steel, M., Beljonne, D., Brédas, J.L., Cornil, J. 2005. Photoinduced Charge Generation and Recombination Dynamics in Model Donor/Acceptor Pairs for Organic Solar Cell Applications: A Full Quantum-Chemical Treatment. *Journal of the American Chemical Society*. 127, 6077-6086.
- [10] McCulloch, I. 2004. Low-threshold lasers based on a high-mobility semiconducting polymer. *Applied. Physics. Letters*. 85, 3890.
- [11] Caironi, M., Agostinelli, T., Natali, D., and Sampietro, M., Cugola, R., Catellani, M., and Luzzati, S., External quantum efficiency versus charge carriers mobility polythiophene/methanofullerene based planar photodetectors. 2007. *Journal. Applied Physics*. 102, 024503.
- [12] Mihailtchi, V.D., Van Duren, J.K.J., Blom, P.W.M., Hummelen, J.C., Janssen, R.A.J., Kroon, J.M., Rispen, M.T., Verhees, W.J.H., Wienk, M.M. 2003. *Adv. Funct. Mater*. 13, 43.
- [13] Waldauf, C., Schilinsky, P., Perisutti, M., Hauch, J., Brabec, C.J. 2003. *Adv. Mater*. 15, 208.
- [14] Pacios, R., Nelson, J., Bradley, D.D.C., Brabec, J.C. 2003. *Appl. Phys. Lett*. 83, 4764.
- [15] Monestier, F. 2008. Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques. Thèse de Doctorat. Université Paul Cézanne Aix Marseille III. France.
- [16] Shrotriya, V., EHE, Wu., Li, G., Yao Y., Yang, Y. 2006. Efficient light harvesting in multipledevice stacked structure for polymer solar cells. *Appl.Phys. Lett*. 88, 064-104.
- [17] Katz, E.A., Gevorgyan, S., Orynbayev, M.S., and Krebs, F.C. 2006. Out-door testing and long-term stability of plastic solar cells. *Eur. Phys. Appl. Phys*. 36, 307–311.
- [18] Yadir, S., Assal, S., Khaidar, M., Sidki, M., Benhmida, M., Malaoui, A. 2011. Extraction of Solar Cell Physical Parameters Model with Double Exponential from Illuminated I-V Experimental Curve. *Global Journal of Physical Chemistry*. pp 236-240,
- [19] Mazhari, B. An improved solar cell circuit model for organic solar cells. 2006. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 90, 1021-1033.
- [20] Maoucha, A. 2011. Etude et identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique. Thèse de Doctorat. Faculté de la technologie. Université de Batna.
- [21] Charles, J. P., Mekkaoui-Alaoui, I., Bordure, G., and Mialhe, P. 1984. Etude comparative des circuits équivalents à une ou deux diodes en vue d'une simulation précise des photopiles. *Revue de Physique Appliquée*. 19, 851-857.
- [22] Sayad, Y. 2009 Détermination de la longueur de diffusion des porteurs de charge minoritaires dans le silicium cristallin par interaction lumière matière. Thèse de Doctorat. N°Ordre 2009-ISAL-0053. Institut national de sciences appliquées de Lyon.

- [23] Malaoui, A., Barah, E., and Antari, J. 2016. Implementation of a new approach for modeling and determining the electrical parameters of solar cells. *International Journal of Innovation and Applied Studies*. 15 (2), 329-338.
- [24] Cheknane, A., Hilal, H., Djeflal, F., Benyoucef, B., Charles, J. P. 2008. An equivalent circuit approach to organic solar cell modelling. *Microelectronics Journal*. 39, 1173–1180.
- [25] Malaoui, A., Elmansouri, A. 2010. Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions. *Revue des Energies Renouvelables CDER*, Vol. 13, 2.
- [26] Khalis, M., Mir, Y., Hemine, J., and Zazoui, Z. Extraction of equivalent circuit parameters of solar cell: influence of temperature. 2011. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 54, 10102.
- [27] Bouzidi, K., Chegaar, M., and Bouhemadou, A. 2007. Solar cells parameters evaluation considering the series and shunt resistance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 91, 1647-1651.
- [28] Jain, A., and Kapoor, A. 2005. A new method to determine the diode ideality factor of real solar cell using Lambert W-function. *Solar Energy Materials and Solar Cell*. 85, 391-396.
- [29] Dang, M. T., Hirsch, L. and G. Wantz. 2011. P3HT:PCBM, best seller in polymer photovoltaic research. *Adv. Mater.* 23, 3597–3602.
- [30] Pasquier, A. D., Unalan, H. E., Kanwal, A., Miller, S. and M. Chhowalla. 2005. Conducting and transparent single-wall carbon nanotube electrodes for polymer-fullerene solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 87, 203511.

HEAT TRANSFER OF NON-LINEAR VISCOELASTIC FLUID IN SQUARE CAVITY HEATED FROM VERTICAL WALLS

H.DAGHAB¹, M. NAÏMI¹, M.KADDIRI¹, M. LAMSAADI¹, H.ELHARFI¹, S. RAGHAY²

¹ Laboratoire de Modélisation Ecoulements et des Transferts (LAMET), Université Sultan Moulay Slimane, Faculté des Sciences et Techniques, Béni-Mellal, Maroc.

² Département de Mathématiques et Informatique, Faculté des Sciences et Techniques Gueliz, Marrakech, Maroc.
h.daghab@gmail.com

Abstract- In this work, we have numerically studied the natural convection of viscoelastic fluids in square cavity. For modeling the behavior of the flow related to the viscoelastic fluid which includes both the effects of elasticity and shear thinning, the constitutive equation of Oldroyd-B model is used. Also boundary conditions are different temperature at the vertical walls and the horizontal sides are adiabatic. For the resolution of the problem finite volume method (FVM) is proposed on staggered grid to discretize the conservation and constitutive equations. The main purpose of the present study is to examine the effects of elastic property on the flow and the heat transfer.

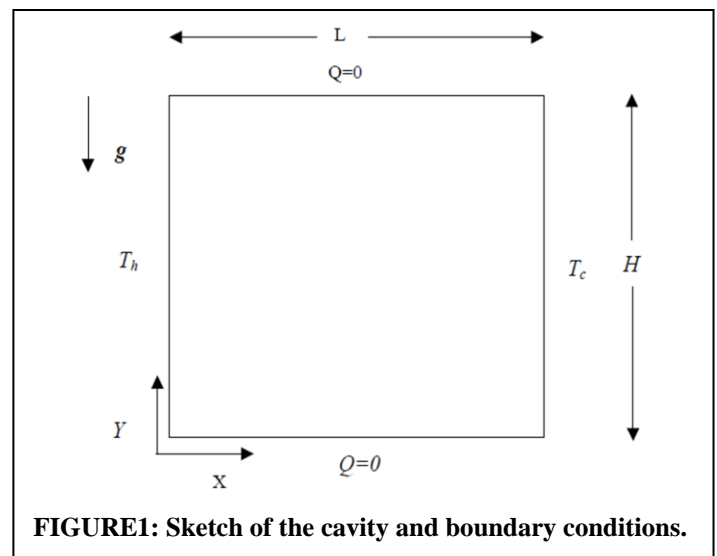
Mots-clés : Viscoelastic fluid, Natural convection, Oldroyd-B, Finite volume, Numerical method.

I. INTRODUCTION

The study of viscoelastic flows are very important due to its wide range of applications in many processes in industry, geophysics and nature, such as polymer melt flow in the plastics processing, molding and injection of polymer, chemical processing and transmission, and the dynamic of earth's mantle, etc. C.H. Hsu and T.Y. Chou [1] have mentioned a widely expanded domain of applications, the flow characteristics of viscoelastic fluids have been found to be includes both the effects of shear-thinning and elasticity as well its mathematical modeling is complicated than that of Newtonian fluid. Among these flows we often find the non-isothermal flows, and it's interesting to study the natural convection when the temperature gradient induces the movement of fluid, in the literature; natural convection occupies a wide range because of its amply existence in

engineering applications, solar collector technology, electronic cooling problems and sterilization of foods, etc.

The present work is concerned the mathematical modeling and numerical simulation of natural



convection of confined viscoelastic fluid in rectangular cavity submitted to different temperatures on its sides, The solute buoyancy forces are assumed to be induced by temperature gradients.

II. GOVERNING EQUATIONS

The mathematical modeling for steady, incompressible and non isothermal flow of viscoelastic fluid, in a rectangular cavity into-

dimensional Cartesian coordinate system (x,y), given as follow:

$$\text{div } u = 0 \tag{1}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla P + \nabla \cdot S + f \tag{2}$$

$$\rho C_p (u \cdot \nabla)T = k \Delta T + \phi \tag{3}$$

Where u is the velocity vector, p represents the pressure, T represents the temperature field, ρ, C_p and k represent the density, specific heat capacity and thermal conductivity respectively, S is the extra-stress tensor which given by the constitutive equation, and defined as:

$$S = \sigma + \tau \tag{4}$$

Where σ is the Newtonian part of the extra-stress tensor and τ is the elastic part.

Taking into account the Adimensionnalisation of the equations subject to Boussinesq approximation, and the choice of the viscoelastic model of oldroyd-B, we obtain:

Continuity equation:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \tag{5}$$

Momentum equations:

$$Pr^{-1} \left(U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \beta \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial X} \tag{6}$$

$$Pr^{-1} \left(U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \beta \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial X} + RaT \tag{7}$$

The energy equation:

$$U \frac{\partial T}{\partial X} + V \frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} \tag{8}$$

Constitutive equations:

$$\tau_{xx} + We \left(U \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial X} + V \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial Y} \right) = 2We\tau_{xx} \frac{\partial U}{\partial X} + 2We\tau_{xy} \frac{\partial U}{\partial Y} + 2\beta \frac{\partial U}{\partial X} \tag{9}$$

$$\tau_{yy} + We \left(U \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial X} + V \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial Y} \right) = 2We\tau_{xy} \frac{\partial V}{\partial X} + 2We\tau_{yy} \frac{\partial V}{\partial Y} + 2\beta \frac{\partial V}{\partial Y} \tag{10}$$

$$\tau_{xy} + We \left(U \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial X} + V \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} \right) = We\tau_{yy} \frac{\partial U}{\partial X} + We\tau_{xx} \frac{\partial V}{\partial X} + \beta \left(\frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right) \tag{11}$$

With the boundary conditions:

$$U = V = 0 \quad : \quad T = 1, T = 0 \quad \text{at } x = 0, A \tag{12}$$

$$U = V = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y = 0, 1 \tag{13}$$

III. RESOLUTION METHOD

A. Numerical method :

The solution of the above coupled non-linear equations and boundary conditions, Eqs. (5)–(13), is obtained using a finite volume method and the SIMPLER algorithm (Patankar [2]).

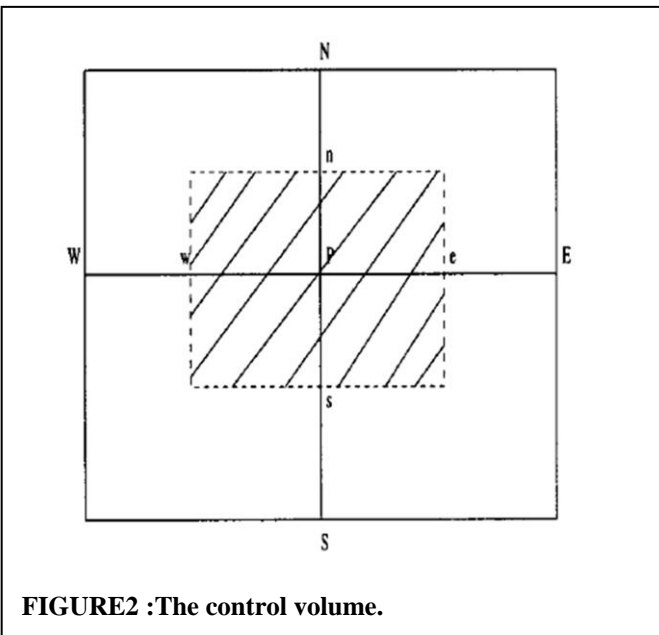


FIGURE2 :The control volume.

All of governing equations can be written in the form of general transport equation, given as follow:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\Lambda u_j \phi + \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) = S_\phi \quad (14)$$

Such as, ϕ is the working variable, it can be a component of a tensor or vector even a constant, the coefficients Λ and Γ have different meaning it depends the treated equation, S_ϕ is the source term, which includes the terms that cannot be taken in consideration in the convective and diffusion terms, it has different definition for different equations.

A finite volume formulation is used for the spatial discretization. The flow domain is divided into a set of control volumes ΔV around P, as shown in "Fig. 2".

The integral of equation (14) over the control volume and using the divergence theorem allows obtaining the following expression:

$$\int (\Lambda u_j \phi + \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) n_j dA = \bar{S}_\phi \quad (15)$$

Here \bar{S}_ϕ is the integral of the source term, this can be linearised as:

$$\bar{S}_\phi = \int_{\Delta V} S_\phi dV = \bar{S}_C + \bar{S}_p \phi_p \quad (16)$$

Here U and V represent the velocity components, respectively in the x and y directions, τ_{xx}, τ_{yy} and τ_{xy} are the elastic stress tensor components, Ra, Pr and We are a dimensionless numbers named respectively; Rayleigh number, Prandtl number and Weissenberg number.

In which \bar{S}_C is constant part of \bar{S}_ϕ that does not explicitly dependent on ϕ while \bar{S}_p is the coefficient of ϕ_p which is made negative to enhance the numerical stability.

The final form of the two-dimensionnal discretized equations relating the variable ϕ_p to its neighbouring gridpoint values can be symbolically in every control volume as follows:

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + \bar{S}_C = \sum_{np} a_{np} \phi_{np} + \bar{S}_C \quad (17)$$

Where:

$$a_p = \sum_{np} a_{np} - \bar{S}_p \quad (18)$$

B. Solution method

To obtain the kinematic fields, the pressure field is obviously needed, for this the Semi-Implicite Method for Pressure Linked Equation Revised (SIMPLER) algorithm of Patankar[2] is used .

The discretized equations for each control volume in the computational domain consist of set of linear algebraic equations that can be solved easily by a generalization of the tridiagonal matrix algorithm (TDMA).

For viscoelastic flow computations, the extra stress is non-linearly coupled via the source term of the momentum equations. For this, decoupled technique is adopted in such a way that the source term that contains the known dynamique fields obtained from the previous iteration level and the stress are updated by solving the discretized constitutive equations for obtaining the kinematics field from the momentum equations.

The present algorithm consists the following steps:

- Computation of velocities.
- Computation of pressure and correction of velocities.
- Computation of stresses.
- Convergence control and return to first step if necessary.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

First we consider steady flow of a viscoelastic fluid through a shallow parallel plans with imposed pressure at the inlet, for which an analytical solution can be easily obtained, as a validation with the numerical solution.

The main objective of this study is to evaluate the effect of elasticity on the viscoelastic flow generated by natural convection, to do this; a numerical simulation is imposed in a non-uniform

staggered grid of 305×305 points, calculations has been realized for different values of the control parameters : Rayleigh, Prandtl and Weissenberg.

Tables 1 and 2 present the horizontal and vertical velocities at the center line, minimal stream function and Nusselt number in function of We at different values of Rayleigh number, a reduction of heat transfer occurred when increasing Weissenberg number, also an increase of We number leads to a decrease in the intensity of the flow through the lowering of the peaks of velocities, in Newtonian fluid (We=0) horizontal and vertical velocities at the center line, minimal stream function and Nusselt number are usually taken as a code validation. Moreover a growth of Rayleigh number allows an increase in heat transfer and flow intensity, also the elasticity effect is more interesting for the high values of Rayleigh number.

“Fig. 3, 4, 5 and 6”, show streamlines and isotherms for different values of Weissenberg, we can find that an increase in We leads to a slight modification in streamlines and temperature fields.

TABLE I. HORIZONTAL MINIMUM VELOCITY, VERTICAL MAXIMUM VELOCITY, MINIMUM STREAM FUCTION AT THE CENTERLINE AND NUSSOLT NUMBER FOR RAYLEIGH NUMEBER=600

We	Ra = 600			
	<i>Umin</i>	<i>Vmax</i>	<i>PSImin</i>	<i>Nu</i>

We	Ra = 600			
	<i>Umin</i>	<i>Vmax</i>	<i>PSImin</i>	<i>Nu</i>
0	-2.305180	2.319307	-0.991273	1.047435
0.3	-2.227527	2.241739	-0.958019	1.044668
0.4	-2.132545	2.143208	-0.917735	1.041385
0.6	-1.849192	1.850380	-0.799585	1.032319

TABLE II. HORIZONTAL MINIMUM VELOCITY, VERTICAL MAXIMUM VELOCITY, MINIMUM STREAM FUCTION AT THE CENTERLINE AND NUSSOLT NUMBER FOR RAYLEIGH NUMEBER=1000

We	Ra = 1000			
	<i>Umin</i>	<i>Vmax</i>	<i>PSImin</i>	<i>Nu</i>
0	-3.662359	3.711115	-1.174062	1.117122
0.1	-3.648148	3.714653	-1.170219	1.117089
0.3	-3.249394	3.287958	-1.051390	1.096412
0.4	-2.871039	2.884852	-0.943115	1.078098

V. CONCLUSION

In the present work, the problem described by the natural convection of Oldroyd-B fluid confined in rectangular cavity has been solved using a finite volume method, the fluid movement is generated by the creation of temperatures difference between the vertical walls, a numerical simulation allows to better understanding the rheological parameters impact and Rayleigh effect in heat transfer characteristics and in fluid flow.

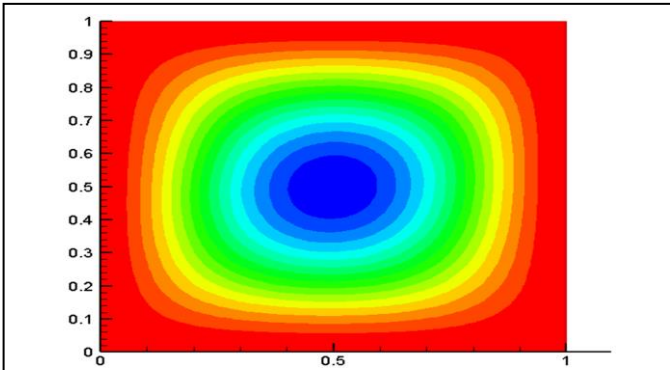


FIGURE 3: Streamlines for $We=0.2$.

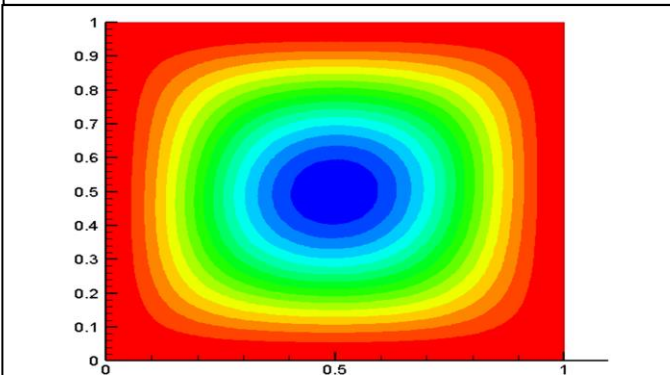


FIGURE 4: Streamlines for $We=0.4$.

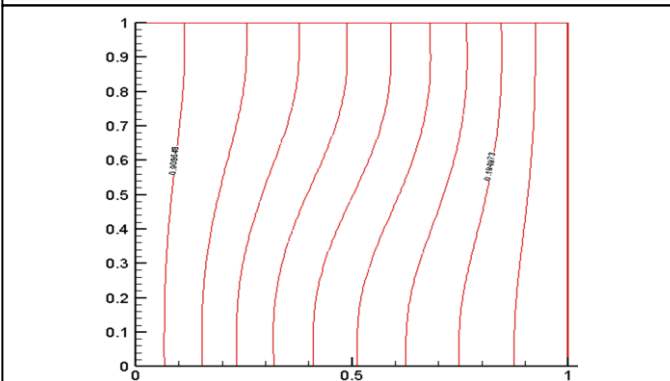


FIGURE 5: Isolines for $We=0.2$.

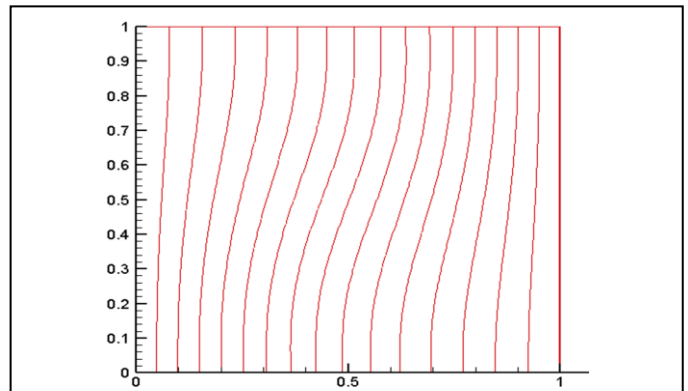


FIGURE 6: Isolines for $We=0.4$.

References

- [1] Hsu, C.H. and Chou, T.Y. (1997). "Unsteady flow of a second-grade fluid past a backward-facing step", *Int. J. Non-Linear Mech.*, Vol. 32, pp. 947–960.
- [2] S. Patankar, *Num. Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere, New York (1980).
- [3] S.Raghay, A.Hakim, "Numerical simulation of White–Metzner fluid in a 4:1 contraction," *Int. J. Numer. Meth. Fluids* (2001); 35: 559–573.
- [4] P. Saramito, Efficient simulation of nonlinear viscoelastic fluid flows, *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 60 (1995) ,199–223.
- [5] De Vahl Davis, G., Natural convection of air in a square cavity: a benchmark numerical solution, *Int. J. Num. Method Fluids.* (1983), 3, 249-264.

Strategic analytics as a roadmap for decision-making support in the smart enterprise

Jabir Brahim¹, Nouredine Falih², Khalid Rahmani³

¹ ERPTM Laboratory, Polydisciplinary Faculty Mghila, BP 592 Beni Mellal, Morocco

² LIMATI Laboratory, Polydisciplinary Faculty Mghila, BP 592 Beni Mellal, Morocco

³ ERPTM Laboratory, Polydisciplinary Faculty Mghila, BP 592 Beni Mellal, Morocco

ibra.jabir@gmail.com

nourfald@yahoo.fr

kh.rahmani@hotmail.fr

Abstract- In the business context, data is collected and analyzed through a variety of mechanisms for decision-making objective. This operation was gradually developed since the 1970s when the first application was designed to support decision-making based on simple statistical methods until the emergence of business analytics. The existing analytics solutions do not offer a complete solution and don't reach the real business goal, so it is necessary to think about new strategic analytics offering new planning, and decision roadmap that can reduce the time and increases the productivity for the smart enterprise.

VI. *Key-words: Decision making, Business analytics, Strategic analytics, Big data analytics, Smart enterprise.*

I. INTRODUCTION

Decision making in the socio-economic world is a significant challenge in light of the many changes that have occurred in all areas, for this purpose many strategies and methods have been emerged to facilitate this process [1].

Since the appearance of the first application designed to support the decision [2], various methods and approaches appeared to collect and analyze the right data to make the right decision, until the emergence of analytics operations that expanded this domain. None of the current solutions offerings yet an end-to-end complete analytic solution help enterprise makes a fast and right decision. In this paper, we are interesting in strategic analytics as a new paradigm that can provide an accurate decision in such complicated and varied domains in a dynamic, unknown, uncertain, and unpredictable world.

II. SMART ENTERPRISE

From several existing definitions, we can choose that smart enterprise appeared in conjunction with intelligent management, business analytic processing, multiple data sources, real business processes (Services/ Manufacturing/ Distribution) [3]. So, the transition from traditional enterprise to smart and agile one requires some methods and approaches defined under business analytics solutions that can read measurements from all data sensors. Also, import data from databases, process raw data, determines all parameters and several models (business/ production/ distribution/ sales), evaluates results and status of the products, customers, suppliers, technologies, finance, social, environmental and quality. It can also deliver results to smart management to conventional mobile devices identifying is required and if so, where and why, this analytics adoption empower decision makers with timely insights to deliver more intelligent business decisions, also make user act quickly and independently. The smart management as the primary key for the smart enterprise come to take into consideration historical data and if something is wrong to the fixed objective for business processes analyses causes easy, accelerate and implements control actions to achieve business goals.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Other researchers affirm that smart enterprise is such conjunction of three main approaches used for a long time (analysis methods, business analytics, Modeling / optimization) [4]. The management of these approaches contributed to providing insights and predictions to improve results, thus forming the perspective of advanced business analytics for a smarter company.

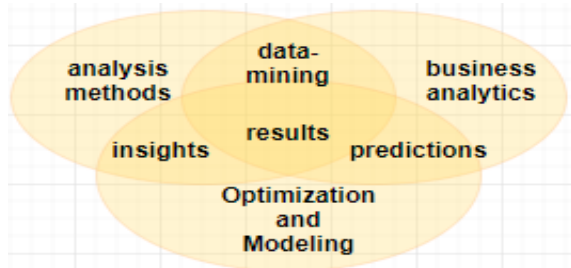


Fig. 5 Smart enterprise perspectives

III. BUSINESS INTELLIGENCE AND BUSINESS ANALYTICS

Business intelligence (BI) is a set of strategies, technologies, methods, means, and tools used to drive business and help decision-making with dashboards, analytical reports and perspective [5]. It is a process based on the collection, the modeling and the restitution of the several formats of data generated in the company: paper archives, databases, spreadsheets, customer data collected via an online service, in order to make the decision.

Business analytics (BA) is an advanced concept and approach introduced to represent the key analytical component in BI, describe the set of technologies, skills, practices for continuous iterative exploration and investigation of past business performance uniting various disciplines to get value from data providing insight and guide a future business planning. The main key for BA is developing new predictions and understanding of business performance based on data [6].

Lately big data and big data analytics have been emerged to describe the set of data and analytical methods in applications that are so huge (from terabytes to exabytes) [7] and complicated (social media, network data...) that they need advanced and unique data storage,

management, processes, and visualization technologies.

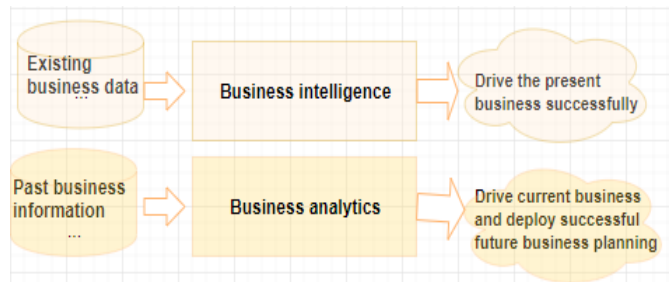


Fig. 2 Business analytics vs Business intelligence

IV. TYPE OF ANALYTICS

Business analytics can be well understood through its three types, which summarize its role and objectives:

4.1 Descriptive analytics

The first type of analytics is the descriptive one, known as business reporting. It is the first stage of data analysis. It delivers information, creates a summary of historical data, and possibly prepares it to be ready for further processing to provide insight and prediction that can help to understand how and why some event happened [8]. Generally, it comes to answer the questions of “what is happening? and/or what happened?” Examples:

- How much paid for the direct and indirect costs last year?
- What is the net profit margin for last year?
- What are the products more search?
- What are the best-selling products?

By answering these questions, the enterprise can understand the behavior of customers, discover more product features, change and evolve new services and systems.

4.2 Predictive analytics

This type is a branch of advanced analytics that analyses current and historical facts using some methods like predictive modeling, machine learning, data-mining and analytical techniques. It provides information and makes predictions about what might happen in the future and about

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

otherwise unknown events [9]. Generally, this analytics type answers the question of “what will happen and/or why it will happen?” Examples:

- What will happen if selling decrease by 1 percent?
- What will be the new price if supplier prices increase by 2 percent?
- What are the new opportunities for the new project investment?
- What do we expect to pay for the rent next year?
- What is the risk related to the business investment?
- How much can we earn if customer purchases increase by 3 percent?

From the nature of questions, it turns out that this type of analytics can optimize marketing campaigns by helping businesses attract, retaining and grow their most profitable customers, also used to forecast inventory and manage resources by setting prices and identify new opportunities. Moreover, it is an efficient solution for risk management.

4.3 Prescriptive analytics

Prescriptive analytics is the final step of BA; it presents a combination of Predictive Model and Data optimization of user behavior [10]. It has the power to process data to extract knowledge by looking at past performance and understands it by mining historical data to look for the reasons behind success or failure. The major output of such perspective type will not only say “What may happen?” but also will convey “what I should do?” as:

- How many products do we need to maximize revenue?
- What is the best way to minimize costs and fees?
- What is the alternative plan to maintain max of profit if supplier prices increase?

As is evident, the answers to these questions can help to identify high-value alternatives to minimize or maximize some objectives as profit, selling, purchases...

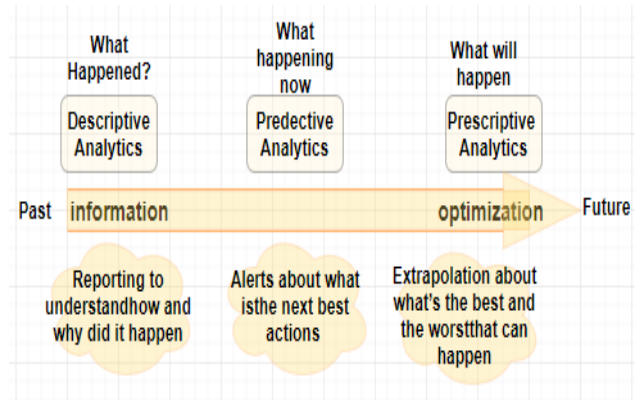


Fig. 3 Business analytics perspectives

V. BIG DATA ANALYTICS

The big data analytics ensure the emergence of the three types of business analytics to process and analyze a vast amount of data for extracting value and knowledge [11]. This analytics adoption drives potential benefits; it is the key for the enterprise to exploit this amount of data dependent capabilities to provide direction to make the right decision.

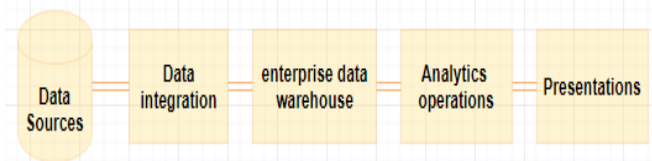


Fig. 4 Big Data Analytics Architecture

VI. STRATEGIC ANALYTICS

In this chapter, we will discuss the Strategic analytics approach from its different aspects (procedural, organization and technological ...).

6.1 Overview

Strategic analytics is an integrated analytics method, rather than strategic planning roadmap for the enterprise [12]. It combines business planning experience with advanced analytical tools, technology businesses and add end-user research, drive a meaningful analysis, using several techniques to uncover what is happening and predict what will happen for a better decision.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Strategic analytics offers a detailed understanding of customer behaviors and segmentation, products game, applications, and adjacencies, it provides the competitive environment, market structure, and ensures coverage and go-to-market strategies. It covers a vast variety of analytics approaches in a business context, begin from marketing to supply chain or credit scoring and Human Resources Analytics, etc. It gives the company an agile and smart vocation to approach a business issue using analytics via several predicting events methods: sales, defaults, risks, churn, etc.

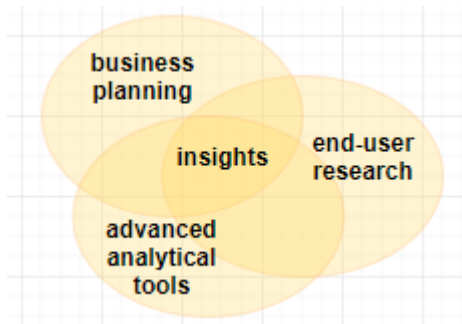


Fig. 5 Strategic analytics perspective

6.2 Solutions

As the business analytics market rapidly expands, technologies are most in demand and promote the most growth potential, offering a reasonable solution contributes to establishing strategic analytics for a smart and agile enterprise. Many of them involve the three types of analytics at the same time and work over databases, data analysis techniques such as regression, classification, and clustering. These technologies enabling clients to increase investment returns, reduce portfolio risk and volatility, and improve management confidence and regulatory compliance.

6.2.1 Data mining

Data mining is a solution that comes to recognize and identify meaningful relationships and patterns in the raw data through some mathematical and computational algorithms, the

main key for this solution delivers information and unlock insights [13].

Data mining is a potential process that reinforces the technological side of strategic analytics providing predictions and offering visualizations through several methods like machine learning, statistics and database systems. Weka (Waikato Environment for Knowledge Analysis) and Apache mahout are two Platforms examples for data mining operations created to help the implementation of algorithms and gain value from data.

6.2.2 Predictive data analytics

This kind of solutions used to help enterprise discover the potential hidden in data, mine for fresh insights, or predict new futures, some customer's behavior and other opportunities [14], also expect problem before they happen. KNIME (The Konstanz Information Miner) is an open source platform fast to deploy, easy to scale and intuitive to learn with a graphical user interface.

6.2.3 Quantitative analytics

The Quantitative data is the information that can be measured and written down with numbers (size, length, number of hours etc...); the quantitative data analysis provides numerical forms from this type of data and recognizes them to understand results [15]. It is used in the socio-economic world to make the decision on risk management, investments, and pricing. ELKI (Environment for Developing KDD-Applications Supported by Index-Structures) is an open source environment deliver high performance using a set of algorithms and offers an easy user interface.

6.2.4 Qualitative analytics

Qualitative data is information about qualities; information that cannot actually be measured and easily reduced to numbers (colors, weather, opinions, values, behaviors...; qualitative analytics uses this kind of data and converts it to such explanation, understanding or interpretation,

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

in order to facilitate decision-making [16]. QDA miner (Qualitative Data Analysis Software) is a particular environment developed to support qualitative analytics and provide meaningful results presented as graphs, drawings and schema, etc...

VII. DISCUSSION

As we clarified previously, the technology side is the most essential to develop new strategic analytics as a roadmap for decision making support; this chapter will present a list of criteria used to classify the different analytics solutions and identify the advantages and the disadvantages of each one:

- Privacy and security Issues
- Cost
- Reliability
- Accuracy
- Data providers
- Difficulty
- Scalability
- Real-time
- Time of latency
- Analytics operations
- Fault tolerance

		operations •Difficult to understand and to use
Quantitative analytics	<ul style="list-style-type: none"> •Fast data analyze collection •Use statistically valid random samples •Easy to understand •Reliable 	<ul style="list-style-type: none"> •The accuracy of the answers is limited •Costly •Don't get specific details •Artificiality •Limiting
Qualitative analytics	<ul style="list-style-type: none"> •More flexibility •Provides depth and detail •Validity/Auditability •Support several data formats 	<ul style="list-style-type: none"> •Difficult to generalize •Can't handle large amount of data •Results always relies on skilled researchers •Lack of anonymity •Poor in analytical capabilities.

The table above, shows clearly that the most solutions used in business analytics come with its own set of advantages and disadvantages. Moreover, all of the existing solutions have barriers and limitations sometimes are obvious. so none of them offering yet a complete solution can help to establish strategic analytics for smart and agile enterprise able to extract value from data and help to make an efficient decision. In our future works, we will try to concretize this notion of strategic analytics by a specific and original approach likely to contribute to the resolution of the raised problems.

TABLE II. Discussion of the advantages and disadvantages of the analytics solutions

<i>Solutions</i>	<i>Advantages</i>	<i>Disadvantages</i>
Data mining	<ul style="list-style-type: none"> •Offer great Analytical Tools •Significant Pattern generation •Identification of errors •Includes a several machine learning algorithms •Predict future trends 	<ul style="list-style-type: none"> •Privacy Issues •Expensive tools •Risk of Misuse of information •Data format constraints •Amount of data is overwhelming •Lack accuracy of data •Lacking in the representation of the results
Predictive data analytics	<ul style="list-style-type: none"> •Fast to deploy, •Easy to scale •Achieve deeper insights 	<ul style="list-style-type: none"> •Visualization is less rich •Loss of data richness •Accuracy decrease •Lack real-time

VIII. RECOMMENDATIONS:

Strategic analytics needs a set of technology solutions as the main key to success the Business analytics projects. So, it is necessary to select and evaluate the right BA analytics technologies based on the previous list of criteria. The table below illustrates the mandatory minimum recommendations for the optimal features to evaluate, select and deploy personal strategic analytics:

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

TABLE III. Recommendations for the optimal features to evaluate and select a BA tool to deploy a strategic analytics solution.

<i>Criteria</i>	<i>Recommendations</i>
Analytics operations	<ul style="list-style-type: none"> • Offer reporting • Offer great Analytical Tools • Provide insights and predictions • Achieve deeper insights • Simple algorithms
Reliability and accuracy	<ul style="list-style-type: none"> • Actionable results • No Risk of Misuse of Information • Accurate • Reliable
Visualizations	<ul style="list-style-type: none"> • Analytics Dashboards • Graphical management • Export graphic results • Allows multiple visualizations
Data providers	<ul style="list-style-type: none"> • Collect huge datasets • Analyze a huge amount of data quickly • Support several data formats
Simplicity	<ul style="list-style-type: none"> • Easy to understand • Fast to deploy, • Easy to scale • Low costs
Scalability	<ul style="list-style-type: none"> • Easy to deployed on the web • Results accessible to users
Real-time	<ul style="list-style-type: none"> • Real-time integration • Real-time access • Real-time processing • Real-time results
Fault tolerance	<ul style="list-style-type: none"> • Lowest latency • Easy management system. • Zero down-times • Support Backup data • Roles-based security
Privacy and security Issues	<ul style="list-style-type: none"> • No down-times • Safe • Roles-based security • Data backup • Easy to fix drawbacks

IX. CONCLUSION

In this paper, we discussed the strategic analytics concept in the business and decisional context by bringing the state of the art and the different analytical solutions supporting this analysis strategy. Then, we presented the recommendations to select and evaluate the business analytics tools. A brief discussion showed that there is always a need to establish an

instead approach that can respond to the barriers and limits of the existing technical analytics solutions. In future work, we will concretize this approach in order to offer a prediction analysis, to improve incomes, provide new opportunities, identify new services as an effective decision-making help in a company that wishes to be more and more agile and intelligent.

References

- [1] TL. Saaty, "Decision making with the analytic hierarchy process." International journal of services sciences 1.1 (2008): 83-98.
- [2] DJ. Power, "A brief history of decision support systems." DSSResources. COM, World Wide Web, <http://DSSResources.COM/history/dsshistory.html>, version 4 (2007).
- [3] J. Davis et al. "Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance." Computers & Chemical Engineering 47 (2012): 145-156.
- [4] D. Larson and V. Chang, "A review and future direction of agile, business intelligence, analytics and data science." International Journal of Information Management 36.5 (2016): 700-710.
- [5] HJ. Watson and BH. Wixom, "The current state of business intelligence." Computer 40.9 (2007).
- [6] R. Kohavi, NJ. Rothleder, and Evangelos Simoudis. "Emerging trends in business analytics." Communications of the ACM 45.8 (2002): 45-48.
- [7] Z. Xu, GL. Frankwick, and E. Ramirez. "Effects of big data analytics and traditional marketing analytics on new product success: A knowledge fusion perspective." Journal of Business Research 69.5 (2016): 1562-1566.
- [8] A. Ahmed, et al. "Descriptive analytics: Examining expert hackers in web forums." Intelligence and Security Informatics Conference (JISIC), 2014 IEEE Joint. IEEE, 2014.
- [9] E. Siegel, Predictive analytics: The power to predict who will click, buy, lie, or die. John Wiley & Sons Incorporated, 2016.
- [10] GC. Deka, "Big data predictive and prescriptive analytics." Big Data: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. IGI Global, 2016. 30-55.
- [11] A. McAfee, et al. "Big data: the management revolution." Harvard business review 90.10 (2012): 60-68.
- [12] T. Klatt, M. Schlaefke, and K. Moeller. "Integrating business analytics into strategic planning for better performance." Journal of business strategy 32.6 (2011): 30-39.
- [13] J. Han, J. Pei, and M. Kamber. Data mining: concepts and techniques. Elsevier, 2011.
- [14] G. Shmueli and OR. Koppius, "Predictive analytics in information systems research." Mis Quarterly (2011): 553-572.
- [15] ME. Iacob and H. Jonkers, "Quantitative analysis of enterprise architectures." Interoperability of Enterprise Software and Applications. Springer, London, 2006. 239-252.
- [16] H. Liu, R. Macintyre, and R. Ferguson. "Exploring qualitative analytics for e-mentoring relationships building in an online social learning environment." Proceedings of the 2nd International Conference on Learning Analytics and Knowledge. ACM, 2012.

Vibrational study by IR and Raman of $ZnNH_4P_3O_9$

El Mehdi Majdi^{a)}, Youssef Naimi^{a)}, Mohammed Moutaabbid^{a)} et Said Belaouad^{a)}

a) Laboratoire de Chimie Physique des Matériaux, Faculté des Sciences Ben M'sik, Casablanca, Université Hassan II de Casablanca, Maroc.

Email : majdielmehdismc@gmail.com

Summary : Chemical preparation, IR and Raman studies are given for the cyclotriphosphate $ZnNH_4P_3O_9$. $ZnNH_4P_3O_9$, isotypic to $MnNH_4P_3O_9$, is monoclinic *Pmcn* with the following unit-cell dimensions : $a = 7.45(4)\text{Å}$, $b = 14.43(3)\text{Å}$, $c = 10.04(1)\text{Å}$, $\beta = 121.00(3)^\circ$ and $Z = 4$. $ZnNH_4P_3O_9$ is stable, in the conditions of temperature and pressure of our laboratory, until 450°C .

Key words : Chemical preparation, IR, Raman, study.

I. INTRODUCTION

Il s'agit d'une étude systématique et fondamentale des cyclotriphosphates de type bénitoïte $M^{\text{II}}NH_4P_3O_9$ ($M^{\text{II}} = \text{Zn, Ca, Co, Cd, Mg, Mn}$) [ref]. Dans ce travail on s'intéresse à l'étude vibrationnelle du cyclotriphosphate $ZnNH_4P_3O_9$ par spectrométries d'absorption IR et diffusion Raman.

II. Partie Expérimentale

$M^{\text{II}}NH_4P_3O_9$ ($M = \text{Mn, Co et Cd}$) sont synthétisés par la méthode de réaction à l'état solide. Des quantités stœchiométriques de $(NH_4)_2HPO_4$, $ZnCO_3$ pour ces compositions sont finement broyées dans un mortier d'agate pendant quelques minutes pour obtenir un mélange homogène. Les échantillons de poudre sont portés à 300°C dans un creuset en porcelaine. Puis entre 300°C et 350°C en montée linéaire de température pendant 24 heures avec une vitesse de chauffage de 5°C/h .



II.1. Données cristallographiques de $ZnNH_4P_3O_9$

système : symétrie monoclinique.

groupe d'espace les extinctions limitées aux plans suivants :

hkl : pour $k \neq 2n$

$o\ o\ l$: pour $l \neq 2n$ (possible)

conduisent aux group d'espace : *Pbp2/b*

Les paramètres de maille sont les suivants :

$a = 7,450(1)\text{Å}$, $b = 14,40(2)\text{Å}$, $c = 10,04(1)\text{Å}$, $\beta = 121,00(1)^\circ$ et $Z = 4$

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Le cyclotriphosphate de zinc $ZnNH_4P_3O_9$ est isotype de $MnNH_4P_3O_9$ le cycle P_3O_9 possède aussi la 72efo symétrie Cs. Le spectre IR de $ZnNH_4P_3O_9$ à été 72eforma sur des pastilles de KRS5 et en utilisant le nujol comme milieu 72eformatio. Il présente :

Dans le domaine $4000-3000\text{ cm}^{-1}$, caractéristique des vibrations NH, une bande de forte intensité à 3343 cm^{-1} et deux épaulements à 3578 cm^{-1} et à 3178 cm^{-1} .

Dans la 72eform $1700-1600\text{ cm}^{-1}$, 72eform aux bandes de 72eformation d'ammoniac, deux bandes d'intensité moyenne situées respectivement, à 1655 cm^{-1} et à 1602 cm^{-1} . La figure 1 représente le spectre d'absorption IR de

ZnNH₄P₃O₉ et la figure 2 représente le spectre de diffusion Raman de ZnNH₄P₃O₉.

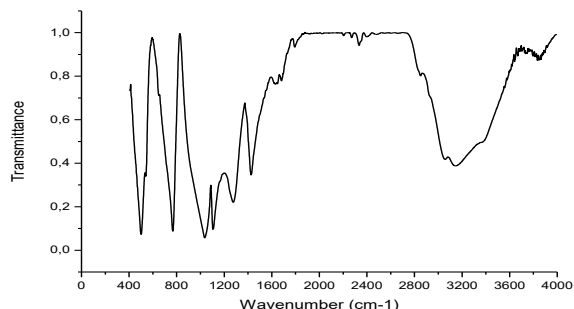


Figure 1 : Spectre d'absorption IR de ZnNH₄P₃O₉

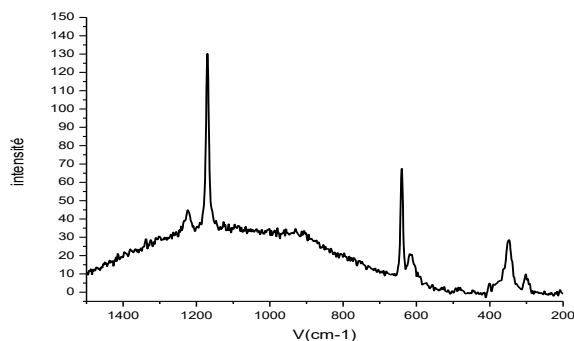


Figure 2 : Spectre de diffusion Raman de ZnNH₄P₃O₉

Dans la zone 1400-650 cm⁻¹ correspondant aux vibrations de valence du cycle P₃O₉³⁻ et éventuellement de l'interaction eau-cycle et des libérations H₂O, huit bandes sont observées :

Cinq bandes de forte intensité, dont une est dédoublée, à 1302 cm⁻¹, 1237 cm⁻¹, 1102 cm⁻¹, 1002 cm⁻¹ et (770,744) cm⁻¹

Une bande d'intensité moyenne à 1155 cm⁻¹

Une bande de faible intensité à 664 cm⁻¹

Une bande de très faible intensité à 861 cm⁻¹

Dans l'intervalle spectral 650-450 cm⁻¹, caractérisant les vibrations des atomes d'oxygènes extérieurs au cycle P₃O₉³⁻ [δ OPO- + ρ OPO-], trois bandes sont observées à 620 cm⁻¹, 509 cm⁻¹ et 462 cm⁻¹

Le spectre IR enregistré de ZnNH₄P₃O₉ est voisin de celui donné par J.C.Grenier et al. [ref], néanmoins quelques différences existent :

- Dans le domaine des vibrations de valence du cycle P₃O₉³⁻, la bande vas POP, de faible intensité, située à 861 cm⁻¹ ne se trouve pas dans le spectre IR de J.C.Grenier et al. [ref] .

Tableau 1 : Fréquences IR et Raman observées pour ZnNH₄P₃O₉ et celles calculées pour un cycle P₃O₉

IR Vobs (cm ⁻¹)	Raman Vobs (cm ⁻¹)	Vcal (cm ⁻¹) [ref]	Mouvement
1290	1292	1299	v _{as} (PO ₂)
1255	1262	1288	v _{as} (PO ₂)
	1248	1288	v _{as} (PO ₂) v _a (POP)
		1200	v _a (POP) v _a (PO ₂)
1194	1208	1188	v _a (POP) v _a (PO ₂)
1155	1167	1155	v _{as} (PO ₂)
	1093	1099	v _s (PO ₂) v _s (POP)
1095	1081	1095	v _{as} (PO ₂) v _s (POP)
1008	1048	1032	v _{as} (POP)
	1005		
827			
740	777	794	vs(POP) vs(PO ₂)
		792	vs(POP) vs(PO ₂)
640	644	698	vs(POP) vs(PO ₂)
560	553	563	vs(POP) vs(PO ₂)
531	497	513	vs(POP) vs(PO ₂)
464		447	v _{as} (PO ₂)

CONCLUSION

Dans le présent travail, nous avons préparé le cyclotriphosphate ZnNH₄P₃O₉, type bénitoîte, par voie solide. L'interprétation des specters

d'absorption IR et de diffusion Raman a été donnée. Les fréquences IR observées pour $ZnNH_4P_3O_9$ avec celles calculées pour un cycle P_3O_9 sont voisines et en bon accord.

Références

- [1] Bowman, M., Debray, S. K., and Peterson, L. L. 1993. Reasoning about naming systems. .
- [2] Ding, W. and Marchionini, G. 1997 A Study on Video Browsing Strategies. Technical Report. University of Maryland at College Park.
- [3] Fröhlich, B. and Plate, J. 2000. The cubic mouse: a new device for three-dimensional input. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems
- [4] Tavel, P. 2007 Modeling and Simulation Design. AK Peters Ltd.
- [5] Sannella, M. J. 1994 Constraint Satisfaction and Debugging for Interactive User Interfaces. Doctoral Thesis. UMI Order Number: UMI Order No. GAX95-09398., University of Washington.
- [6] Forman, G. 2003. An extensive empirical study of feature selection metrics for text classification. J. Mach. Learn. Res. 3 (Mar. 2003), 1289-1305.
- [7] Brown, L. D., Hua, H., and Gao, C. 2003. A widget framework for augmented interaction in SCAPE.
- [8] Y.T. Yu, M.F. Lau, "A comparison of MC/DC, MUMCUT and several other coverage criteria for logical decisions", Journal of Systems and Software, 2005, in press.
- [9] Spector, A. Z. 1989. Achieving application requirements. In Distributed Systems, S. Mullende

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

L'efficacité des Techniques de Transmissions des Données A Très Haut Débits pour la 5G

Maryem BOUDAA¹, Youness MEHDAOUI^{1,2}, Zakia LAKHLAI¹

¹ Laboratoire d'informatique et de physique interdisciplinaire, USMBA, Fez, Maroc
² Equipe de Recherche en Electronique, Instrumentation et Mesures, USMS, Béni-mellal, Maroc.
bouda.maryam@gmail.com, youness.mehdaoui@gmail.com

Résumé- L'évolution des systèmes sans fil a eu lieu en un temps remarquablement court, offrant des progrès technologiques incroyables qui vont changer la façon dont les gens communiquent et interagissent les uns avec les autres, ces progrès sont venus en plusieurs générations, Chaque génération à des normes, des capacités et des nouvelles techniques. Les réseaux sans fil de cinquième génération (5G) sont confrontés à divers défis afin de soutenir des réseaux hétérogènes à grande échelle à savoir trois majeures catégories d'usages, le mMTC (Massive Machine Type Communications), eMBB (Enhanced Mobile Broadband), uRLLC (Ultra-reliable and Low Latency Communications). Pour cela de nouvelles modulations et méthodes d'accès ont été développés pour supporter ces changements.

Notre objectif principal est l'étude des méthodes d'accès et les modulations qui sont candidates pour supporter la technologie 5G, à savoir la modulation OFDM, FBMC, GFDM, UFMC... afin d'établir une étude comparative en mettant l'accent sur les avantages et les inconvénients de chaque modulation, en se focalisant principalement sur les formes d'ondes candidates pour supporter la 5G.

Dans ce papier, Nous mettons en évidence les différents paramètres qui mesurent la faisabilité de la technologie 5G, en analysant les indicateurs pour meilleures modulations candidatent.

Mot clés: 5G, OFDM, FBMC, GFDM, UFMC

I. INTRODUCTION

L'un des facteurs qui ont boosté l'évolution des générations mobile au cours des décennies est l'augmentation remarquable des nombres des objets smart. Les technologies 3G et 4G visaient principalement l'internet mobile très haut débit alors que la 5G va continuer à adresser ce marché mais vise également à prendre en compte et favoriser les marchés verticaux tels l'Internet des Objets, avec plusieurs segments

bien différents. Trois grandes catégories d'usages qui sont définies dans le IMT- 2020, permettraient de de la technologie 5G, à savoir le mMTC – Massive Machine Type Communications qui résume l'ensemble des communications entre une grande quantité d'objets avec des besoins de qualité de service variés, l'objectif de cette catégorie est de répondre à l'augmentation exponentielle de la densité d'objets connectés. Le eMBB – Enhanced Mobile Broadband, c'est à dire la connexion en ultra haut débit en outdoor et en indoor avec uniformité de la qualité de service, même en bordure de cellule, et finalement le uRLLC ou plutôt le Ultra reliable and Low Latency Communications, ce sont des communications ultra-fiables pour les besoins critiques avec une très faible latence, pour une réactivité accrue. Pour pallier aux différentes exigences du marché, plusieurs modulation et méthodes d'accès ont apparue. Pour pouvoir mettre en pratique ces différentes catégories, plusieurs indicateurs de performances sont en train d'être appliqués par l'UIT sur les différents types de formes d'ondes afin de pouvoir sortir avec une comparaison efficace entre ces nouvelles formes d'ondes – à savoir la PC-OFDM, UFMC, FBMC, GFDM...[1]- et enfin améliorer l'un des indicateurs clés de calcul des performances de la 5G.

Tableau 1 : Tableau comparatif des différentes caractéristiques des générations mobile [2]

	1G	2G	3G	4G	5G
Période	1980-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2020	2020---
Bande passante	150/900Mhz	900Mhz	100Mhz	100Mhz	1000*BW
Fréquence	Télécommunication analogique	1.8Ghz	1.6 – 2Ghz	2 – 8Ghz	3-300Ghz
Débit des donnés	2kbps	64kbps	144kbps-2Mbps	100Mbps-1Gbps	<1Gbps
Caractéristique	Première génération sans fil	Numérique	Haut débit numérique	IP, THD	
technologie	Analogique	Système cellulaire GSM	CDMA, UMTS, EDGE	LTE, WIFI	Réseau hétérogène

II. LES EXIGENCES DE LA 5G

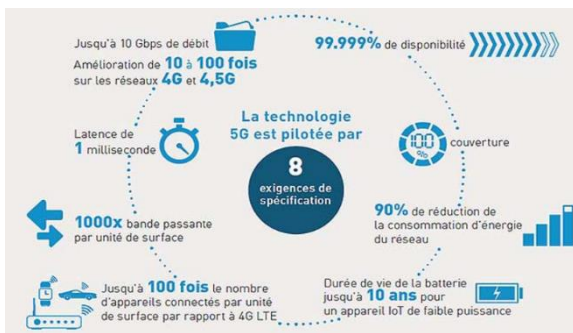


Fig II.1 : les exigences de la 5G

Les exigences majeurs qui ont poussés la révolution vers les très hauts débits sont des besoins en:

- Jusqu'à 10 Gbit/s de débit de données - > de 10 à 100 fois plus que les réseaux 4G et 4.5G
- 1 milliseconde de latence
- 1 000 fois plus de bande passante par unité de surface
- Jusqu'à 100 fois plus d'appareils connectés par unité de surface (par rapport à la 4G LTE)
- 99,999 % de disponibilité
- 100 % de couverture
- 90 % de réduction en utilisation d'énergie du réseau

1. Exigence de débit :

La LTE peut présenter en théorie un débit maximal de 3Gbps en down Link, chose qui n'est pas convenable pour la 5G qui exige un débit maximale de 10 – 50 Gbps.

2. Exigence de couverture :

Disponibilité du service omniprésent qui respecte la fiabilité du système et les exigences des users aux bords des cellules qui souvent souffrent des interférences.

3. La fiabilité et la latence

Adapté de nouvelle forme d'onde et modulation pour dépasser le défi que pose le uMTC en terme de précision et de fiabilité et de faible latence.

Arriver à une latence inférieure à 1ms et plus que 1Gbps et un challenge principale pour le passage vers la 5G.

4. Minimiser la surcharge des signalisations

Minimiser la surcharge des signalisations pour tirer le maximum de la capacité.

5. Supporter plusieurs types de services

La 5G a besoin d'offrir une multi connectivité, supporter des différentes bandes de fréquences, et plusieurs services.

6. Supporter une large bande de fréquences

La 5G va opérer à travers une large bande des ondes millimétriques et centimétrique.

III. LES MODULATIONS EXPLORÉES DANS LE CADRE DE LA 5G

Le réseau 5G doit supporter de différentes familles d'application, et donc un grand débit et une grande efficacité spectrale pour ce faire de nouvelle méthode d'accès et modulation sont nécessaires

Un certain nombre de schémas de modulation candidats ont été rapportés en tant que schémas potentiels de modulation pour la 5G, dans cette présentation nous sélectionnons 4 schémas de modulation représentatifs qui ont suscité un grand intérêt dans la 5G, en raison de leurs avantages respectifs significatifs [3].

L'un des aspects qui intéressent les chercheurs est la latence beaucoup plus courte, nécessaire pour développer les nouveaux services et applications telles que la conduite autonome qui exige un délai de latence ultra-court et une liaison de communication très robuste. Une autre approche est de transformer le préfixe cyclique en option et d'utiliser des durées de symbole plus courtes. Tout ceci a conduit à plusieurs formes d'onde candidates, telles que :

- multiplexage par répartition en fréquence généralisée (**GFDM**, Generalized Frequency Division Multiplex)
- (**FBMC**, Filter Bank Multicarrier)
- multi porteuse filtrée universelle (**UFMC**, Universal Filtered Multicarrier)
- PC-OFDM

IV. LES FORMES D'ONDE CANDIDATENT POUR LA 5G :

1. CP-OFDM

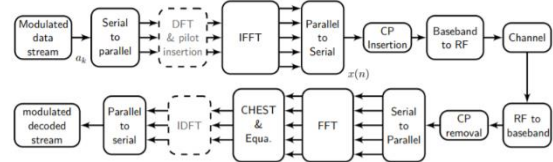


Fig IV.1 : la chaîne de transmission pour la forme CP-OFDM

Dans CP-OFDM, un bloc de symboles complexes est mappé sur un ensemble de porteurs orthogonaux. En raison de l'utilisation du processus de transformée de Fourier rapide inverse (IFFT) (ou FFT) de taille N FFT, l'architecture CP-OFDM a une faible complexité. Le principe de l'OFDM est de diviser la bande passante totale en N porteuses FFT, de sorte que l'égalisation des canaux peut souvent être réduite en un seul coefficient de prise par porteuse. Enfin, un préfixe cyclique (CP) est inséré. Il garantit la circularité du symbole OFDM, si l'écart de propagation du canal multi-trajets est inférieur à la longueur CP. Cependant, cela conduit à une perte d'efficacité spectrale, car le CP est utilisé pour transmettre des données redondantes. Pour limiter le PAPR, une transformation discrète de Fourier discrète (DFT) (ou IDFT) peut être insérée avant l'IFFT (respectivement après FFT), conduisant à l'accès multiple par répartition en fréquence à porteuse unique (SC-FDMA) utilisé dans la liaison montante de 3GPP-LTE.

2. FBMC

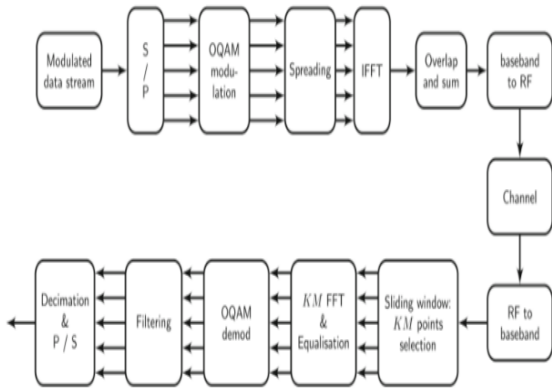


Fig IV.2: la chaîne de transmission pour la forme FBMC

La forme d'onde FBMC consiste en un ensemble de données parallèles qui sont transmises à travers une banque de filtres modulés. Le filtre prototype, paramétré par le facteur de chevauchement K , peut être choisi pour avoir une très faible fuite du canal adjacent. On peut différencier deux variantes principales de FBMC: l'une basée sur la signalisation complexe (QAM), également appelée multi-tonalité filtrée (FMT), et l'autre basée sur des symboles QAM (OQAM) à décalage de valeur réelle, également appelés FBMC / OQAM. Ces derniers assurent l'orthogonalité dans le domaine réel pour maximiser l'efficacité spectrale. La première variante (FMT) est actuellement utilisée dans des standards tels que TEDS, et réalise l'orthogonalité parmi les sous-porteuses en réduisant physiquement leur recouvrement de domaine fréquentiel.

3. UFMC

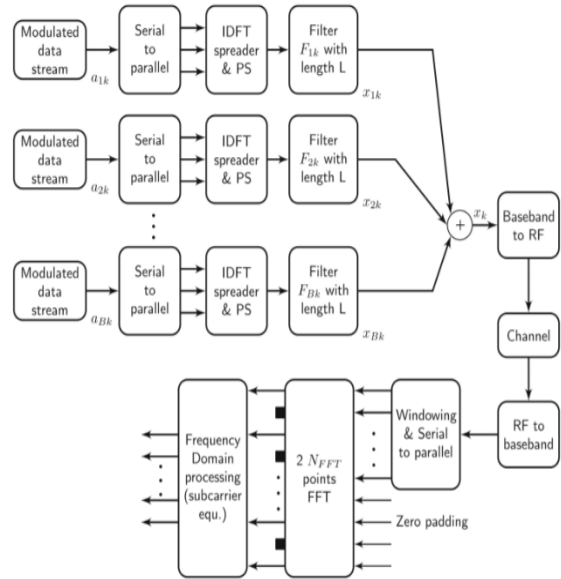


Fig IV.3 : la chaîne de transmission pour la forme UFMC

La forme d'onde UFMC est un dérivé de la forme d'onde OFDM combiné avec le post-filtrage, où un groupe de transporteurs est filtré en utilisant une implémentation efficace dans le domaine fréquentiel [2]. Cette opération de filtrage de sous-bande est motivée par le fait que la plus petite unité utilisée par l'ordonnancement algorithmique dans le domaine fréquentiel dans 3GPP LTE est une ressource bloc (RB), qui est un groupe de 12 transporteurs. Le filtrage opération conduit à une fuite hors bande plus faible que pour OFDM. L'émetteur UFMC est composé de B filtres de sous-bande qui modulent les blocs de données B . Le signal transmis n'utilise pas de CP, mais il y a encore un spectre perte d'efficacité due au temps transitoire (queues) de la mise en forme filtre. L'étage Rx est composé d'un FFT point $2N_{FFT}$,

qui est ensuite décimé par un facteur 2 pour récupérer les données. Une scène de fenêtrage peut également être insérée avant la FFT. Il introduit des interférences entre les transporteurs mais est intéressant à considérer pour les transmissions montantes asynchrones cela aide à séparer les utilisateurs contigus.

4. GFDM

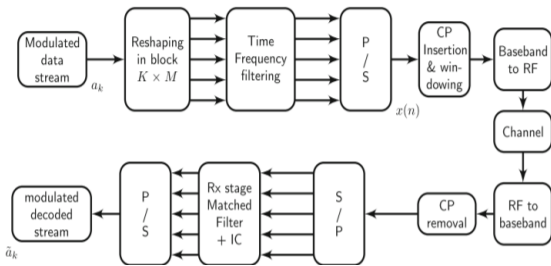


Fig IV.4 : la chaîne de transmission pour la forme GFDM

La forme d'onde GFDM est basée sur le filtrage temps-fréquence d'un bloc de données, ce qui conduit à un flexible, non orthogonale forme d'onde [4]. Un bloc de données est composé de K porteurs et M intervalles de temps, et transmet $N = KM$ complexe modulé Les données. Dans cet article, nous considérons que les données sont filtrées cycliquement par un filtre root-raised-cosine (RRC) qui est traduit dans les domaines fréquentiels et temporels est habituellement fait [4, 6]. Pour éviter les interférences entre symboles, un CP est ajouté à la fin de chaque bloc de symboles. Pour améliorer encore l'emplacement spectral, un fenêtrage processus peut être ajouté dans l'émetteur. Plusieurs architectures de récepteurs ont été étudiées la littérature pour GFDM, et nous considérons dans ce document un Schéma du récepteur du filtre adapté (MF): chaque bloc reçu est filtré par le même temps et la fréquence des filtres traduits comme dans l'étape de transmission [4]. Comme la modulation est non-

orthogonal, il est nécessaire de mettre en œuvre une interférence système d'annulation (IC) [19], qui améliore performance, mais augmente considérablement la complexité de la destinataire. Plus récemment, OQAM a également été considéré GFDM pour permettre l'utilisation de récepteurs linéaires moins complexes au lieu de IC.

V. COMPARAISONS DES FORMES D'ONDES

Tableau II: Tableau comparative entre les différentes formes d'ondes

Forme d'onde	Avantages	Inconvénients
CP-OFDM	Mise en œuvre efficace en utilisant FFT / IFFT - Répartition du spectre flexible pour différents utilisateurs - Application directe de la technologie MIMO: - Flexibilité du signal et du multiplexage des données	Mauvaise localisation des fréquences due au filtre prototype rectangulaire
UFMC	Performances OOB similaires à CP-OFDM avec WOLA - Peut être utilisé pour multiplexer l'utilisateur avec différents numéologies	Conception d'émetteur / récepteur plus complexe - Soumis à l'ISI en raison de l'absence de PC
FBMC	Déclin supérieur des lobes latéraux par rapport aux autres formes d'ondes MC mais le bénéfice diminue avec la non-linéarité PA	Conception de récepteur compliquée due à OQAM - Soumis à ISI sous canal non plat - Intégration MIMO plus complexe qu'OFDM
GFDM	Meilleure suppression des fuites OOB que le CP-OFDM	Récepteur compliqué pour gérer ISI / ICI - Le filtre prototype peut exiger plus compliqué modulation / récepteur, par ex. OQAM comme dans FBMC - Latence de traitement de bloc plus élevée (pas de pipeline) - Le multiplexage avec CP-OFDM nécessite une grande bande de garde

VI. CONCLUSION :

Comme cité précédemment 4 techniques de transmissions sont en questions en ce qui concerne le passage vers la 5G. Pour pouvoir mettre l'accent sur un seul, il va falloir sélectionner la plus efficace. Donc une simulation sur l'outil matlab est nécessaires pour pouvoir faire des schémas comparatifs, pour pouvoir conclure les paramètres a manipulés pour pouvoir sortir avec une modulation dont une énergie spectrale est meilleure, un PAPR plus bas et un taux d'erreur binaire le plus bas [4].

En transmissions numériques, l'efficacité spectrale η se définit comme étant le rapport entre le débit binaire (en bit/s) et la bande passante (en Hz). Nous pouvons aussi dire que c'est le nombre de données binaires envoyés sur le canal de communication par ressource temps-fréquence. Un rapport entre puissance crête et puissance moyenne : Est la racine carrée de la moyenne de cette grandeur au carré, sur un intervalle de temps donné, elle représente la répartition fréquentielle de la puissance d'un signal suivant les fréquences qui le composent :

I Efficacité spectrale (SE)

I la moyenne de la puissance crête (PAPR)

I Densité spectrale de puissance (PSD)

Référence :

- [1] FBMC vs OFDM Waveform Contenders for 5G Wireless Communication System. Parnika Kansal, Ashok Kumar Shankhwar# Department of Electronics, School of Engineering, Harcourt Butler Technical University (HBTU), Kanpur, India
- [2] The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance. Robin Gerzaguet1*, Nikolaos Bartzoudis2, Leonardo Gomes Baltar3, Vincent *Berg1, Jean-Baptiste Doré1, Dimitri Ktésnas1, Oriol Font-Bach2, Xavier Mestre2, Miquel Payaró2, Michael Färber3 and Kilian Roth3 # Gerzaguet et al. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking (2017)
- [3] Modulation and Multiple Access for 5G Networks. Yunlong Cai, Zhijin Qin, Fangyu Cui, Geoffrey Ye Li, and Julie A. McCann # cornel unersety library Submitted on 21 Feb 2017)

- [4] Overview of 5G modulation and waveforms candidates . Nekovee Maziar Wang Yue Tesanovic Milos Wu Shangbin Qi Yinan Al-Imari Mohammed # Download PDF Journal of Communications and Information Networks ,kJune 2016, Volume 1, Issue 1, pp 44–60

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Caractérisation d'un milieu poreux par une nouvelle méthode d'analyse harmonique

A. Oukhlef¹, A. Ambari², S. Champmartin², A. Despeyroux³

¹ Ecole Supérieure de Technologie, BP : 591, 23000 Béni Mellal, Maroc.

² Arts et Métiers ParisTech, 2 bd du Ronceray, 49035 Angers, France.

³ Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, K7K 7B4, Canada.

a.oukhlef.est@usms.ma

***Résumé-** Ce travail présente une nouvelle méthode pour aider à la caractérisation de la topologie des milieux poreux en termes de distribution de tailles de pores. Celle-ci repose sur l'analyse dynamique de l'écoulement oscillant à travers un milieu poreux. Elle consiste en l'utilisation de la fonction de transfert hydrodynamique du milieu poreux et plus particulièrement de son admittance. En effet, l'épaisseur de pénétration dans chaque pore est fonction de la fréquence d'oscillation du gradient de pression imposé. Le modèle de faisceau de capillaires parallèles (de type Carman-Kozeny) a été utilisé. Cette technique a été testée et validée avec succès pour plusieurs types de distributions, dans le cas où le fluide utilisé est newtonien et dans le cas où les fluides non-newtoniens. Pour rendre la résolution de ce dernier problème possible dans le cas des faibles non linéarités, nous avons introduit la notion « d'admittance généralisée » et utilisé avec succès la même démarche que celle adoptée dans le cas des fluides newtoniens. Par rapport aux techniques existantes, cette nouvelle approche se distingue par leur simplicité, leur non-toxicité et leur faible coût.*

***Mots-clés :** milieux poreux, distribution de tailles de pores, fluides non-newtoniens, écoulement oscillant.*

I. INTRODUCTION

Par ce travail nous présentons une nouvelle approche pour aider à la caractérisation de la topologie des milieux poreux en termes de distribution de tailles de pores (DTP). Cette technique repose sur l'analyse dynamique de l'écoulement oscillant d'un fluide newtonien (ou faiblement non newtonien) à travers un milieu poreux. Celle-ci repose sur l'influence de la DTP sur la fonction de transfert hydrodynamique du milieu poreux et par conséquent sur son admittance. Son principe est basé sur le fait que l'épaisseur de la couche limite hydrodynamique

$\delta \propto \sqrt{\nu/\omega}$, fonction de la fréquence d'oscillation du gradient de pression imposé au milieu poreux $\nabla P = \nabla P_0 e^{i\omega t}$, permet de scanner les différentes tailles de pores. Le modèle de faisceau de capillaires parallèles (de type Carman-Kozeny) a été utilisé ici. Cette technique a été validée en utilisant différents types de distributions, en utilisant un fluide newtonien (ou en loi de puissance faiblement non linéaire). Comparée aux techniques existantes [1-2], cette nouvelle technique se distingue par sa simplicité et sa non-toxicité. Parmi les méthodes expérimentales pour déterminer la DTP d'un milieu poreux on peut citer : la porosimétrie par intrusion du mercure [2], basée sur l'existence d'une pression d'invasion minimale inversement proportionnelle au rayon de pores et la méthode d'adsorption isotherme [3] basée sur les interactions moléculaires de type « Van-Der-Waals » entre la vapeur du gaz et la surface interne des pores. On distingue également la thermoporométrie [4], qui utilise deux approches différentes : soit la calorimétrie [5] soit la RMN [6]. Citons finalement la diffusion aux petits angles des rayons X ou des neutrons [7], l'analyse stéréologique [8] et la microscopie (à force atomique (AFM), électronique à balayage (MEB) et électronique à transmission (MET)) [9]. Ces techniques de mesure de la DTP présentent un certain nombre d'inconvénients comme la toxicité (utilisation du mercure), la destruction de l'échantillon (stéréologie ou la mise en œuvre de

hautes pressions), la complexité de l'interprétation des résultats (diffusion aux petits angles et thermoporométrie), la complexité et le prix des appareils (microscopie), la durée des mesures (adsorption isotherme et thermoporométrie)...

Dans ce travail, nous proposons une autre méthode pouvant être utilisée pour la détermination de la DTP [10]. Celle-ci est basée sur une analyse dynamique. En effet, la fonction de transfert du système ou plus simplement son admittance, définie comme le rapport de la réponse en débit au gradient de pression imposé : $\tilde{G}(\omega) = \tilde{Q}(\omega) / \nabla P_0$, est mesurée en fonction de la pulsation ω . Comme cette admittance dépend de la distribution de la taille de pores constituant le poreux, il est possible de résoudre le problème inverse que constitue la détermination de cette DTP. Rappelons que cette fonction de transfert élémentaire est caractérisée par une fréquence de coupure qui dépend du rayon r du capillaire concerné ($\omega^* \propto \nu / r^2$). Par conséquent, le module et la phase de l'amplitude complexe de cette admittance du milieu poreux sont fortement dépendants de la fréquence et de la distribution de tailles de pores. Cette approche originale qui permet de scanner les différentes tailles de pores sera développée dans le paragraphe suivant.

VII. APPROCHE POUR LA CARACTERISATION DE LA DTP

Nous allons maintenant nous consacrer à la description et à l'utilisation de cette méthode basée sur l'analyse dynamique de la DTP.

II-1) ADMITTANCE D'UN TUBE CAPILLAIRE (WOMERSLEY [11])

Dans un premier temps, nous avons besoin de la réponse en fréquence du débit d'un capillaire de section circulaire, de rayon r et de longueur L à travers lequel s'écoule un fluide newtonien de masse volumique ρ , de viscosité dynamique μ et

cinématique $\nu = \mu / \rho$, soumis à un gradient de pression sinusoïdal entre l'entrée et la sortie de tube cylindrique : $\nabla P = \nabla P_0 e^{i\omega t}$.

Comme dans les milieux poreux les longueurs des capillaires sont suffisamment longues par rapport à leurs diamètres, les effets d'entrée et de sortie sont négligeables. Dans ces conditions, ce problème reste linéaire et la réponse en débit reste sinusoïdale. L'équation de Navier-Stokes se réduit à celle de l'amplitude de la vitesse : $u(r', \omega, t) = \tilde{u}(r', \omega) e^{i\omega t}$ où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation et f la fréquence d'oscillation, r' et r sont respectivement le rayon courant dans le tube et le rayon de celui-ci :

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial r'^2} + \frac{1}{r'} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial r'} + \frac{i^3 \omega \tilde{u}}{\nu} = \frac{-\nabla P_0}{\mu} \quad (1)$$

En coordonnées cylindriques (r, θ, z) la solution de cette équation différentielle de type Bessel a été obtenue par Womersley [11]. En introduisant le nombre de Womersley $\alpha = r / \delta$, c'est-à-dire le rayon du tube normalisé par l'épaisseur de diffusion $\delta = \sqrt{\nu / \omega}$, on obtient une expression pour l'amplitude complexe du débit volumique :

$$\tilde{q}(\alpha, r) = \frac{\pi r^4 \nabla P_0}{i \mu \alpha^2} \left[1 - \frac{2J_1(\alpha i^{3/2})}{\alpha i^{3/2} J_0(\alpha i^{3/2})} \right] \quad (2)$$

Le capillaire de rayon r se comporte alors comme une conductance complexe d'admittance $\tilde{g}(\alpha, r)$:

$$\begin{aligned} \tilde{q}(\alpha, r) &= \tilde{g}(\alpha, r) \nabla P_0 \\ \Rightarrow \tilde{g}(\alpha, r) &= \frac{\pi r^4}{i \mu \alpha^2} \left[1 - \frac{2J_1(\alpha i^{3/2})}{\alpha i^{3/2} J_0(\alpha i^{3/2})} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

En normalisant l'expression de l'admittance (éq. 3) par celle aux très basses fréquences (TBF), que l'on peut calculer à partir de l'écoulement de Poiseuille :

$$g_{TBF}(r) = \frac{\pi r^4}{8\mu} \quad (4)$$

on obtient :

$$\tilde{g}_{Nor.}(\alpha) = \frac{\tilde{g}(\alpha, r)}{g_{TBF}(r)} = \frac{8}{i\alpha^2} \left[1 - \frac{2J_1(\alpha i^{3/2})}{\alpha i^{3/2} J_0(\alpha i^{3/2})} \right] \quad (5)$$

Les figures 1 et 2 présentent respectivement le module $\|\tilde{g}_{Nor.}(\alpha)\|$ et la phase $\varphi(\alpha)$ de l'admittance en fonction du nombre de Womersley.

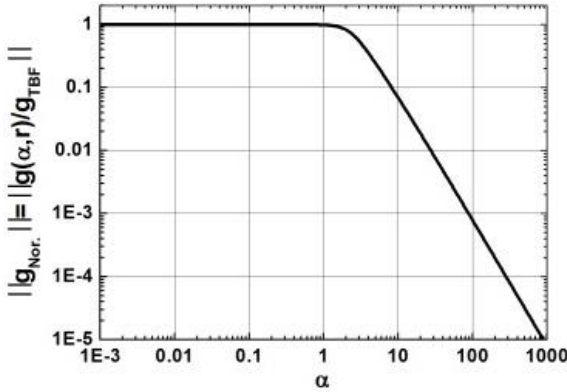


Fig. 1 Module de l'admittance en fonction de la fréquence réduite α .

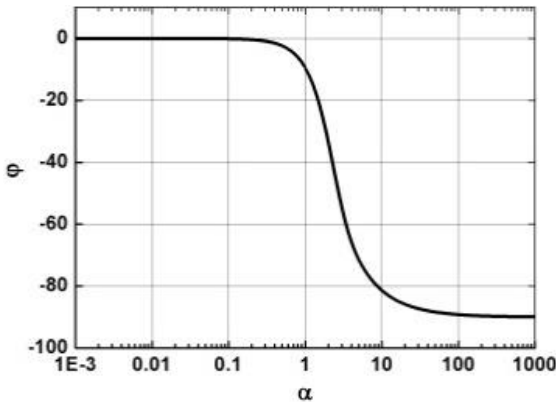


Fig. 2 Phase de l'admittance en fonction de la fréquence réduite α .

II-2) MODELISATION

Dans une première approximation et à l'instar de ce qui est utilisé par plusieurs chercheurs, nous adopterons le modèle de faisceau de capillaires parallèles (de type Carman-Kozeny [12,13]). Pour décrire l'écoulement dans un milieu poreux réel constitué de pores dont les rayons sont distribués de manière polydisperse, on considère que les rayons r sont distribués suivant une loi de probabilité $p(r)$ et soumis à un gradient de pression $\nabla P(t) = \nabla P_0 \exp(i\omega t)$. Dans le cas des fluides newtoniens le système est linéaire en régime laminaire. La réponse en débit total est parfaitement sinusoïdale. L'amplitude complexe du débit total $\tilde{Q}(\omega)$ à travers ce faisceau de capillaires soumis à ce gradient de pression s'écrit sous la forme intégrale suivante :

$$\tilde{Q}(\omega) = \int_0^\infty \tilde{q}(\omega, r) p(r) dr \quad (6)$$

Par conséquent, l'admittance totale est définie comme le rapport de la réponse en débit total au gradient de pression imposé $\tilde{G}(\omega) = \tilde{Q}(\omega) / \nabla P_0$. L'admittance totale du système peut donc être calculée par :

$$\tilde{G}(\omega) = \int_0^\infty \tilde{g}(\omega, r) p(r) dr \quad (7)$$

Où $\tilde{g}(\omega, r)$ est l'admittance d'un capillaire. Celle-ci représente le noyau de cette équation intégrale de type Fredholm [14]. Ce noyau est donné par l'équation (3) en remplaçant $\alpha = r/\delta$ par $\alpha = r\sqrt{\omega/\nu}$ pour l'analyse fréquentielle. Ici $p(r)$ est la fonction à déterminer par inversion de l'équation (7).

II-3) CALCUL INVERSE

La solution de l'équation de Fredholm (éq.7) est obtenue numériquement par une résolution basée sur une méthode matricielle. Rappelons que cette équation est inhomogène et de première espèce où $\tilde{G}(\omega)$ est le terme source et $\tilde{g}(\omega, r)$ le noyau de l'intégrale. On note $\tilde{G}_j = \tilde{G}(\omega_j)$ et $\tilde{g}_{ij} = \tilde{g}(\omega_j, r_i)$ et $p_i = p(r_i)$ avec j un indice variant de 1 à N (pulsations ω_j) et i un indice variant de 1 à N (rayons r_i). L'équation de Fredholm se réécrit sous une forme matricielle suivante :

$$\tilde{G}_j = \sum_{i=1}^N \tilde{g}_{ij} p_i \Delta r_i \text{ ou bien } \underline{\tilde{G}} = (\underline{\tilde{g}} \cdot \underline{p}) \Delta r \quad (8)$$

Mathématiquement, si le noyau $\underline{\tilde{g}}$ n'est pas singulier, la solution est unique et est donnée par la relation (9), où $\underline{\tilde{g}}^{-1}$ est la matrice inverse de $\underline{\tilde{g}}$.

$$\underline{p} = \frac{1}{\Delta r} (\underline{\tilde{g}}^{-1} \cdot \underline{\tilde{G}}) \quad (9)$$

VIII. APPLICATIONS ET RESULTATS

III-1) CAS DE L'UTILISATION D'UN FLUIDE NEWTONIEN

Pour vérifier la validité de notre méthode, nous sommes amenés à effectuer dans une première étape un calcul direct de l'admittance totale, en supposant connue à priori la densité de probabilité $p(r)$. Pour cela on choisit une distribution gaussienne monomodale de type :

$$p(r) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(r-m)^2/2\sigma^2} \quad (10)$$

de moyenne m et d'écart-type σ . A titre d'exemple nous prenons ; $m=100\mu m$ et $\sigma=20\mu m$. Pour obtenir l'admittance totale du système, on utilise la relation (7).

Pour plus de clarté, nous procédons à une adimensionnalisation des équations précédentes en normalisant le rayon par la racine carrée du moment d'ordre 2 : $r^+ = r/\sqrt{m_2}$, ceci afin de tenir compte de l'ordre de grandeur de la taille des pores. La pulsation est aussi normalisée par l'inverse du temps de diffusion de la quantité de mouvement : $\omega^+ = \omega/(v/m_2)$ ce qui nécessite expérimentalement la connaissance de v . Nous avons choisi à priori m_2 car il peut être calculé facilement si on connaît la porosité ϕ et la surface latérale totale du milieu poreux S .

$$m_2 = \int_0^\infty r^2 p(r) dr = \frac{\phi S}{\pi} \quad (11)$$

Après cette normalisation, le noyau complexe (admittance d'un seul capillaire) de l'équation de Fredholm devient :

$$\tilde{g}(\omega^+, r^+) = \frac{\pi m_2^2 r^{+2}}{i\mu\omega^+} \left[1 - \frac{2J_1(i^{3/2} r^+ \sqrt{\omega^+})}{i^{3/2} r^+ \sqrt{\omega^+} J_0(i^{3/2} r^+ \sqrt{\omega^+})} \right] \quad (12)$$

L'admittance totale équivalente normalisée s'écrit en définitive sous la forme suivante :

$$\tilde{G}^+(\omega^+) = \int_0^\infty \frac{r^{+2}}{i\omega^+} \left[1 - \frac{2J_1(i^{3/2} r^+ \sqrt{\omega^+})}{i^{3/2} r^+ \sqrt{\omega^+} J_0(i^{3/2} r^+ \sqrt{\omega^+})} \right] p^+(r^+) dr^+ \quad (13)$$

Après avoir introduit : $p^+(r^+) = \sqrt{m_2} p(r^+)$ et normalisé l'admittance totale par $G_c = \pi m_2^2 / \mu$ qui nécessite expérimentalement la connaissance de μ . La figure 3 présente l'évolution du module et de la phase de l'admittance totale adimensionnelle normalisée en fonction de la pulsation normalisée ω^+ .

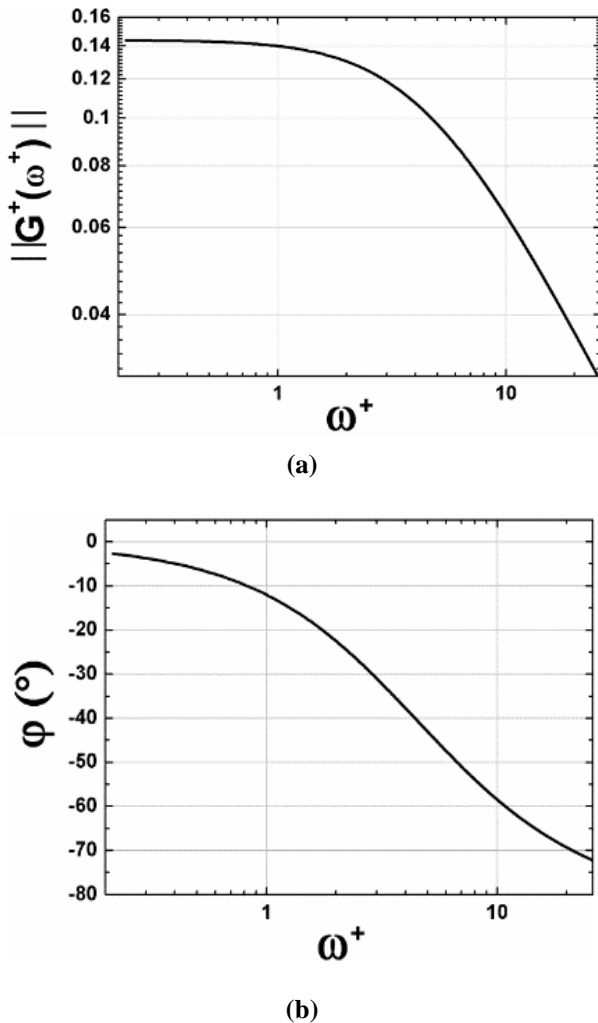


Fig. 3 Le module (a) et la phase (b) de l'admittance adimensionnelle équivalente en fonction de la pulsation. Ces deux courbes correspondent à la distribution initiale choisie.

A ce stade, nous « oublions » la distribution supposée et partant des valeurs tirées de la figure 3 du module et de la phase, on peut

retrouver la distribution de tailles de pores initiale normalisée. Maintenant, il est possible après l'inversion de la matrice complexe noyau, de calculer la densité de probabilité inconnue et de la comparer à celle supposée initialement. La figure 4 montre la parfaite concordance des résultats obtenus et confirme la validité de la méthode. Cependant pour retrouver la distribution des rayons dimensionnels il suffit d'utiliser les variables réduites.

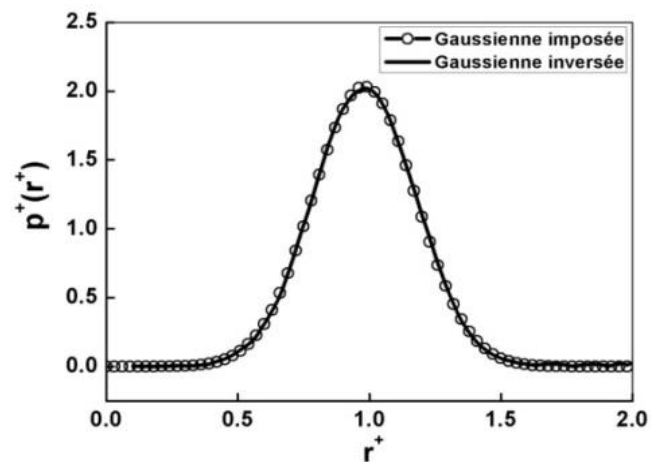


Fig. 4 Restitution de la distribution supposée normalisée par inversion de l'éq.7.

III-2) CAS DE L'UTILISATION D'UN FLUIDE FAIBLEMENT NON-NEWTONIEN

En fait, l'utilisation d'un fluide newtonien dans cette technique décrite précédemment évite l'apparition d'harmoniques qui viendraient fausser la détermination de la DTP. Dans cette sous-section, nous allons utiliser un fluide en loi de puissance dont la loi de comportement est donnée par :

$$\tau_{r_z} = k \left(\frac{-\partial u_z}{\partial r'} \right)^n \quad (14)$$

Où k est la consistance du fluide, n son indice de fluidité, u_z la vitesse dans la direction axiale de l'écoulement et τ_{r_z} est la contrainte de

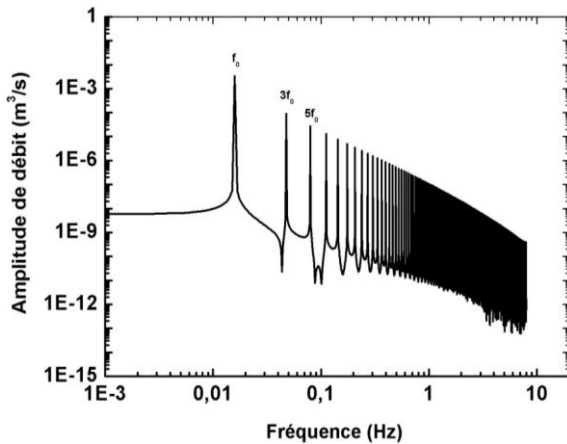
Volume II N° 6

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

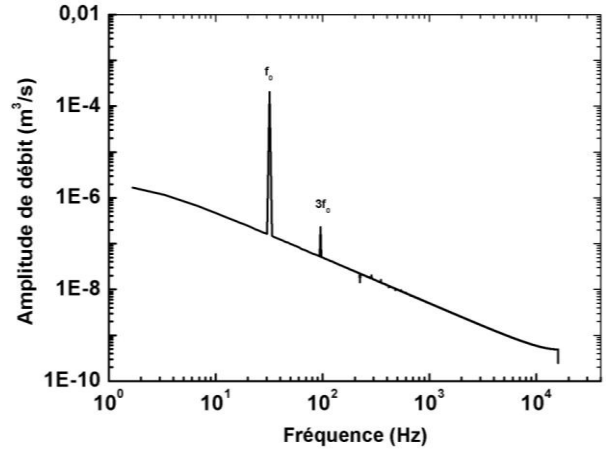
cisaillement. Cependant, en appliquant cette approche aux fluides en loi de puissance, nous avons montré que, tant que l'énergie contenue dans le deuxième harmonique est très faible par rapport à celle du 1^{er} harmonique le problème reste pratiquement linéaire. En effet, l'équation de mouvement à résoudre dans le cas d'un fluide d'Ostwald en régime oscillatoire se réduit à :

$$\rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = -\nabla P_0 e^{i\omega t} + k \left| \frac{\partial u_z}{\partial r'} \right|^{n-1} \left(\frac{1}{r'} \frac{\partial u_z}{\partial r'} + n \frac{\partial^2 u_z}{\partial r'^2} \right) \quad (15)$$

Malheureusement, cette équation est non-linéaire, ce qui nous oblige à la résoudre numériquement. Pour cela, nous avons utilisé un code de calcul basé sur la méthode des volumes finis (Fluent).



(a) : $\alpha_n = 0,25$



(b) : $\alpha_n = 11,20$

Fig. 5 Amplitude de la FFT du débit en fonction de la fréquence pour $n = 0,9$ aux basses et hautes fréquences d'oscillations de la pression.

Sur la figure 5 nous donnons les modules de la FFT du débit calculé. Ces résultats ont été obtenus en calculant la FFT du débit aux bas et hauts nombres de Womersley généralisés qui s'introduit dans les équations de mouvement normalisées et qui s'écrit comme suit (a est le rayon du tube) :

$$\alpha_n = (\rho\omega)^{1/2} \left(\frac{a^{n+1}}{k\nabla P_0^{n-1}} \right)^{1/2n} \quad (16)$$

A titre d'exemple, nous donnons sur les figures 5.a et 5.b les résultats correspondants à la FFT du débit pour $n = 0,9$ et respectivement à ($\alpha_n = 0,25$) et ($\alpha_n = 11,20$) pour de faibles nombres de Reynolds. En premier lieu on constate que seuls les harmoniques multiples impairs de la fréquence fondamentale sont présents dans ce signal ($f_0, f_1 = 3f_0, f_2 = 5f_0, \dots$). L'apparition d'harmoniques dans la FFT est bien une preuve que le système est fondamentalement non linéaire. La figure 5.a correspond à un nombre de Womersley généralisé ($\alpha_n = 0,25$) pris sur le plateau de la figure 6.a et la figure 5.b

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

correspond à une valeur prise dans le domaine des grands nombres de Womersley généralisés ($\alpha_n = 11,20$). En fait, sur la figure 6.a on observe que l'amplitude du 2^{ème} harmonique qui dépend de l'indice de fluidité n reste très faible par rapport au 1^{er} harmonique pour $n > 0,7$. Cette figure montre en définitive que le problème reste faiblement non linéaire pour $n > 0,7$, c'est-à-dire pour les fluides rhéoépaississants et les rhéofluidifiants pour lesquels $n > 0,7$. Ce résultat est confirmé par la figure 6.b.

deux premiers harmoniques aux faibles nombres α_n en fonction de l'indice de fluidité n .

Dans le cas instationnaire, en s'inspirant du comportement TBF, on peut définir « une admittance généralisée » par son expression :

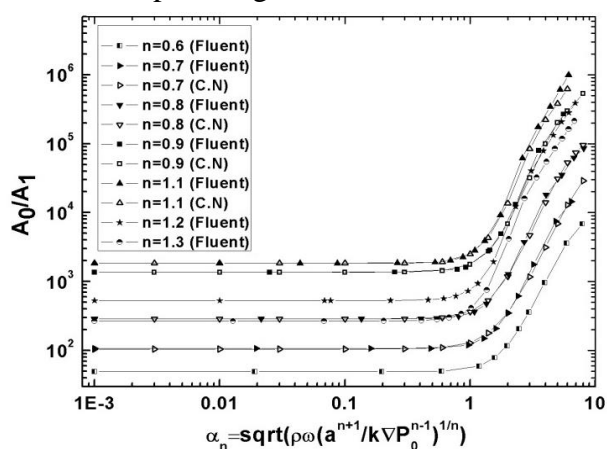
$$\tilde{G}(\omega, r, n) = \frac{\tilde{Q}^n(\omega, r, n)}{\nabla P_0} \quad (17)$$

Celle-ci peut être normalisée par sa valeur TBF :

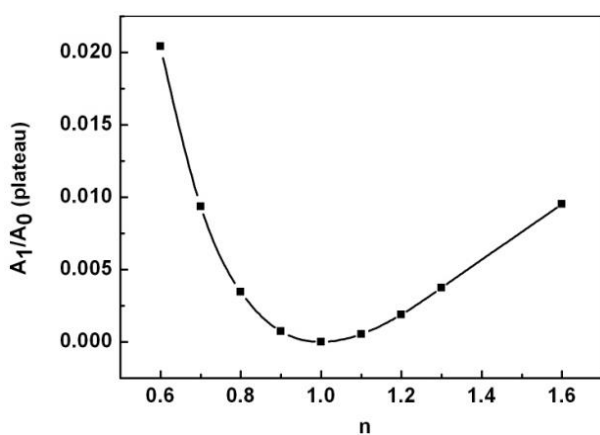
$$\tilde{g}(\alpha, n) = \frac{\tilde{G}(\omega, r, n)}{G_{TBF}(\omega, r, n)} \quad (18)$$

Où finalement $\tilde{g}(\alpha, n)$ est « l'admittance généralisée » normalisée calculée numériquement pour un seul tube. Celle-ci constitue le noyau de l'équation de Fredholm à résoudre.

Après avoir numérisé l'amplitude et la phase de l'admittance généralisée totale, correspondante à une distribution gaussienne, nous avons utilisé la même procédure que celle utilisée pour les fluides newtoniens précédemment (pour $n = 0,8$) afin de résoudre numériquement le problème inverse. Enfin, nous remarquons sur la figure 7 la validité de cette approche dans le cas des fluides en loi de puissance faiblement non linéaires pour $n > 0,7$. Finalement, la validation de cette méthode a été étendue aux cas des distributions bi et tri-modales.



(a)



(b)

Fig. 6 : (a) rapport des amplitudes du 1^{er} harmonique par celui du 2^{ème} en fonction du α_n dans le cas d'un seul tube de rayon $r = a$, (b) représente l'inverse du rapport des

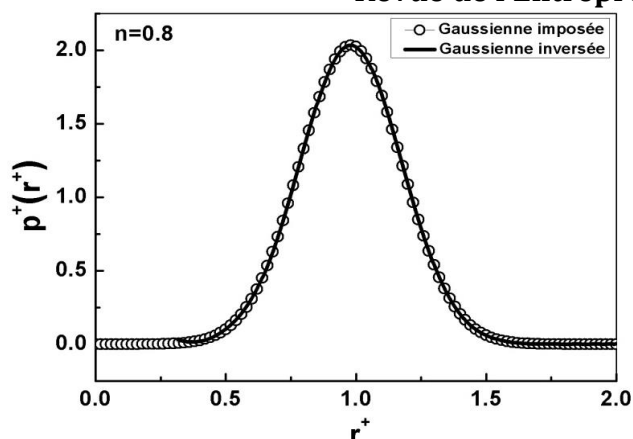


Fig. 7 Comparaison entre la distribution originale et celle calculée par inversion pour $n = 0,8$.

IX. CONCLUSION

Pour conclure, après avoir effectué la résolution inverse du problème de l'identification de la distribution de tailles de pores $p(r)$ par une méthode fréquentielle utilisant un fluide newtonien. L'efficacité de cette technique a été prouvée en l'appliquant à différentes distributions gaussiennes de tailles de pores : uni, bi ou/et trimodales [10]. Cette procédure pourrait donc constituer une nouvelle méthode originale, simple, non toxique et peu chère pour l'industrie afin de caractériser la DTP d'un milieu poreux. En effet, celle-ci a été validée expérimentalement dans notre équipe dans le cadre de la thèse de G. Malvault [15]. Pour généraliser la méthode aux cas des fluides en loi de puissance pour des indices de fluidités qui conduisent le système à un comportement faiblement non linéaire, nous avons adopté avec succès la même démarche que celle utilisée dans le cas des fluides newtoniens par l'introduction de l'admittance généralisée. Tout ceci fait de cette méthode peut constituer dorénavant une procédure très adaptée aux milieux poreux avec l'utilisation de fluides faiblement non linéaires.

References

[1] A. E. Scheidegger, 1974. The physics of flow through porous media, 3ème ed., University of Toronto Press.

[2] F. A. L. Dullien, 1992. Porous Media- Fluid Transport and Pore Structure, 2ème ed., Academic Press.

[3] E. P. Barrett, L. G. Joyner, P. P. Halenda, The determination of pore volume and area distributions in porous substances computations from Nitrogen Isotherms, Journal of American Chemical Society 73 (1951), 373-380.

[4] M. Brun, A. Lallemand, J-F Quinson, C. Eyraud, A new method for determination the simultaneous of the size and the shape of pores: the thermoporometry, Thermochim. Acta 21 (1977) 59-88.

[5] J. Riikonen, J. Salonen, V-P. Lehto, Calorimetric determination of pore size distribution using thermoporometry, Society of physical pharmacy conference, Turquie, 2006.

[6] A. I. Sagidullin, I. Furo, Pore size distribution in small samples and with nanoliter volume resolution by NMR cryoporometry, Langmuir 24 (2008) 4470-4472.

[7] H. Tamon, H. Ishizaka, Saxe study on gelation process in preparation of resorcinol-formaldehyde aerogel, J. of Colloid and Interface Science 206 (1998) 577-582.

[8] J. M. Haynes, Stereological analysis of pore structure, J. Materials and Structures 6 (1973) 175-179.

[9] S. Rodts, 2001. Etude du passage micro-macro pour le transport par diffusion en milieu poreux Application aux expériences de RMN-GCP, Thèse, Ecole Nationale Des Ponts et Chaussées.

[10] A. Oukhlef, 2011. Détermination de la distribution de tailles de pores d'un milieu poreux, Thèse, Ecole Arts et Métiers ParisTech d'Angers.

[11] J. R. Womersley, Method for the calculation of velocity, rate of flow and viscous drag in arteries when the pressure gradient is known, J. Physiol 127 (1955) 553-563.

[12] Kozeny, Uber kapillare Leitung des Wassers im Boden, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien 136 (2a) (1927) 106-271.

[13] P. C. Carman, Fluid Flow through Granular Beds, Chemical Engineering Research and Design 15a (1937) 150-166.

[14] M. Krasnov, A. Kissélev, G. Makarenko, 1976. Equations intégrales, Editions MIR, Moscou.

[15] G. Malvault, 2013. Détermination expérimentale de la distribution de taille de pores d'un milieu poreux par l'injection d'un fluide à seuil ou analyse harmonique, Thèse, Ecole Arts et Métiers ParisTech d'Angers.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Greenhouse Temperature and Humidity Estimator Design Based on Least Square SVM

M. Outanoute¹, A. Selmani¹, M. Amini Alaoui¹, M. Guerbaoui², A. Ed-dahhak²,
A. Lachhab², B. Bouchikhi¹

¹ *Electronic & Instrumentation Group, Physics department, Faculty of Sciences,
Moulay Ismail University, Meknes, Morocco*

² *Modelling, Systems Control and Telecommunications Team, High School of Technology,
Moulay Ismail University, Meknes, Morocco
E-mail: outanoute.med@gmail.com*

Abstract- *In this paper, a Least Squares Support Vector Machine (LS-SVM), as a modern approach to data analysis and modelling using the methods and tools of artificial intelligence, was employed to model and predict the temperature and relative humidity as the prime climatic parameters for the development and growth of the crop under a greenhouse. In the development of LS-SVM models, linear kernel, polynomial kernel and Gaussian radial basis function (RBF) were applied to train the LS-SVM. For that, external climate variables and command inputs were considered as input variables to the model to get the estimated greenhouse temperature and relative humidity. The performances of the LS-SVM models, computed through the Root Mean Square Error (RMSE) and determination coefficient. The proper LS-SVM tuning parameters, the regularization parameter γ and the kernel function parameter σ were adjusted to get the best LSSVM outputs. The simulation results showed that RBF kernel boasted better precision and generalization than linear and polynomial kernels and thus able to provide precision for the relevant greenhouse climate parameters estimation.*

Keywords: *Greenhouse climate, Modelling, Regression, Estimation, Least Squares Support Vector Machine (LSSVM).*

I. INTRODUCTION

As is well known, research on greenhouse climate control has gained much interest during the last years in the field of agriculture; as it allows the creation of an indoor microclimate for crop development, protecting it from adverse outdoor conditions in order to increase quality and quantity of greenhouse production and also permits to cultivate certain plants all over the year [1-2]. Therefore, this microclimate is controlled by artificial actuation such as heating

and ventilation using effective control techniques to provide the best optimum environmental growing conditions for the crops [3-4]. However, for plants of high complexity, like greenhouse process, it is of major importance to developing as accurate models as possible. On the basis of a precise model, one can then design a reliable simulator that makes it possible to define the modes of the plant functioning under different operating conditions that are significant for the tuning of the control system and for the plant supervision [5-6]. One common approach to estimate greenhouse climate model is to develop data-driven models validated with measured data that relate the variables (input-output relationship) in the system. On the other hand, this extraction of knowledge from the data requires large datasets and sophisticated modelling techniques [7]. Various methods are used to model and to predict the temperature and relative humidity in many greenhouses systems [8]. Support vector machine (SVM) is a supervised learning model with a learning algorithm that becomes more popular technique which analysed data and recognized patterns that are used for classification and regression analysis [9-10].

In this work, the support vector regression based prediction will be used to model and to

predict the temperature and relative humidity under greenhouse and compare the performance between three different type of LSSVM kernels models namely; RBF, Linear and polynomial kernels.

II. MATERIAL AND METHODOLOGY

A. Experimental Setup

The experimental greenhouse used in this experimentation is shown in Fig. 1. Is equipped with a control system that allows both the acquisition and monitoring and automatic control of greenhouse climate parameters. The internal climate is defined by the internal temperature; the internal relative humidity and CO₂ content, while the external is composed of the Temperature, Relative humidity, and solar radiation, all of these are measured with its corresponding sensors. For that, the signals delivered from sensors are conditioned, amplified and then transmitted to the computer system through the broad data acquisition PCI 6024E device from National Instrument, the control and operating software was designed in the Matlab/Simulink environment to implement the real-time control. The system is able to provide a real-time monitoring of different climatic parameters inside and outside the greenhouse. In fact, the system was used as support for developing and testing various advanced control strategies [11-13].

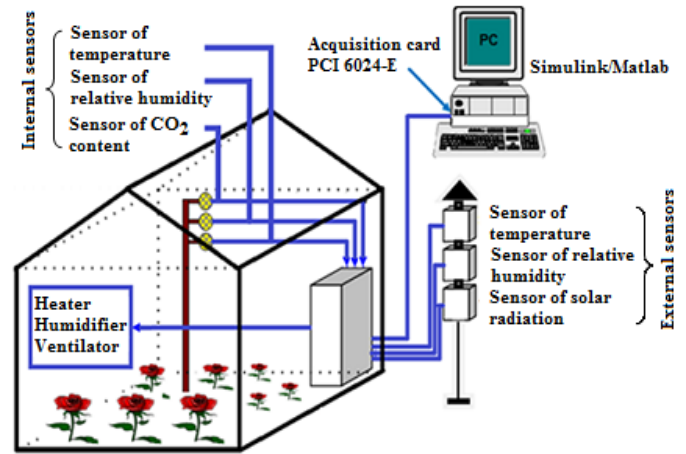
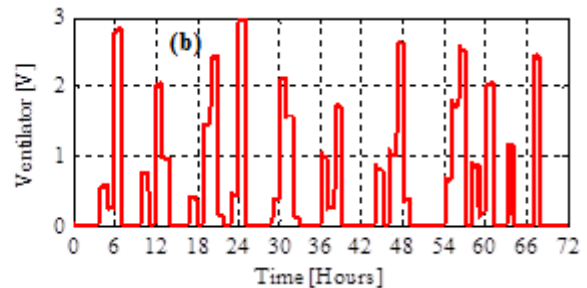
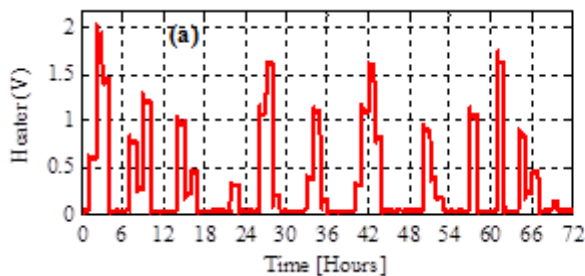


Fig. 1. Schematic diagram of greenhouse experimental system.

B. Data Collection and Preprocessing

For modelling purposes, this experiment collected data of three days, acquired with a sampling time of 10 seconds, contain outside and inside climate variables measured were internal temperature (T_{int}), external temperature (T_{ext}), internal relative humidity (RH_{int}) and external relative humidity (RH_{ext}), and the data pattern of input excitation signals sequences which are Heater (cmd_H) and ventilator (cmd_V) actuators command corresponds to the outputs variables (temperature and relative humidity), were shown in Fig. 2.



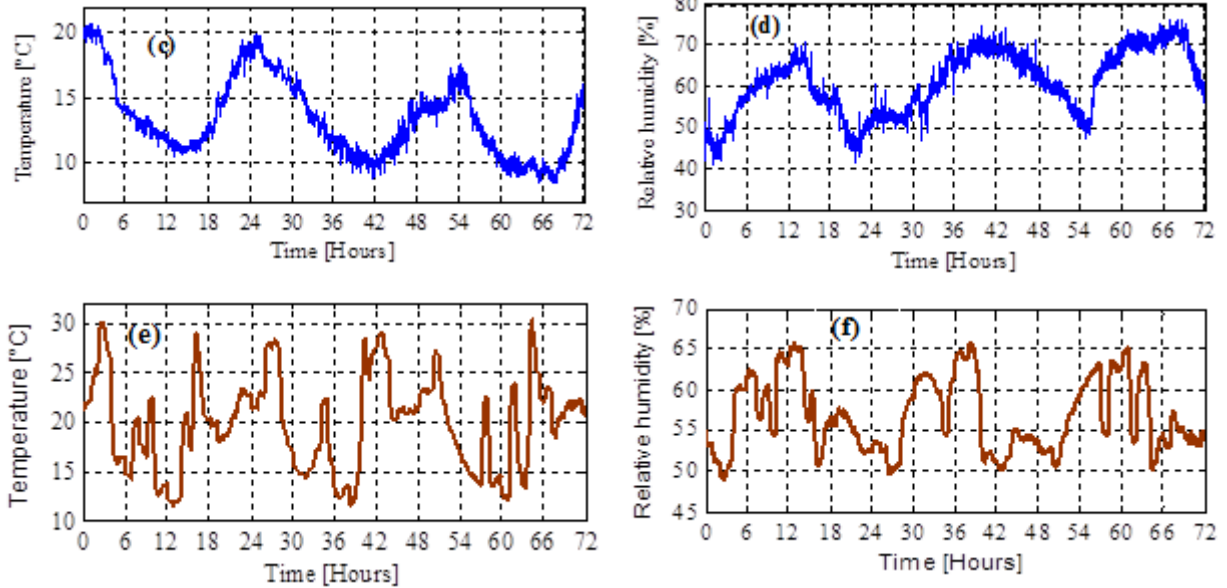


Fig. 2. Data input and output variables (a) Command heater, (b) Command ventilator, (c) External temperature, (d) External relative humidity, (e) Internal temperature and (f) Internal relative humidity.

The original data collected are not in the same order of magnitude, which can influence the accuracy of the neural network training. For that all data must be pre-treated and normalized as follows:

$$x_n = \frac{0.99(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})} + 0.01 \quad (1)$$

where x is the original data, x_n the normalized input or output values, x_{min} and x_{max} are the minimum and maximum values of the concerned variable respectively.

C. LS-SVM Modelling Theory

Least Square Support Vector Machine (LS-SVM) is a supervised learning model with a learning algorithm [14]. They offer a very powerful method of deriving efficient models for multidimensional linear and nonlinear classification and regression analysis [15]. By a nonlinear function φ , the data are mapped from the original feature space to a higher dimensional transformed one (Fig. 3).

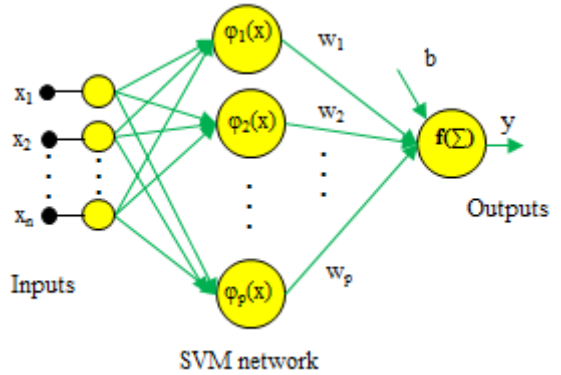


Fig. 3. An LS-SVM neural network structure.

The nonlinear function φ is approximate in a linear way as follows [16]:

$$f(x) = w^T \varphi(x) + b \quad (2)$$

with the given training data set $\{x_i, y_i\}_{i=1}^N$ where N represents the number of training data set, x_i is the input data, and y_i is the output data, w is the weight vector, $\varphi(\cdot)$ is the nonlinear mapping function and b is the bias.

The optimal regression function is given according to the structural minimization principle as [17]:

$$\min J(w, e) = \frac{1}{2} w^T w + \frac{\gamma}{2} \sum_{i=1}^m e_i^2 \quad (5)$$

Subject to the equality constraints:

$$Y_i = w^T \varphi(X_i) + b + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

where e_i is the residual error variable.

In order to solve the optimization problem, a Lagrangian function is defined as follows [18]:

$$L(w, b, e, \alpha) = J(w, e) - \sum_{i=1}^N \alpha_i [w^T \varphi(X_i) + b + e_i - y_i] \quad (7)$$

where α_i are the Lagrange multipliers which can be either positive or negative values. The conditions for optimality can be obtained by solving the partial derivatives from the objective function with respect to the parameters which yields the linear regression of [19]:

$$\begin{bmatrix} 0 & I_N^T \\ I_N & \Omega + \gamma^{-1} I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

where $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T$ is called the support vector, whose support values α_i are proportional to the residual errors e_i by the regularization factor $\gamma \in R$ and I is an identity matrix.

Besides, the kernel trick is employed to derive that:

$$\Omega_{ij} = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = K(x_i, x_j) \quad (9)$$

where K is a predefined kernel function.

Then, the solution for the LS-SVM regression problem can be derived [20]:

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i K(x, x_i) + b \quad (10)$$

where K is the kernel function satisfying Mercer's condition, x_i is the training data, and x denotes the new input data.

For the LS-SVM modelling, both γ and σ parameters should be determined for each input data set. For this purpose in this study γ and σ were determined through a trial-error process.

There are several choices of kernel function available which are known as follow [21]:

i) Linear kernel

$$K(x_i, x_j) = x_i^T x_j \quad (11)$$

ii) Polynomial kernel

$$K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + t)^d, \quad t \geq 0, \quad (12)$$

with t the intercept and d the degree of the polynomial.

iii) Radial Basis Function (RBF) kernel

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x_i - x_j\|^2\right) \quad (13)$$

with σ^2 the variance of the Gaussian kernel.

The LS-SVM model was developed with three different SVM kernel functions (linear, polynomial and RBF). The performances of these three different LS-SVM models were evaluated. For each type of SVM model developed, few different kernel functions were applied in order to analyse the best kernel and parameter that will give the best result. The LS-SVM tuning parameters sigma (γ) and gamma (σ) were manually adjusted to get the best LS-SVM output models.

D. Statistical Performance Indices

In this study, two different performance criteria of this model were evaluated based on the difference value between the real system outputs data and the predicted value from the model. Namely, the Mean Square Error (MSE), the Variance Accounted For (VAF). The calculation was performed using equations (14) and (15):

$$RMSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2 \tag{14}$$

$$VAF = \left[1 - \frac{\text{var}(y - \hat{y})}{\text{var}(y)} \right] \cdot 100\% \tag{15}$$

where N is the number of training or testing data pairs, $y(k)$ and $\hat{y}(k)$ are, respectively, the measured value and estimated model outputs value.

III. MODELLING RESULTS

The LS-SVM modelling algorithm is applied to analyse its performance in the greenhouse temperature and relative humidity estimation model. For that three models with different kernel functions (linear, polynomial and RBF) are compared. Each of the SVM models was trained with the training data and the resulted output was recorded. For that, the data of the two first days were used for the training purpose of the LS-SVM model. After running for train data, the LS-SVM model was being verified with test data set in order to ensure the accuracy of the system and to verify the capability in predicting the best result. The analysis has been carried out on the trained LS-SVM model by varying each of kernels type and its parameters. Different values of γ and σ have been tried to get the best result. Training and testing analysis of LS-SVM have been carried out by using MATLAB.

The structure diagram of greenhouse climate parameters estimator based on LSSVM is as Fig. 4.

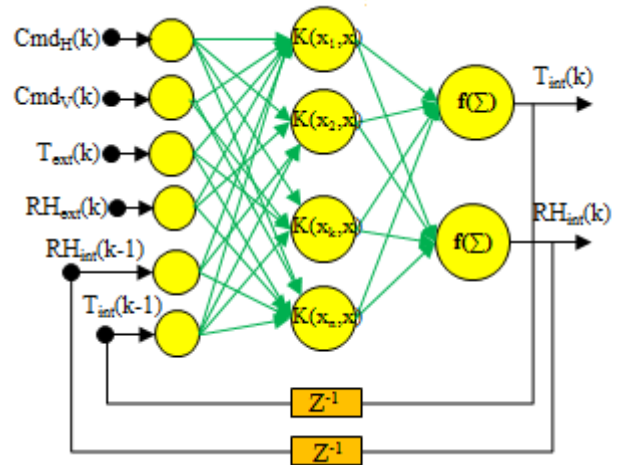


Fig. 4. LSSVM-based greenhouse climate parameters estimator structure diagram.

The estimation results of greenhouse temperature humidity system are shown in Fig. 5, Fig. 6 and Fig. 7 for the three models based on linear, polynomial and RBF kernel respectively.

It is seen that from this comparison results that the trained LS-SVM model with the RBF kernel captures the greenhouse temperature and relative humidity accurately than the models elaborated by using the linear and polynomial kernels. Therefore, the results demonstrate a good generalization capacity of the LSSVM greenhouse model.

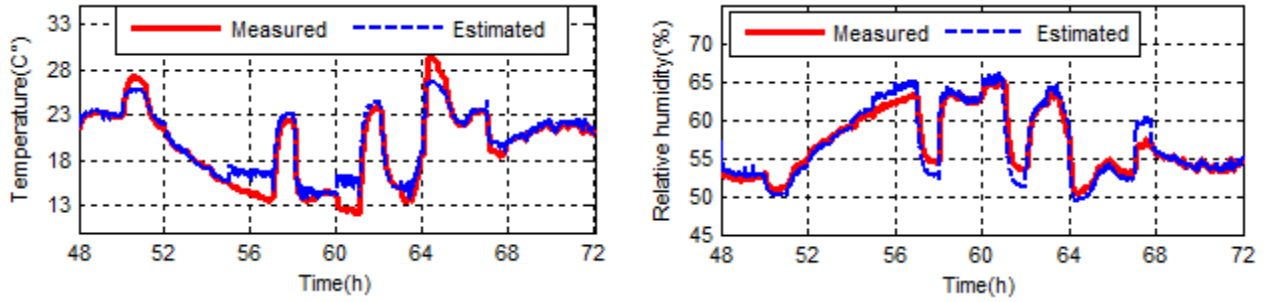


Fig. 5. : Mesasured and estimated outputs by Linear kernel LSSVM model.

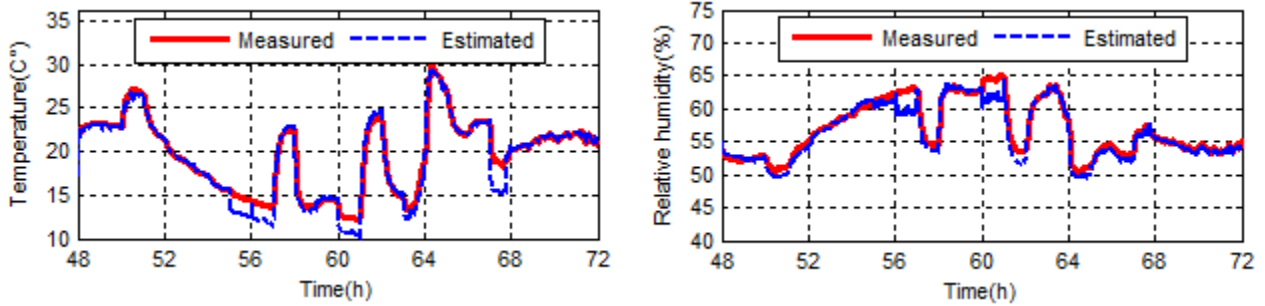


Fig. 6. Mesasured and estimated outputs obtained by polynomial kernel LSSVM model.

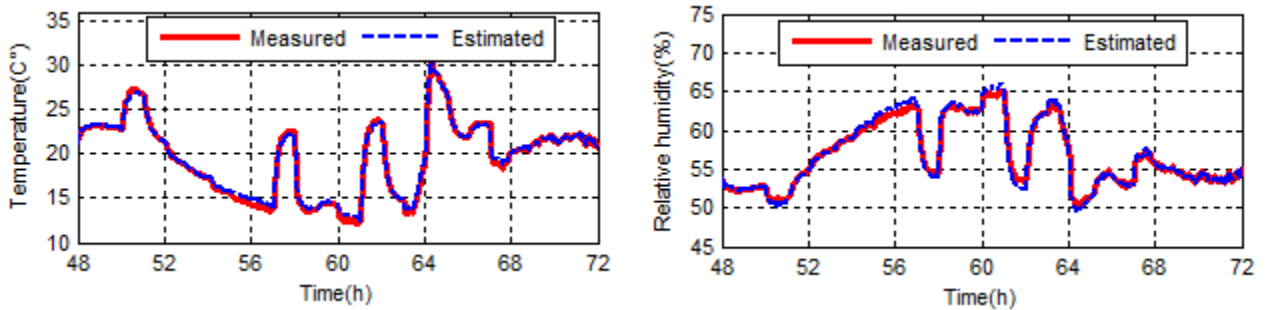


Fig. 7. Mesasured and estimated outputs obtained by RBF kernel LSSVM model.

The resulted RMSE and VAF performance indices, evaluated between measured and estimated temperature and relative humidity determined by different models used in this study are tabulated in Table 1 and Table 2.

TABLE I
TRAINING RMSE INDICES FOR ALL LS-SVM MODELS

Methods	Training RMSE	
	T_{int}	RH_{int}
Linear kernel	0.0290	0.0423
Polynomial kernel	0.0155	0.0189
RBF kernel	0.0148	0.0172

TABLE II:
TEST MSE AND VAF INDICES FOR ALL LS-SVM MODELS

Methods	Test RMSE		Test VAF (%)	
	T_{int}	RH_{int}	T_{int}	RH_{int}
RBF kernel	0.083	0.160	99.56	99.12
Polynomial kernel	0.970	1.328	98.52	97.93
Linear kernel	1.133	1.454	95.86	95.08

From the training and testing results, it shows that RBF kernel LS-SVM gives the best performance with the lowest root mean squared error and a better VAF value as compared to polynomial and linear kernel LS-SVM model.

Therefore, the superiority of the LS-SVM with kernel function model over the models is verified for the temperature and relative humidity estimation task.

CONCLUSION

In this study, three different SVM models were applied to estimate and to predict the two prime climatic parameters under greenhouse system (temperature and humidity). It can be concluded that RBF kernel LSSVM produced the most outstanding result as compared to the linear and polynomial LSSVM models. It was also found that RBF kernel function made a better kernel function because it predicts better than the linear and polynomial kernel. Finally, LSSVM is promising technique to use for estimation of the climate parameter under greenhouse system.

References

- [1] Shamshiri R., Ismail W. I. W. A review of greenhouse climate control and automation systems in tropical regions. *Journal of Agricultural Science and Applications*. 2013. 2(3). p. 176-183.
- [2] Van Beveren P. J. M., Bontsema J., van Straten G., and Van Henten E. J. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds *Applied Energy*. 2015. 159. p. 509-519.
- [3] Lu H. G., Li C. Y., and Jiang J. P. Application of intelligence control in agriculture greenhouses. In *Applied Mechanics and Materials*. 2015. 719. p. 293-297.
- [4] Van Beveren, P.J.M., Bontsema, J., van Straten, G., and van Henten, E.J. Minimal heating and cooling in a modern rose greenhouse. *Appl. Energy*. 2015. 137. p. 97-109.
- [5] Ou, Y., Yi, H. and Jiang, L. Greenhouse temperature variation study. *Northern Horticulture*. 2014. 4. p. 37-41.
- [6] Zou W., Yao F., Zhang B., He C., and Guan Z. Verification and predicting temperature and humidity in a solar greenhouse based on convex bidirectional extreme learning machine algorithm. *Neurocomputing*. 2017. 249. p. 72-85.
- [7] Suzuki Y., Kaneda Y., and Mineno H. Analysis of Support Vector Regression Model for Micrometeorological Data Prediction. *Computer Science and Information Technology*. 2015. 3(2). p. 37-48.
- [8] Samui P., Sitharam T. G. Application of Least Squares Support Vector Machine in seismic attenuation prediction. *ISET Journal of Earthquake Technology*. 2009. 46 (3-4). p. 147-155.
- [9] Samui P. Application of Least Square Support Vector Machine (LSSVM) for determination of evaporation losses in reservoirs. *Engineering*. 2011. 3(4). p. 431-434.
- [10] Sachindra D. A., Huang F., Barton A., and Perera B. J. C. Least square support vector and multi-linear regression for statistically downscaling general circulation model outputs to catchment streamflows. *International Journal of Climatology*. 2013. 33(5). p. 1087-1106.
- [11] Ed-Dahhak A., Guerbaoui M., El Afou Y., Outanoute M., Lachhab A., Belkoura L., and Bouchikhi B. Implementation of fuzzy controller to reduce water irrigation in greenhouse using LabVIEW. *International Journal of Engineering and Advanced Technology Studies*. 2013. 1(2). p. 12-22.
- [12] El Afou Y., Belkoura L., Outanoute M., Guerbaoui M., Rahali A., Ed-Dahhak A., Lachhab A., Join C., and Bouchikhi B. Feedback techniques using PID and PI intelligent for greenhouse temperature control. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2014. 3(6). p. 9779-9792.
- [13] Guerbaoui M., El Afou Y., Ed-dahhak A., Lachhab A. and Bouchikhi B. PC-based automated drip irrigation system. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2013. 5(1). p. 221-225.
- [14] Stephen J. E., Kumar S. S., and Jayakumar J. Nonlinear modeling of a switched reluctance motor using LSSVM-ABC. *Acta Polytechnica Hungarica*. 2014. 11(6). p. 143-158.
- [15] Yu H., Chen Y, Hassan S. G., and Li D. Prediction of the temperature in a Chinese solar greenhouse based on LSSVM optimized by improved PSO. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2016. 122. p. 94-102.
- [16] Balabin R. M., Lomakina E. I. Support vector machine regression (SVR/LS-SVM)-an alternative to neural networks (ANN) for analytical chemistry. Comparison of nonlinear methods on near infrared (NIR) spectroscopy data. *Analyst*. 2011. 136(8). p. 1703-1712.
- [17] Liao, J., Qu, B., and Zheng, N. Effects of process parameters on the extraction of quercetin and rutin from the stalks of euonymus alatus (thumb) sieb and predictive model based on least squares support vector machine optimized by an improved fruit fly optimization algorithm. *Applied Sciences*. 2016. 6(11). p. 340-359.
- [18] Ramedani Z., Omid M., Keyhani A., Khoshnevisan B., and Saboohi H. A comparative study between fuzzy linear regression and support vector regression for global solar radiation prediction in Iran. *Solar Energy*. 2014. 109. p. 135-143.
- [19] Sun F., Li X., Liao H., and Zhang, X. A bayesian least-squares support vector machine method for predicting the remaining useful life of a microwave component. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. 9(1). p. 1-9.
- [20] Ahmadi, M. A. Toward reliable model for prediction drilling fluid density at wellbore conditions: A LSSVM model. *Neurocomputing*. 2016. 211. p. 143-149.
- [21] Gorjaei, R. G., Songolzadeh, R., Torkaman, M., Safari, M., & Zargar, G. A novel PSO-LSSVM model for predicting liquid rate of two phase flow through wellhead chokes. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015. 24. p. 228-237.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Commande MPPT utilisant un contrôleur PI-Flou appliqué à un système photovoltaïque autonome

F.E. Tahiri¹, K. Chikh^{1,2} et M. Khafallah¹

¹ Laboratoire d'Energie et Systèmes Electriques(LESE), Université Hassan II -ENSEM Casablanca, Maroc

² Laboratoire d'Ingénierie et de Technologies Appliquées (LITA), Université Sultan Moulay Slimane-EST Béni-Mellal, Maroc

fatima-ezzahra.tahiri@ensem.ac.ma

Résumé- Ce document présente un contrôleur Proportionnel Intégral Flou (PI-Fou) utilisé pour suivre le point de puissance maximale (MPPT: Maximum Power Point Tracker) d'un système photovoltaïque (SPV) autonome composé d'un générateur photovoltaïque, d'un hacheur élévateur et d'une charge. Le contrôleur PI-Flou, appliqué au SPV autonome améliore les performances du système et permet d'obtenir de bonnes réponses par rapport à d'autres techniques de commandes MPPT. En effet, ce contrôleur proposé est utilisé pour commander l'hacheur élévateur afin de maximiser le transfert de puissance quelles que soient les variations de l'éclairement et de la température.

Les résultats de simulation, présentés dans ce travail, obtenus en utilisant l'environnement Matlab/Simulink, montrent l'efficacité et les bonnes performances du système proposé.

Mots-clés : SPV autonome, MPPT, PI-Flou, Générateur photovoltaïque, Hacheur élévateur.

I. INTRODUCTION

Ces dernières années, la production d'électricité à partir des sources d'énergies renouvelables augmente en raison de problèmes environnementaux et l'insuffisance des sources d'énergies traditionnelles dans un avenir proche.

Le système solaire photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelables importantes. Il offre de nombreux avantages tels que : l'énergie produite n'est pas polluante, nécessitant peu de maintenance et inépuisable. [1][2]

Cependant, le système photovoltaïque (SPV) a toujours un rendement de conversion relativement faible. En effet, la puissance délivrée par le module PV dépend de l'irradiation, de la température et des charges électriques et il a

un maximum (MPP) à un certain point de fonctionnement [3]. Au point de puissance maximale (MPP), le générateur photovoltaïque (GPV) fonctionne à son rendement le plus élevé. Par conséquent, pour extraire la puissance maximale dans les différentes conditions énoncées précédemment, des techniques pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) sont utilisées pour contrôler le point de puissance maximal du GPV via un convertisseur continu-continu.

Le contrôleur MPPT peut être réalisé à base de différentes méthodes et algorithmes.

Cet article nous proposons un contrôleur Proportionnel Intégral Flou (PI-Fou) pour suivre le point de puissance maximale d'un SPV autonome quelles que soient les variations de l'éclairement et de la température.

La figure 1 montre la structure en blocs simplifiée du système étudié. Il contient un générateur photovoltaïque, un convertisseur élévateur continu-continu pour optimiser le GPV et des charges DC.

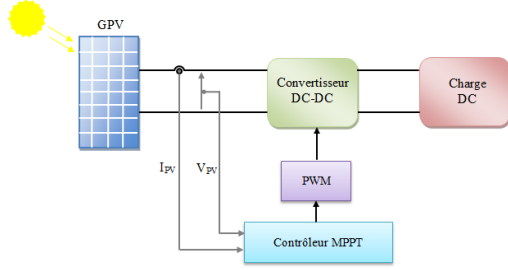


Fig. 8. Schéma fonctionnel du SPV

Fig. 9. Ce document est organisé comme suit: La modélisation du SPV sera présentée et discutée dans la section II. Alors que dans la section III, des commandes MPPT et le contrôleur PI flou sont discutés. Les résultats de la simulation dans l'environnement Matlab / Simulink du SPV sont présentés et discutés dans la section IV, afin d'évaluer la performance de ces techniques MPPT. Finalement, la conclusion est présentée dans la section V.

II. MODELISATION DU GPV [4]

A. Modèle d'une cellule photovoltaïque

Les cellules solaires sont composées d'une jonction p-n fabriquée par des matériaux semi-conducteurs dopés différemment. Ainsi, la cellule solaire peut être présentée par un circuit simple constitué d'une source de courant en parallèle avec une diode. La sortie de la source de courant est directement proportionnelle à la lumière incidente sur la cellule.

Le modèle de la cellule solaire employé dans ce travail dans ce travail de recherche est montré dans la figure 2.

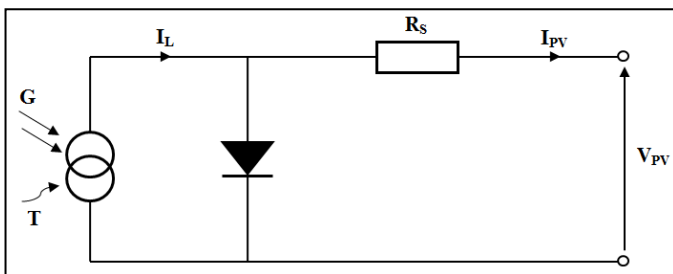


Fig. 10. Circuit équivalent d'une cellule PV

Les équations qui illustrent les caractéristiques I-V de la cellule sont:

$$I_{PV} = I_L - I_0 \left[e^{\frac{q(V_{PV} + I_{PV} R_s)}{n k T}} - 1 \right] \quad (1)$$

$$I_L(G, T) = I_{cc} \frac{G}{1000} [1 + a(T - T_{ref})] \quad (2)$$

$$I_0(T) = I_0(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \cdot e^{-\frac{q E_g}{n k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)} \quad (3)$$

$$I_0(T_{ref}) = \frac{I_{cc}}{e^{\frac{q V_{oc}}{n k T_{ref}} - 1}} \quad (4)$$

$$R_s = - \frac{dV_{PV}}{dI_{PV}} \Big|_{V_{oc}} - \frac{n k T_{ref}}{I_{cc} q e^{\frac{q V_{oc}}{n k T_{ref}}}} \quad (5)$$

Avec :

- **I_{pv}** : courant de sortie du module PV (A).
- **V_{pv}** : tension de sortie du module PV (V).
- **I_0** : courant de saturation de la diode (A).
- **R_s** : résistance série de la cellule solaire (Ω).
- **E_g** : bande énergie de gap (ev).
- **n** : facteur d'idéalité (entre 1 et 2).
- **q** : Electron charge ($1.6 \times 10^{-19} C$).
- **k** : constant de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} J/K$).
- **G** : éclairement (W/m^2).
- **T** : température de la cellule en Kelvin (K).
- **T_{ref}** : température de référence (298.15K)
- **I_L** : courant généré par l'éclairement (A).
- **I_{cc}** : courant de court-circuit (A).
- **V_{oc}** : tension en circuit ouvert (V).
- **D** : rapport cyclique.
- **V_s** : Output voltage of the boost converter (V).
- **f_c** : fréquence de coupure (Hz)

B. Caractéristiques d'un module photovoltaïque

Le module solaire BP SX 150 est choisi pour simuler le modèle équivalent d'un module photovoltaïque poly-cristallin. Il est composé de 72 cellules solaires montées en série en et délivre puissance nominale maximal de 150W. Le tableau 1 montre ses spécifications électriques tirées de sa fiche technique [5]:

Tableau IV

Spécifications électriques du panneau BP SX 150 à 25 °C, 1.5AM, 1000W/m²

Puissance maximale (Pmax)	150W
Courant de court-circuit (Icc)	4.75A
Tension en circuit ouvert (Voc)	43.5V
Tension optimal (Vmp)	34.5V
Courant optimal (Imp)	4.35A
Coefficient de température de Voc (Kv)	-(160±20)mV/°C
Coefficient de température de Icc (Ki)	(0.065±0.015)%/°C
NOCT	47±2°C

C. Simulation du module photovoltaïque

La Figure 3 et 4 présentent les allures de sortie du module PV sous variations de température et d'irradiation.

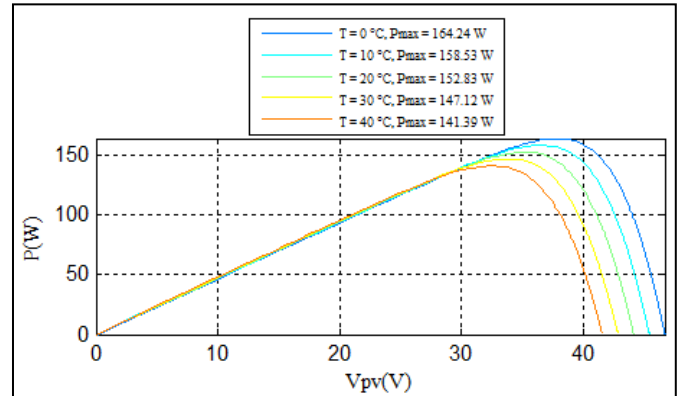


Fig. 11. Effet de la variation de la température sur la caractéristique P(VPV) du module BP SX 150S à G = 1000 W/m²

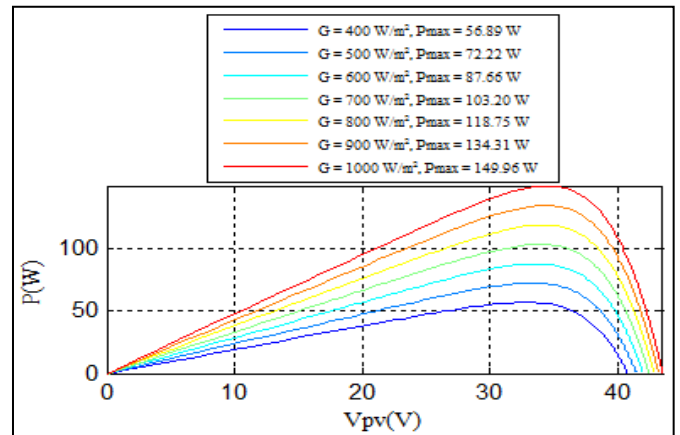


Fig. 12. Effet de la variation de l'éclairement sur la caractéristique P(VPV) du module BP SX 150S à T = 25°C

Comme le montrent les figures 3 et 4, la caractéristique P(V_{PV}) n'a qu'un seul point de puissance maximum PPM dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Pour pouvoir récolter et utiliser cette énergie, la connexion à une charge est nécessaire. Il en résulte un point de fonctionnement correspondant au point d'intersection des caractéristiques électriques du GPV et de la charge. Selon les choix des charges envisagées, le régime de fonctionnement obtenu est soit optimisé ou non.[6]

Par conséquent, une technique MPPT est nécessaire pour exploiter la puissance maximale du module et optimiser l'efficacité des cellules photovoltaïques.

III. COMMANDES MPPT

Dans la littérature, nous pouvons trouver différents types de commandes effectuant la recherche du PPM. Dans ce travail nous intéressons à trois méthodes : technique de

Perturbation et Observation (P&O), contrôleur PI classique et contrôleur PI-Flou. Pour une meilleure compréhension des performances de ces commandes, nous rappelons brièvement leurs différents principes ci-après.

A. Principe des commandes "Perturb and Observe" (P&O) [6]

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure 5, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance du GPV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

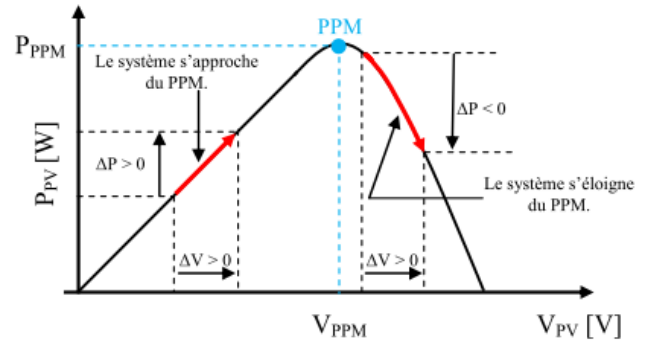


Fig. 13. Caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$ d'un GPV

B. Contrôleur PI classique

Le contrôleur PI est une solution standard pour la plupart des applications industrielles. La raison principale est sa structure relativement simple, qui peut être facilement comprise et mise en pratique. Dans ce travail, le régulateur PI est utilisé dans une boucle de courant, pour contrôler le rapport cyclique de l'interrupteur du convertisseur DC-DC et extraire la puissance maximale du GPV. La structure de la stratégie de contrôle proposée est illustrée à la figure 6.

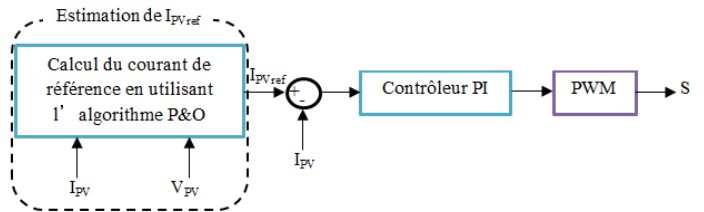


Fig. 14. schéma synoptique de la boucle de régulation avec PI classique

L'erreur entre le courant de référence I_{PVref} et le courant mesuré I_{PV} est utilisée pour faire varier le rapport cyclique du commutateur S du convertisseur DC-DC afin de réguler sa sortie via un régulateur PI. Les gains du régulateur PI sont calculés à partir de la fonction de transfert du convertisseur élévateur donnée en (6).

$$F(p) = \frac{I_{PV}(p)}{\alpha(p)} = \frac{V_L}{Lp} \tag{6}$$

Avec : I_{PV} courant d'entrée du convertisseur élévateur, V_L tension de sortie, α rapport

cyclique, L valeur de l'inductance et p est l'opérateur de Laplace.

C. Contrôleur PI Flou

Le concept de logique floue est l'une des branches importantes de l'intelligence artificielle, qui a été introduit par le Professeur Lotfi Zadeh en 1965 [7]. Les contrôleurs à logique floue ont l'avantage de travailler avec des entrées imprécises, il n'est pas nécessaire d'avoir un modèle mathématique précis, de gérer la non-linéarité et de contrôler un système compliqué [8].

Dans ce document, le contrôleur proportionnel intégral flou (PI Flou) permet de générer le rapport cyclique pour contrôler le convertisseur élévateur DC-DC, afin d'atteindre le point de puissance maximale. Les entrées du contrôleur PI Flou sont l'erreur E(n) et la variation de cette erreur ΔE(n) comme indiqué en (7) et (8) respectivement et la sortie est le rapport cyclique.

$$E(n) = I_{PV\ ref} - I_{PV} \quad (7)$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n - 1) \quad (8)$$

Le schéma synoptique du contrôleur PI Flou est illustré dans la figure 7.

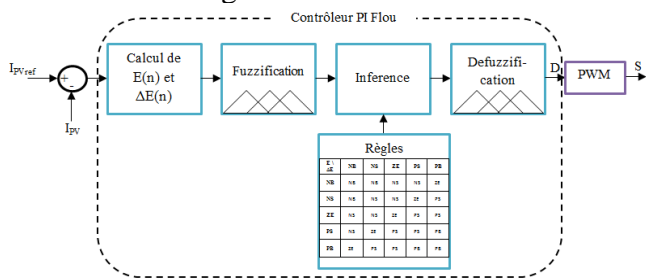


Fig. 15. Schéma synoptique de la boucle de régulation avec PI Flou

D'après la figure 5, le contrôleur PI Fou est réalisé en trois étapes, à savoir la fuzzification, l'inférence et la défuzzification.

E et ΔE sont calculés et convertis en variables linguistiques lors du fuzzification. La figure 7 montre les relations entre l'erreur mesurée et le terme linguistique, tels que grand négatif, petit négatif, zéro, petit positif et grand positif.

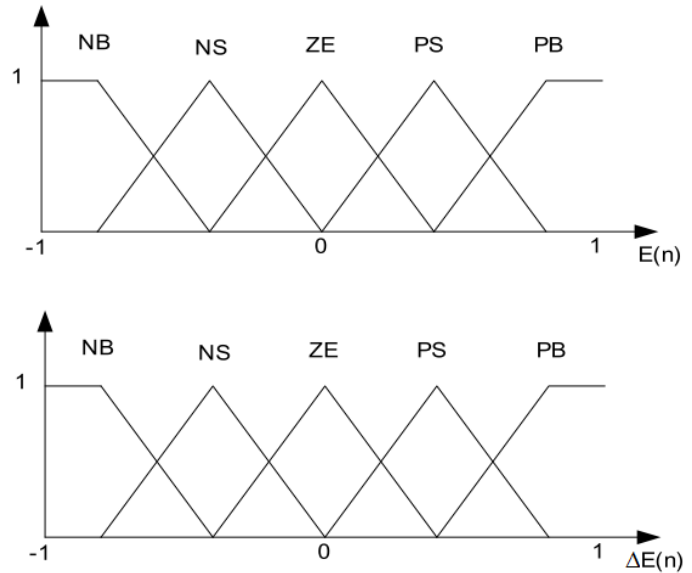


Fig. 16. Fonctions d'appartenance de l'erreur (E) et la variation d'erreur (ΔE)

Ensuite, une inférence est faite sur la base d'un ensemble de règles présentées dans le tableau II.

Tableau II
Règles de contrôle

E \ ΔE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB

Enfin, la sortie floue résultante est traduite à une sortie lisible par l'environnement extérieur en utilisant les fonctions d'appartenance lors de la defuzzification.

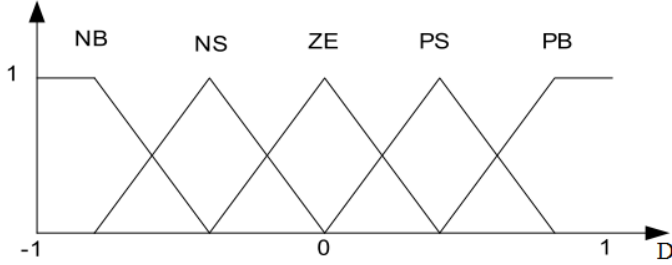


Fig. 17. Fonctions d'appartenance du rapport cyclique(D)

IV. RESULTATS DE SIMULATION

La modélisation complète du SPV est développée et implémentée dans l'environnement MATLAB / Simulink.

La figure 11 présente les résultats de la simulation du système PV utilisant l'algorithme de perturbation et d'observation, régulateur PI classique et régulateur PI-flou sous la variation de l'irradiation présentée dans la figure 10 :

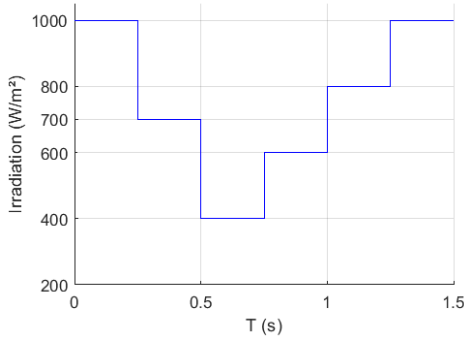


Fig. 18. variation de l'éclairement

Fig. 19.

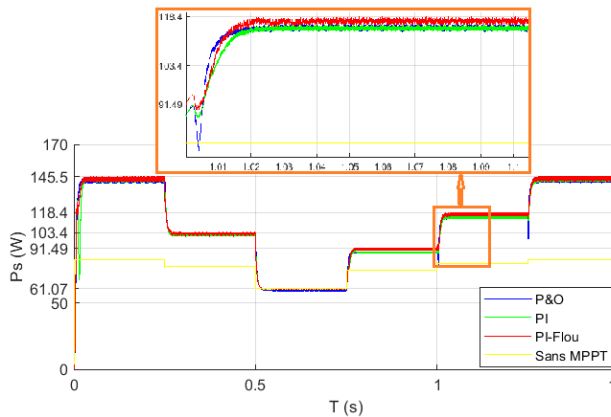


Fig. 20.

Fig. 21. Puissance de sortie du SPV en W

D'après les résultats obtenus on remarque que le contrôleur avec PI-Flou donne de bons résultats par rapport aux autres types de MPPT.

La commande par logique floue permet d'avoir une réponse plus rapide en comparaison avec le PI-classique, de réduire les fluctuations en régime transitoire et de mieux poursuivre le point de puissance maximal avec moindres pertes de puissance.

V. CONCLUSION

Dans ce travail, différentes stratégies de commande MPPT sont étudiées et développées pour les systèmes photovoltaïques afin d'améliorer leurs rendements.

Les résultats de simulation montrent que le contrôleur PI-Flou fournit de bonnes performances et montre une très bonne dynamique par rapport aux autres stratégies sous la variation de l'éclairement.

Références

- [1] J. Jiang, T. Huang, Y. Hsiao and C. Chen, "Maximum Power Tracking for Photovoltaic Power Systems", Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 8, No 2, pp. 147153 (2005).
- [2] L. Abderezak, B. Aissa, S. Hamza, "Comparative study of three MPPT algorithms For a photovoltaic system control", Information Technology and Computer Applications Congress (WCITCA), 2015 World Congress on.
- [3] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, "Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International.
- [4] F.E. Tahiri, K. Chikh, M. Khafallah and A. Saad, "Comparative study between two Maximum Power Point Tracking techniques for Photovoltaic System", 2nd International Conference on Electrical and Information Technologies ICEIT, 2016.
- [5] Datasheet, BP SX 150, 2002.
- [6] Cedric Cabal. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier Toulouse III, 2008.
- [7] Omer Abbaker Ahmed and Dr. Ahmed Awad Ahmed, "Control of Wind Turbine for Variable Speed Based on Fuzzy-PID Controller", SUST Journal of Engineering and Computer Sciences (JECS), Vol. 18, No.1, 2017.
- [8] Shakil Ahamed Khan, Md. Ismail Hossain and Mohammad Jakir Hossain, "Fuzzy Logic Based Control Scheme for Power Optimization of a Small Wind Turbine System with DC-DC Converter", IJECT Vol 2, Issue 2, June 2011.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation
Segmentation par Croissance de Région : Application à la
Maladie d'Alzheimer

K. TAIFI¹, N. TAIFI², S. SAFI³, A. MALAOU⁴, H. BITA⁵

¹Laboratoire TIAD, Faculté des Sciences et Technique, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

²Laboratoire EREIM, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

³Laboratoire LIMATI, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

⁴Laboratoire EREIM, Faculté Polydisciplinaire, Université Sultan Moulay Slimane, Béni -Mellal, Maroc

⁵Laboratoire d'Instrumentation et de Mesures, Université Ibn Zohr, Faculté des Sciences, Agadir-Maroc

¹Email : k.taifi@usms.ma

Résumé-Maladie d'Alzheimer est caractérisée par une diminution progressive des capacités cognitives et évolue souvent vers une perte complète d'autonomie, ce qui la rend difficilement tolérable. La segmentation des images médicales est une technique très importante dans le domaine de l'analyse d'images dans de nombreuses pathologies cérébrales comme la maladie d'Alzheimer. Dans cet article, nous introduisons une méthode automatique de segmentation des images cérébrales basée sur la région en croissance pour extraire le Corps Calleux (CC). Les résultats expérimentaux sont très favorables

Mots-clés Structures Cérébrales, Segmentation, IRM, Croissance de régions, Corps Calleux, Maladie d'Alzheimer, MCI, CDR

I. INTRODUCTION

La maladie d'Alzheimer est une maladie neuro dégénérative et se caractérise par une destruction progressive de cellules du cerveau [1-5]. Le symptôme précoce le plus commun est la difficulté à se souvenir des événements récents ; perte de mémoire à court terme. Il est divisé en trois phases principales : le stade cognitif léger (MCI), le stade modéré et le stade grave. Au stade léger, la personne est généralement capable de penser de façon appropriée et de prendre des décisions. Cependant, Les difficultés courantes au cours de cette étape, tels que l'oubli et les problèmes de communication, de trouver le bon mot ou nom, des difficultés à se souvenir du nom de personnes. Au stade modéré, il y a une détérioration des capacités mentales et physiques de la personne comme la perte de mémoire, on ne

peut plus se souvenir de son propre passé, l'oubli d'événements récents, l'altération de la capacité à résoudre des calculs mentaux et ne plus reconnaître sa famille et ses amis. Au stade sévère, Au cours de la phase terminale de la maladie, la personne n'est plus capable d'interagir avec son entourage, de communiquer avec quelqu'un, ni de contrôler ses gestes. Il aura besoin une aide spéciale pour les activités quotidiennes car ses réflexes deviennent anormaux. Pour la détection précoce de la MA ;

L'imagerie cérébrale ou neuro-imagerie désigne l'ensemble des techniques issues de l'imagerie médicale qui permettent d'observer le cerveau, grâce à la mesure de l'atrophie cérébrale, apparaît comme un outil d'avenir pour la détection précoce de la MA basée sur la mesure de la surface et le diamètre du corps calleux. Nous décrivons les algorithmes utilisés pour mesurer les corps calleux (Fig. 1), et expliquerons comment ces mesures sont utilisées pour constituer un indice individuel d'atrophie.

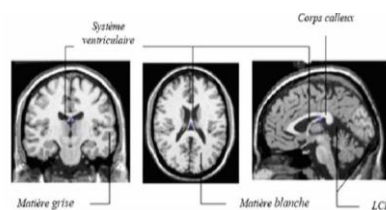


Fig.1 Coupes IRM du cerveau

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Le corps calleux (CC) est la plus grande voie d'interconnexion de la substance blanche dans le cerveau et responsable sur la plupart de la communication entre les deux cérébrales hémisphères, il est important de comprendre comment l'MA affecte le CC [6]. De nombreuses études [7-11] montrent il y'a une relation entre des atrophies de la CC et MA. La plupart de ces études comprenaient des patients atteints de la MA à différents stades de la démence, de légère à sévère. En général, les enquêteurs ont classé ces patients hétérogènes. Wang et al [11] ont détecté une atrophie dans les sous-régions postérieures. Thomann et al [10] ont rapporté des réductions dans les sous-régions antérieures du CC dans un groupe de patients avec MCI. Di Paola et al [12] ont réalisé des travaux, révélant que changements dans les parties antérieure et postérieure du CC pourrait déjà être présent au début de la MA.

Les groupes MA homogènes peuvent être subdivisés en termes de l'Évaluation de démence clinique (Clinical Dementia Rating) (CDR) [13], qui est un numérique échelle utilisée pour quantifier la gravité des symptômes de démence. Une CDR de 0 indique l'absence de démence et les CDR de 0,5, 1, 2 et 3 représentent très doux, doux, modéré, et démence sévère, respectivement.

Minwei Zhu [14] montre que les patients dans les étapes de CDR 0,5 (démence très légère) et CDR 1 (légère démence) sont plus susceptibles de progresser à la démence sévère. Dans cette étude, ils ont étudié le corps calleux changer dans ces deux étapes pour déterminer (1) quand corps calleux peut être détectée et (2) comment le CC change. H. Hampel [15] montre que la zone corps calleux totale était significativement réduite chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer.

Ils ont mesuré l'atrophie du corps calleux spécifique à la région chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer et corrélée aux changements avec le fonctionnement neuropsychologique. Teipel [16] ils ont utilisé l'IRM volumétrique et l'analyse des aires sous courbes de caractéristiques du récepteur (ROC) pour comparer directement l'étendue de la formation de l'hippocampe-amygdale (HAF) et l'atrophie du corps calleux chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer. S. Ettaieb[17] présente une nouvelle méthode basée sur le modèle de forme active (ASM) et le modèle de distance spatiale pour segmenter les structures cérébrales. Il combine deux types de connaissances a priori : les formes de la structure et les distances entre elles. Ensuite, les modèles obtenus sont utilisés pour guider simultanément l'évolution des formes initiales de la structure vers les contours cibles. A. Ben Rabeh [18] présente une méthode automatique de segmentation des images cérébrales basée sur le modèle Active Contour (AC) pour extraire l'Hippocampe et le corps calleux (CC). Son contribution consiste à combiner la méthode géométrique avec la méthode statistique de l'AC. Ils ont utilisé l'ensemble de (Level Set) et ajouté une phase d'apprentissage pour construire une forme moyenne et rendre la tâche d'initialisation automatique. Pour l'étape de l'évolution des contours, ils ont utilisé le principe de (Level set) et la connaissance a priori.

De nombreux chercheurs ont proposé les algorithmes pour MA. Dans cet article nous avons développé un système d'analyse des images IRM cérébrale qui sera capable de segmenter le corps calleux (CC).

L'organigramme de la segmentation du MA est montré en (Fig. 2). Le reste de cet article est organisé comme suit : La section 2 traite du schéma proposé, où le prétraitement et la segmentation sont discutées en détail. La section 3 décrit les résultats expérimentaux et l'analyse. La section 4 donne les conclusions.

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'Open Access de bases de données d'imagerie (OASIS)¹. L'OASIS fournit des ensembles de données IRM du cerveau à la communauté scientifique librement. Le CDR, incorporant domaines cognitifs et fonctionnels multiples, a été utilisé pour quantifier la gravité de la démence chez les participants. CDR 0 indiqué aucune démence, tandis que CDR 0,5 et 1 représentaient très doux et démence légère, respectivement. Sélection détaillée des procédures et les caractéristiques des participants décrit par Marcus et al [19].

II.2. Prétraitement : Filtre médian

Pour faciliter la tâche de la segmentation des images IRM il est nécessaire d'atténuer les bruits qui est provenant de différentes sources par un filtre médian (Fig. 3) ; est un filtre non linéaire utilisé pour éliminer le bruit tout en conservant les contours de l'image. Considérons une image F caractérisée par un niveau de gris $f(x, y)$. Soit $V(x_0, y_0)$ le voisinage associé au point de coordonnées (x_0, y_0) .

Soient $(f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_{N-1}, f_N)$ les niveaux de gris associés aux N pixels de $V(x_0, y_0)$.

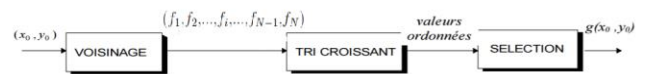


Fig.3 Le principe du filtre Médian

Le filtrage médian procède tout d'abord par un tri des valeurs de niveau de gris du voisinage suivi d'une sélection de l'élément milieu du tri. Le tri se fait par ordre croissant généralement. Après la partie de prétraitement par le filtre médian on s'intéresse par la segmentation qui constitue une

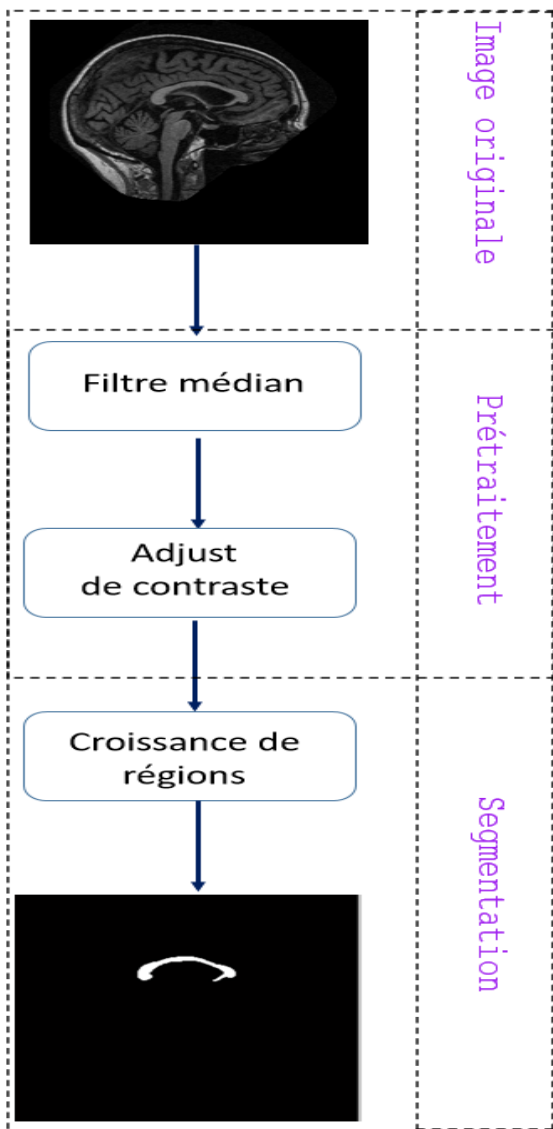


Fig.2 Système de segmentation du le corps calleux

¹ HTTP : // WWW.OASIS-BRAINS.ORG

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

étape très importante dans le traitement et l'interprétation des images par une approche basée sur la croissance de région [20-22]. Une région est un ensemble de pixels typologiquement connexes et ayant des attributs similaires : niveaux de gris, couleur, texture [23-24].

II.3. Segmentation : croissance de la région

Croissance de la région a été développée initialement par Muerle et al [25], est parmi les méthodes de segmentation ; L'algorithmes de croissance de régions est fondé sur l'agrégation progressive des pixels à partir d'un point initial appelé germe, selon un critère d'homogénéité.

Notre algorithme de croissance de régions pour la segmentation des images en niveaux de gris comporte deux étapes :

II.3.1. Sélectionner manuellement le point de départ (germe)

On fixe le point ou les points de départ dans l'image. Ces points sont appelés germes des régions requis. Le choix des points de départ est la partie important de l'algorithme. En effet, l'étape de croissance va utiliser une mesure de similarité pour choisir les pixels à regrouper. La mesure de similarité va produire de fortes variations et la croissance va s'arrêter très tôt si le germe est situé dans une zone non homogène.

II.3.2. Grossir les régions par agrégation des pixels voisins.

Cette étape a pour objectif de faire grossir une région en ajoutant des pixels voisins. Les pixels sont choisis afin de maintenir l'homogénéité de la région. La différence entre l'intensité d'un pixel et la moyenne de la région est utilisée comme mesure de similarité, c'est un prédicat qui contrôle l'évolution de la segmentation. Le pixel

ayant la plus petite différence ainsi mesurée est affecté à la région correspondante. Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les pixels soient attribués à une région [26] si l'indicateur d'homogénéité reste vrai. La croissance s'arrête lorsqu'on ne peut plus ajouter de pixels qui respect l'indicateur de l'homogénéité.

III. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous sommes intéressés à extraire la zone : corps calleux. Nous avons utilisé la section sagittale pour tous les sujets. Nous avons segmenté le corps calleux par croissant de la région. Nous montrons les résultats dans la (Fig. 4).

Dans la figure (Fig. 5) Nous avons utilisé trois sujets : normal, souffrant de la maladie d'Alzheimer au stade précoce et un autre à un stade avancé. Nous avons utilisé la section sagittale pour tous les sujets. Nous avons segmenté le corps calleux des trois sujets par croissant de la région, nous pouvons voir que la courbe évolue en maintenant des résultats plus réguliers. Il arrive à capturer la forme de la structure cible.

Nous pouvons calculer certaines caractéristiques de géométries telles que la surface et le périmètre. Nous présentons dans le tableau ci-dessous la mesure des caractéristiques du corps calleux (Tableaux I).

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

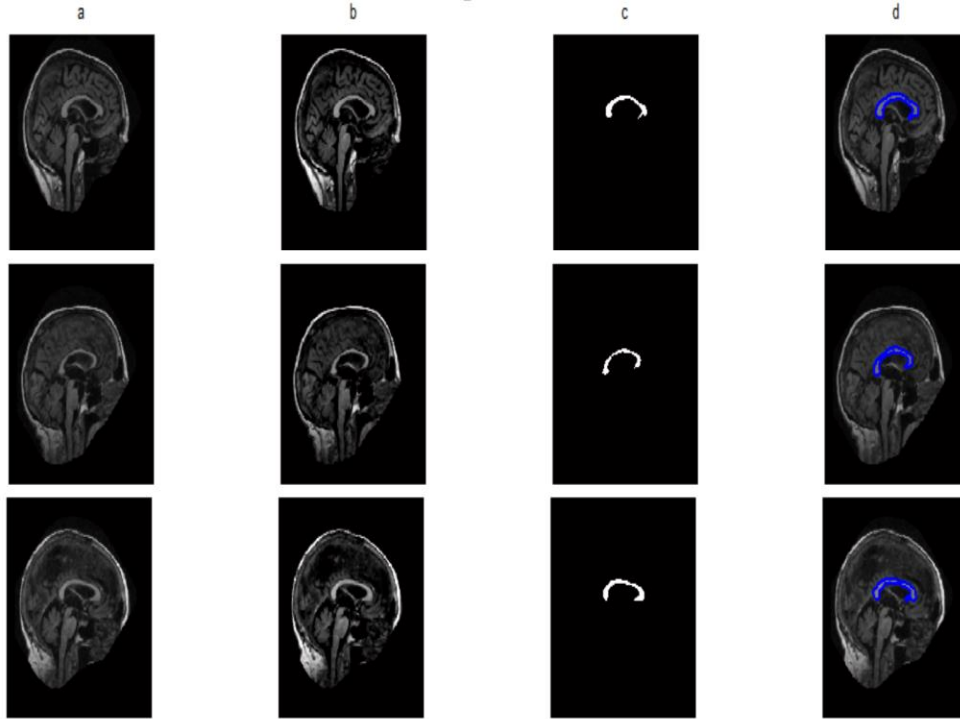


Fig.4 Image original, b) prétraitement, c) segmentation du corps calleux d) superposition de l'image c sur l'image original

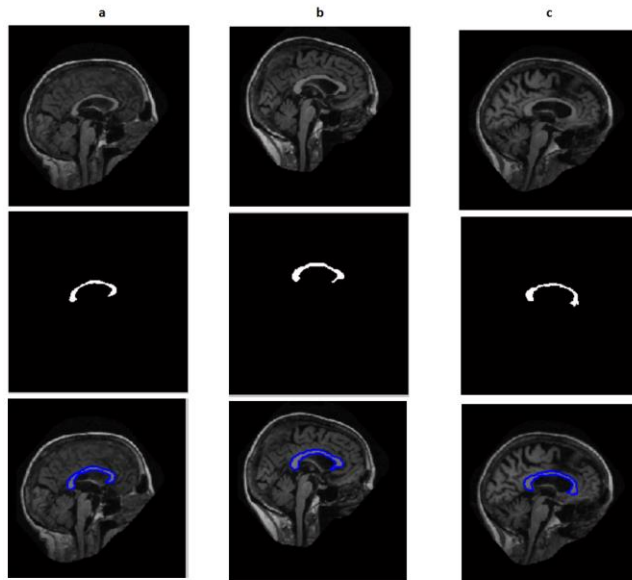


Fig.5 Image normal, b) stade primaire de Alzheimer, c) stade final de Alzheimer

Tableau V

Les mesures du corps calleux

Type d'objet	Surface	Périmètre
Normal	467	237.2376
Stade primaire	460	217.7229
Stade avancé	459	212.7523

IV. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé une méthode automatique de segmentation des images cérébrales basée sur la croissance de région pour extraire le CC. Nous trouvons que notre méthode donne un bon résultat pour diagnostiquer le maladie d'Alzheimer.

References

- [1] Brun A, Englund E: A white matter disorder in dementia of the Alzheimer type: A pathoanatomical study. *Ann Neurol* 1986.19.253–262.
- [2] Bowen BC, Barker WW, Loewenstein DA, Sheldon J, Duara R: MR signal abnormalities in memory disorder and dementia. *AJNR Am J Neuroradiol* 1990.11.283–290.
- [3] Scheltens P, Barkhof F, Valk J, Algra PR, van der Hoop RG, Nauta J, Wolters EC: White matter lesions on magnetic resonance imaging in clinically diagnosed Alzheimer's disease: Evidence for heterogeneity. *Brain* 1992.115. 735–748.
- [4] Meyers JS, Kawamura J, Terayama Y: White matter lesions in the elderly. *J Neurol Sci*.1992. 110.1–7.
- [5] Bronge L, Bogdanovic N, Wahlund LO. Postmortem MRI and histopathology of white matter changes in Alzheimer brains. A quantitative, comparative study. *Dement Geriatr Cogn Disord*. 2002. 13:205–212
- [6] Zhu M, Gao W, Wang X, Shi C, Lin Z. Progression of corpus callosum atrophy in early stage of Alzheimer's disease: MRI based study. *J.acra* 2012.19(5):512-7.
- [7] Chaim TM, Duran FL, Uchida RR, et al. Volumetric reduction of the corpus callosum in Alzheimer's disease in vivo as assessed with voxel-based morphometry. *Psychiatry Res* 2007.154.59–68.
- [8] Hampel H, Teipel SJ, Alexander GE, et al. Corpus callosum atrophy is a possible indicator of region- and cell type-specific neuronal degeneration in Alzheimer disease: a magnetic resonance imaging analysis. *Arch Neurol*. 1998. 55.193–198.
- [9] Hampel H, Teipel SJ, Alexander GE, et al. In vivo imaging of region and cell type specific neocortical neurodegeneration in Alzheimer's disease. Perspectives of MRI derived corpus callosum measurement for mapping disease progression and effects of therapy. Evidence from studies with MRI, EEG and PET. *J Neural Transm*. 2002. 109.837–855.
- [10] Thomann PA, Wustenberg T, Pantel J, et al. Structural changes of the corpus callosum in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease. *Dement Geriatr Cogn Disord*. 2006. 21.215–220.
- [11] Wang PJ, Saykin AJ, Flashman LA, et al. Regionally specific atrophy of the corpus callosum in AD, MCI and cognitive complaints. *Neurobiol Aging*. 2006.27.1613–1617.
- [12] Di Paola M, Spalletta G, Caltagirone C. In vivo structural neuroanatomy of corpus callosum in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment using different MRI techniques: a review. *J Alzheimers Dis*. 2010. 20.67–95.
- [13] Morris JC. The Clinical Dementia Rating (CDR): current version and scoring rules. *Neurology*. 1993. 43.2412–2414.
- [14] Minwei Zhu, Wenpeng Gao, Xudong Wang, Chen Shi, Zhiguo Lin. Progression of Corpus Callosum Atrophy in Early Stage of Alzheimer's Disease: MRI Based Study
- [15] Hampel H, Teipel SJ, Alexander GE, et al. Corpus callosum atrophy is a possible indicator of region- and cell type-specific neuronal degeneration in Alzheimer disease: a magnetic resonance imaging analysis. *Arch Neurol*. 1998. 55.193–198.
- [16] Teipel SJ, Bayer W, Alexander GE, Bokde AL, Zebuhr Y, Teichberg D, Müller-Spahn F, Schapiro MB, Möller HJ, Rapoport SI, Hampel H. Regional pattern of hippocampus and corpus callosum atrophy in Alzheimer's disease in relation to dementia severity: evidence for early neocortical degeneration. *Neurobiol Aging*. 2003 .24(1).85-94.
- [17] S. Ettaieb, K. Hamrouni, and S. Ruan. Statistical models of shape and spatial relation-application to hippocampus segmentation. 9th International Conference on Computer Vision Theory and Applications (Visapp), LisbonPortugal. 2014.
- [18] Ben Rabeh A, Benzarti F, Amiri H. Segmentation of Brain MRI Using Active Contour Model. *International Journal of Imaging Systems and Technology*. 2017.
- [19] Marcus DS, Wang TH, Parker J, et al. Open Access Series of Imaging Studies (OASIS): cross-sectional MRI data in young, middle aged, nondemented, and demented older adults. *J Cogn Neurosci*. 2007.19.1498–1507.
- [20] Frank Y. Shih, Shouxian Cheng. Automatic seeded region growing for color image segmentation. *Image and Vision Computing*. 2005. 23. 877–886,
- [21] Yian-Leng Chang and Xiaobo Li. Fast image region growing. *Image and Vision Computing*. 1995. 13. 559-571.

- [22] Moghaddamzadew A And Bourbakis N. A fuzzy region growing approach for segmentation of color images. 1997. 30. 867-881.
- [23] Zucker S. Region growing : childhood and adolescence. Computer Graphics and Image Processing. 1976. 5 .382–399.
- [24] Ikonomakis N, Plataniotis K.N, Zervakis M, Venetsanopoulos A.N. Region growing and region merging image segmentation, Proceedings of IEEE Conference on Digital Signal Processing 1. 1997. 299–302.
- [25] Muerle J, Allen D. Experimental Evaluation of Techniques for Automatic Segmentation of Objects in a Complex Scene, in G. Cheng et al., Eds. Pictorial Pattern Recognition, Thompson, Washington DC. 1968. 3-13.
- [26] Shih F. Y. and Shouxian Cheng. Automatic seeded region growing for color image segmentation. Image Vision Comput. 2005. 23. 877-886.

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation
New metallic PCMs for thermal energy storage in
concentrated solar power (CSP)

Yassine El karim¹, Abdessamad Faik², Yaroslav Grosu² and Rachid Lbibb¹

¹ *Laboratory of Sustainable Development, Faculty of Sciences and Technologies, Sultan Moulay Slimane University, 523 Beni Mellal, Morocco*

² *CIC Energigune, Albert Einstein 48, 01510 Miñano (Álava), Espagne*
Corresponding Author: yassineelkarim@gmail.com; Tel: (+212659087291)

Abstract- *The aim of this paper is to investigate new classes of materials, metal alloys, as phase change materials (PCMs) for thermal energy storage (TES) application. In the first stage of this work, we discuss the considerations for the use of metal and metal alloys as PCMs for high temperature thermal storage applications, as well as summarize the literature on the limited research in this area. The second stage of this work consists to synthesis, analysis and characterize a set of binary metal alloys based on Mg, Al, Cu and Si.*

Keywords: *Concentrated solar power (CSP), Thermal energy storage (TES), Phase change materials (PCM), Metal alloys, high temperature*

I. INTRODUCTION:

Renewable energies are sources of clean, inexhaustible and more competitive energy. They differ from fossil fuels in their diversity, abundance and potential for use on the planet. Their costs are also falling, and the cost of fossil fuels is in the opposite direction of their present volatility. One of the drawbacks of renewable energies is the intermittency of its production, which have directly repercussions on the competitiveness against conventional energy sources. In order to overcome this limitation and increase its global efficiency, energy storage (ES) strategies are a key issue.

CSP is one of these key technologies for a renewable energy future and the IEA's objectives are that CSP should be able to provide 11.3 % of

the global energy needs by 2050 [1]. CSP has the inherent ability to store thermal energy, which makes this a key technology to achieve a renewable energy future. There are three main types of thermal energy storage (TES) according to the storage mechanism involved: sensible heat storage, latent heat storage and thermo-chemical storage [2]. Thermal energy storage in the latent heat of phase change materials (PCMs) has the advantage that a great amount of energy can be stored across a small temperature difference. PCMs for high temperature TES systems are actually based on molten salts or eutectic salts compounds [3]. However, the principal limitation of salts are their poor thermal conductivity, followed of other common limitation such as considerable thermal hysteresis, corrosion problems and high volume change during the melting [3.4.5]. In order to diminish these problems, pure metals and metal alloys have been proposed as possible candidates for TES, using their phase change enthalpy between solid and liquid state. The main components of these alloys are magnesium, aluminum, copper and silicon.

The first objective of this paper is to assess the use of metal and metal alloys for TES, as well as summarize the literature on the limited research in this area. The second aim of this work consists to synthesis, analysis and characterize a set of binary metal alloys based on Mg, Cu, Si and Al.

II. STATE OF THE ART ON USE OF METAL AND METAL ALLOYS AS TES MATERIALS MEDIA:

Thermal energy storage in the latent heat of phase change materials has the advantage that a great amount of energy can be stored across a small temperature difference. The higher the heat of fusion of a PCM, the more energy can be stored in it per unit mass. Therefore, a high heat of fusion is preferable. Other than the heat of fusion, there are a number of important properties that must be considered in PCM selection [5]: Melting temperature (T_m) ,low or no sub-cooling, thermal stability ,Chemical stability ,Cyclic stability ,Thermal conductivity ,Specific thermal capacity ,Low cost ,Availability ,Low toxicity and Compatibility with construction materials .

To compare the classes of the various PCMs that can be found in literature, a plot of the heat of fusion against the melting point of each candidate PCM is shown in Figure 1.

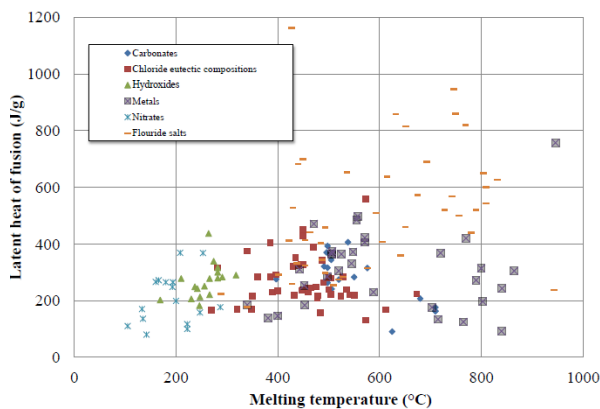


Fig. 6. Comparison of high temperature PCMs found in literature [5].

It is clear that the metallic PCMs and fluoride salts have melting temperatures that are very well suited for high efficiency power blocks.

Salts have a significant set of drawbacks that metallic PCMs generally do not exhibit:

- Salts are prone to subcooling, where metals generally have no or little subcooling.
- Salts have a large volume change over phase change.
- Salts have low thermal conductivity.

Thus, metallic phase change materials pose a set of significant advantages over that of salts.

Most likely, Birchenal and Telkes [6] were the first who have analyzed possibility to store the thermal energy by using the heat fusion of metals. Making a start from that work, Farkas and Birchenall [7] and Gasanaliev and Gama-taeva [8] report the thermal properties of some metallic alloys.

Table.I list the metal alloys with melting temperatures above 300°C proposed and studied by various researchers as high temperature PCMs. From the table, it appears that the Al-Cu, Al-Si, Al-Cu-Mg, Al-Mg-Zn and Al-Si-Mg eutectics have the best heat storage characteristics in the range to operate with fossil-fueled combustors. The Al-Si-Ni and Mg-Si eutectic has very good heat storage capacity at high temperature (over than 900°C), where it might find application in a solar power tower. Thus, eutectic compositions and pure substances are preferred as PCMs because of thermal stability and very small temperature range for phase change.

According to these conclusions, we were analyzed different binary phase diagrams of the selected materials already proposed. Cu, Si and Mg metal alloys have being selected as potential latent heat storage (LHS) materials to be investigated by our group.

Table VI. Several of current investigations about metal alloys for their use as potential HT-PCM in solar power generation technologies [6.7.8].

Compound (mass %)	Melting point (° C)	Density $kg.m^{-3}$	Enthalpy of melting ($kJ.kg^{-1}$)
Al ₁₇ Si ₅₃ Ni ₃₀	1079	4290	962
Si ₅₂ Mg ₄₈	946	1900	757
Al ₄₅ Si ₄₀ Fe ₁₅	869	3360	562
Si ₄₉ Mg ₃₀ Ca ₂₁	865	2250	305
Mg ₂ Cu	841	-	243
Cu ₈₀ Si ₂₀	803	6600	197
Cu ₅₆ Si ₂₇ Mg ₁₇	770	4150	420
Cu ₇₄ Zn ₁₉ Si ₇	765	7170	125
Zn ₄₉ Cu ₄₅ Mg ₆	703	8670	176
Al _{87.8} Si _{12.2}	580	2620	499
Al _{46.3} Cu _{49.1} Si _{4.6}	571	5560	406
Al ₈₂ Cu ₁₈	550	3170	318
Mg ₁₃ Bi ₈₇	546	3090	181
Al _{60.8} Cu _{33.2} Mg ₆	506	3050	365
Mg ₆₀ Cu ₂₅ Zn ₁₅	452	2800	254
Al ₆₀ Mg ₃₄ Zn ₆	450	2380	329
Zn _{88.7} Al _{11.3}	382	6752	118
Zn ₈₄ Al _{8.7} Mg _{7.3}	344	6546	132
Mg ₇₂ Zn ₂₈	342	2850	155

III. METHOD AND EXPERIENCE:

The experimental process were performed in CIC energigUNE (Spain) .The binary metal alloys were produced by melting together pure components in suitable proportion

(Cu (Shots, 1-10 mm, 99.99%, Alfa S.A), Si (Lump,0.1-2.5 cm,99.99%, Alfa S.A) , Al (Ingot, 99.98%, Alfa S.A) and Mg (Ingot, 99.98%, Alfa S.A).

The experiments run under a controlled argon flux. The systems were placed and closed inside of stainless steel reactor under argon atmosphere in order to avoid any possible oxidation of the alloys. Next, the reactor was introduced in a muffle electrical furnace at 750°C for 2 hours. Before cooling, the molten alloy was mixed by a slight rotational movement in order to ensure a high homogeneity of the samples.

The Microstructural characteristics was examined by scanning electron microscopy (SEM) ,Quanta FEG 250, operated in high vacuum mode at 30 kV and with a back scattered electron detector (BSED).

The DSC measurements were performed using STA 449 F3 Jupiter with a heating rate of 10 °C/min under a constant stream of argon with a flow rate of 50 ml/min.

The density of the materials investigated was determined by helium pycnometer AccuPyc II 1340 from metrics coupled to a digital scale (Mettler Toledo).

IV.

V. RESULTS AND DISCUSSION:

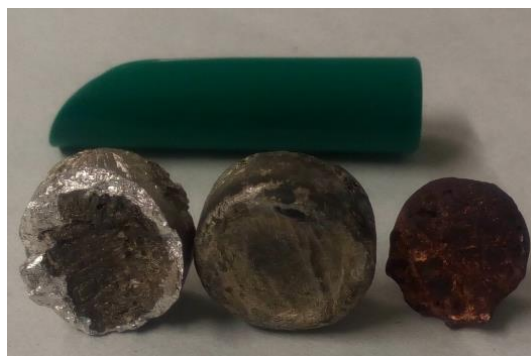


Fig. 7. Metal alloys with different compositions

To conduct the characterization of the alloys, the samples (Fig.2) were mechanized by different techniques as shown in fig.3 . In this way, the turning and grinding mechanizing processes were carried out in CIC energiGUNE by a diamond saw and a disc grinder respectively.



Fig. 8. Samples mechanized by different techniques

Fig.4 provides a strong experimental confirmation of the existence of only two phases after the solidification processes. In general, the observed structures by SEM confirm the eutectic nature of the investigated alloys

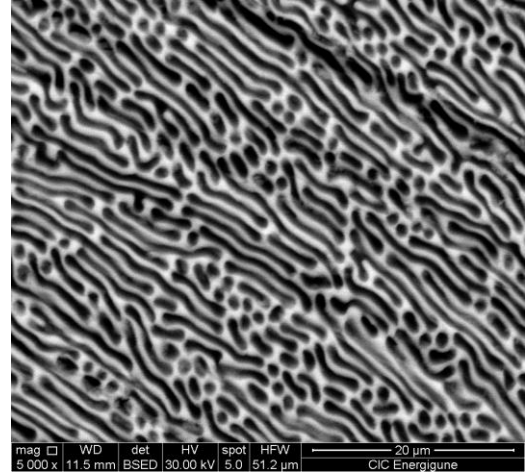


Fig. 9. SEM images (BSED) of Mg-Cu eutectic at 5000-x magnification

In Fig.5 only one endothermic peak is observed in the solid– liquid transition, this peak corresponds to the melting of the eutectic mixture in agreement with the phase diagram.

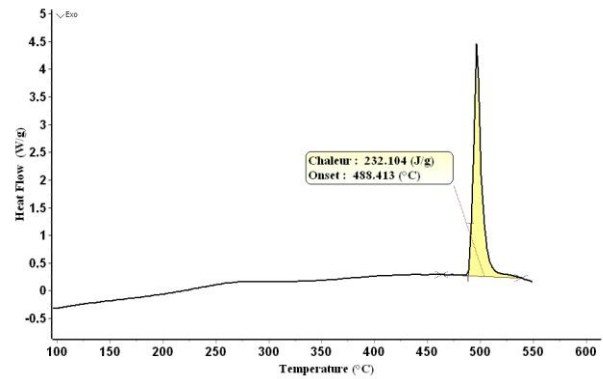


Fig.10.Melting and solidification temperatures and enthalpies obtained from DSC results at 10 °C/min heating/cooling rates.

Table.II shows current investigations, where, metals are proposed as HT-PCMs for solar power applications, as those of most important binary metal alloys and inorganic salts from literature

Table VII. Comparison of thermophysical properties of eutectic alloys investigated in this work with some other metal alloys and molten salts.

Compound		Melting point (° C)	Density $kg.m^{-3}$	Heat capacity $(J.kg^{-1}.K^{-1})$	Enthalpy of melting $(kJ.kg^{-1})$	Thermal conductivity $(W.m^{-1}.K)$	Volumetric heat storage $10^3(kJ.m^{-3})$	reference
Binary Alloys (Cu, Si ,Al and Mg)	From	488	2459	788	232	104	561	PW
	To	702	6500	665	144	96	1050	
Mg ₇₂ Zn ₂₂		342	2850	711	155	67	441	[9]
Mg ₁₃ Bi ₈₇		546	3090	530	181	53	559	[10]
PbCl ₂		501	5600	NA	78	0.69	436	[11]
NaCl/MgCl ₂		450	2240	960	429	0.93	960	[6]
NaCl/CaCl ₂ /MgCl ₂		424	2500	1190	190	0.83	475	[12]
MgCl ₂ -SrCl ₂		500	2100	670	281	1.08	590	[13]

PW stands for present work

NA not available

By the comparison of metal alloys properties and salts properties listed in Table.II, it can be seen that the main advantages of these metal alloys compared with inorganic salts are their high thermal conductivities, which are two and even three orders of magnitude higher. On the other hand, heats of fusion of investigated alloys are lower than those values in some salts.

VI. CONCLUSION:

The obtained results show the potentiality of these metal eutectic alloys, based on Cu, AL, Mg and Si, as storage media in the development of a new concept of thermal energy storage systems. It has been shown that the high thermal

conductivity of metal alloys represent one of the main advantages of their use as PCMs due to its possibility to reduce the heat exchanger area, which has a direct influence on the final cost of the heat exchanger.

Acknowledgements

The author would like to thank TES groups in CIC Energigune for their help and support.

References

- [1] International Energy Agency 2010.Technology Roadmap [Report] / IEA. - Paris : IEA
- [2] L.F. Cabeza, E. Galindo, C. Prieto, C. Barreneche, A. Inés Fernández, Key performance indicators in thermal energy storage: survey and assessment, Renew. Energy 83 (2015) 820–827..

- [3] M. Liu, W. Saman, F. Bruno, Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 2118–2132.
- [4] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolado, B. Zalba, L.F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1 –Concepts, materials and modellization, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 141 (2010)31–55.
- [5] M.M. Kenisarin, High-temperature phase change materials for thermal energy storage, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 955–970.
- [6] [4] C.E. Birchenall, A.F. Riechman “Heat Storage in Eutectic Alloys” *Metallurgical Transactions A-physical Metallurgy and Materials Science*, 11(8) (1980) 1415-1420.
- [7] D.Farkas and C.E. Birchenall, “New Eutectic Alloys and Their Heats of Transformation”. *Metallurgical transformation A*, 16A (1985) 323–328.
- [8] A. M. Gasanaliyev and B Yu Gamataeva, “Heat-accumulating properties of Melts”. *Russian Chemical Reviews*. 69 (2000) 179 – 186.
- [9] P. Blanco-Rodríguez, J. Rodríguez-Aseguinolaza, E. Risueño, A. Faik, M. Tello, S. Doppiu Corrigendum to “Thermophysical characterization of Mg-51%Zn eutectic metal alloy: A phase change material for thermal energy storage in direct steam generation applications”, *Energy* 75 (2014) 630.
- [10] D. Fang, Z. Sun, Y. Li, X. Cheng "Preparation, microstructure and thermal properties of Mg—Bi alloys as phase change materials for thermal energy storage", *Applied Thermal Engineering* 92 (2016) 187–193
- [11] X. Wei, M.Song, W. Wang, J. Ding and J. Yang, “Design and thermal properties of a novel ternary chloride eutectics for high-temperature solar energy storage”. *Applied Energy*, 156 (2015) 306–310.
- [12] Trunin AS. Designing and investigations of salt systems for solar energy utilization. Utilization of sun and other radiation sources in materials research. Kiev: Naukova Dumka; 1983. p. 228–38.
- [13] Maru HC, Dullea JF, Kardas A, Paul L, Marianowski LG, Ong E, et al. Molten salts energy storage systems. Chicago, IL: Final Report of the Institute of Gas Technology; 1978

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation
Etude vibrationnelle du monocristal
(C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O

Soufiane Zerraf¹⁾, Aziz Kheireddine²⁾, Malika Tridane^{1,3)} and Said Belaaouad¹⁾

¹⁾ *Laboratoire de Chimie Physique des Matériaux, Faculté des Sciences Ben M'sik. Université Hassan II de Casablanca.*

²⁾ *Qatar Environment and Energy Research Institute/Qatar Foundation P.O. Box: 34110 Doha - Qatar*

³⁾ *Centre Régional des métiers d'éducation et de formation Casablanca Anfa, Bd Bir Anzarane Casablanca. Maroc.*

Résumé- Un monocristal a été choisi parmi le produit de réaction d'un mélange stœchiométrique d'acide phosphorique (H₃PO₄) auquel a été ajoutée la L-arginine (C₆H₁₄N₄O₂) et sa structure cristalline a été déterminée à partir de données de diffraction des rayons X tridimensionnelles. La structure est monoclinique, groupe spatial P2₁, a = 7,3450 (14) Å, b = 7,9176 (15) Å, c = 10,8796 (22) Å, β = 97,98 (2) °,

V = 626,57 (186) Å³ et Z = 2, l'affinement des moindres carrés a été convergé en R₁ = 0,0456, wR₂ = 0,1433 pour 3278 réflexions uniques. La structure est constituée de chaînes formées par le partage des bords des tétraèdres PO₄, de l'eau et de l'arginine. L'empilement suivant l'axe b est constitué de ces chaînes pontées par des couches formées par de l'eau PO₄ et de l'arginine par des liaisons hydrogène. Les spectres Raman et infrarouge du LAP monocristallin ont été enregistrés pour déterminer les symétries des vibrations des différents groupes moléculaires tels que NH₃⁺, NH₂, CH₂, CH, COO⁻, H₂O et H₂PO₄ présents dans le cristal.

I. INTRODUCTION

Un grand nombre de phosphates inorganiques sont actuellement connus et une étude systématique de leurs principales données cristallographiques a été rapportée. Récemment, la recherche de cristaux polaires organiques-inorganiques est très intéressante pour les quadratiques non-linéaires; les études d'espèces chargées (cations et anions) sont devenues un domaine de recherche actif en chimie organique et en biologie [1], les phénomènes optiques. Leur rôle en tant qu'agents structuraux est important dans les processus d'association moléculaire et

dans la médiation des structures tertiaires des protéines et des acides nucléiques [2]. Le présent travail poursuit une série d'études sur les facteurs influençant les dimensions de l'interaction cation anion phosphate-cation organique. Nous rapportons ici la préparation chimique, les données cristallographiques, l'étude vibrationnelle et spectroscopique par IR et Raman d'un phosphate organique (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O.

Les matériaux avec des non-linéarités optiques ont été largement étudiés pour leurs applications possibles dans la communication optique, le calcul optique, le traitement optique de l'information, le stockage de données optiques. Le phosphate de L-Arginine monohydraté (LAP) est l'un des meilleurs cristaux optiques non linéaires [3].

II. ETUDE VIBRATIONNELLE DU MONOCRISTAL (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O

Le monocristal (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O cristallise dans le système monoclinique, de groupe d'espace P2₁ (C₂), avec 2 motifs par maille. Cette structure est constituée un groupement [H₂PO₄]- et une molécule d'eau et un cation organique (C₆H₁₅N₄O₂)⁺

Modes internes de vibrations de l'ion [H₂PO₄]:

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

La fixation de deux atomes d'hydrogène sur deux atomes d'oxygène du groupement $[\text{PO}_4]^{3-}$ réduit la symétrie idéale T_d à C_{2v} , devenant la symétrie idéale du groupement $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$. En revanche, le groupement $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$ observé dans $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, possède la symétrie locale C_1 .

En se basant sur le fait que la structure du composé étudié est constituée de groupements isolés $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$, nous avons jugé nécessaire d'effectuer le dénombrement par la méthode du groupe de site [1] du groupement $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$. L'application de la méthode du groupe de site nécessite la connaissance de la symétrie du groupe moléculaire C_{2v} de $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$. Ce dernier présente 15 vibrations internes actives en IR et en Raman sauf le mode A_2 qui est actif seulement en IR.

$$\Gamma[\text{H}_2\text{PO}_4]^- : 6A_1(\text{IR}, \text{Ra}) + 4B_1(\text{IR}, \text{Ra}) + 2A_2(\text{Ra}) + 3B_2(\text{IR}, \text{Ra})$$

Modes normaux de vibrations de l'ion $[\text{PO}_4]^{3-}$:

La représentation des modes internes du groupement l'ion $[\text{PO}_4]^{3-}$ de symétrie T_d à l'état libre

$$\Gamma[\text{PO}_4]^{3-} : A_1(\text{Ra}) + E(\text{Ra}) + 2F_2(\text{Ra}, \text{IR})$$

Les différents modes de vibration de l'anion $[\text{PO}_4]^{3-}$ sont apparaissent dans l'ordre suivant: $\nu_3 > \nu_1 > \nu_4 > \nu_2$ [2].

La corrélation entre le groupe moléculaire T_d de $[\text{PO}_4]^{3-}$ et le groupe moléculaire C_{2v} de $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$

L'apparition de certains modes sous une seule bande et la levée totale de la dégénérescence pour d'autres peut s'explique par l'analyse du groupe C_{2v} . En effet, la corrélation entre le groupe moléculaire T_d de $[\text{PO}_4]^{3-}$ et le groupe moléculaire C_{2v} de $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$ montre les effets suivants :

- Les vibrations ν_1 (A_1) et ν_2 (E) actives en Raman dans T_d par contre dans leurs modes de

corrélation A_1 , A_2 , B_1 et B_2 dans C_{2v} est actives en IR et en Raman.

- Les vibrations ν_3 (F_2) et ν_4 (F_2) actives en IR et en Raman dans T_d restent actives en IR et Raman dans C_{2v} .

Vibrations internes de $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$ dans le monocristal $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

La répartition des vibrations de $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$ dans le groupe facteur C_2 est obtenue en effectuant d'une part, des corrélations entre le groupe moléculaire C_{2v} de $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$ et le groupe de site C_1 qu'il occupe et d'autre part des corrélations entre le groupe de site C_1 et le group facteur C_2 de la maille.

Vibrations de réseau

Les vibrations du réseau apparaissent généralement dans la région 0-300 cm^{-1} . Environ 12 lignes ont été observées dans cette région, ce qui est beaucoup moins que prévu par la théorie des groupes. Ces modes sont dus aux vibrations rotationnelles et translationnelles des molécules et aux vibrations de la liaison hydrogène basse fréquence. Les bandes dues aux vibrations des liaisons hydrogène à basse fréquence se révèlent généralement faibles, larges et asymétriques dans le spectre Raman. D'où les modes dans la région 160-265 cm^{-1} pourraient être associés à des vibrations de liaison hydrogène. Puisque les vibrations de type rotatoire du réseau sont généralement plus fortes que celles du type translationnelle, les lignes les plus fortes peuvent être attribuées à de telles rotations. Les lignes en réseau LAP se sont révélées très intenses par rapport à celles de la région à haute fréquence. Ils montrent également une fréquence prononcée et les variations d'intensité avec l'orientation du cristal.

Vibrations internes de la molécule d'arginine

La molécule d'arginine n'a pas de symétrie et occupe une position générale dans le réseau cristallin. Par conséquent, tous les modes internes des vibrations seront à la fois infrarouges et actifs Raman. Cependant, la cellule unitaire contient un grand nombre du même type de groupes moléculaires et par conséquent les énergies des phonons seront étroitement espacées et tous les modes prédits ne pourront pas être observés. La structure moléculaire discutée précédemment montre que la molécule d'arginine a les groupes moléculaires NH_3^+ , NH_2 , NH , CH_2 , CH et COO^- . Les raies Raman et les bandes infrarouges caractéristiques de ces groupes se retrouvent dans les spectres.

Vibrations internes du groupe phosphate

Les modes internes d'une espèce tétraédrique telle que PO_4 sont appelés ν_i ($i = 1-4$) selon Henberg[3]. Les fréquences des modes ν_1 , ν_2 , ν_3 et ν_4 de l'ion PO_4 à l'état libre sont respectivement de 980, 363, 1082 et 550 cm^{-1} . Parmi ceux-ci, ν_2 est doublement dégénéré et ν_3 et ν_4 sont trois fois dégénérés. Puisque dans la structure LAP, PO_4 occupe une position générale, les dégénérescences de ces modes sont susceptibles d'être levées, rendant les spectres plus complexes.

Néanmoins, une comparaison des spectres actuels avec ceux de l'arginine et d'autres composés contenant des groupes phosphate nous a permis d'identifier ces modes raisonnablement bien. Les bandes apparaissant aux environs de 1040, 400, 1100 et 530 cm^{-1} ont été assignées à ν_1 , ν_2 , ν_3 et ν_4 , respectivement. En outre, dans le groupe PO, deux des quatre liaisons P-O ont des longueurs courtes d'environ 1,50 Å, tandis que les deux autres vont de 1,56 à 1,61 Å.

Les liaisons les plus longues sont associées à des unités P-O-H [4]. Par conséquent, nous devrions pouvoir observer des bandes Raman correspondant à l'extension P-O-H qui apparaît généralement autour de 880 cm^{-1} [5-7]. La bande forte apparaissant autour de 880 cm^{-1} qui apparaît

dans tous les réglages peut donc être associée à une vibration d'étirement P-O-H

Vibrations internes de la molécule d'eau

Une molécule d'eau libre a une symétrie C_{2v} , un groupe ponctuel et trois modes normaux correspondant à $2A_1 + B_2$, espèces de représentations irréductibles du groupe C_{2v} . Les fréquences de ces modes sont $\nu_2 = 3652$, $\nu_1 = 1595$ et $\nu_3 = 3756 \text{ cm}^{-1}$ [3]. La symétrie du site de la molécule d'eau dans le LAP est C_1 et, de plus, les molécules d'eau sont impliquées dans la liaison hydrogène. Par conséquent, les fréquences ν_1 et ν_3 de LAP sont inférieures de près de 300 cm^{-1} aux fréquences correspondantes de la molécule libre.

La vibration ν_2 devrait apparaître dans la région 1400 -1600 cm^{-1} , mais n'a pas pu être attribuée sans ambiguïté en raison du grand nombre de pics dus aux vibrations d'autres groupes moléculaires apparaissant dans cette région.

La liaison hydrogène réduit la constante de la force O-H effective dans la molécule d'eau et réduit donc la fréquence d'étirement. Les modes de torsion de la molécule d'eau apparaissent généralement dans la région 300-400 cm^{-1} , alors que les modes de traduction apparaissent dans la région 500-600 cm^{-1} et ont été assignés en conséquence.

Les affectations ci-dessus sont provisoires et devraient être vérifiées en étudiant les spectres après détraction et substitution isotopique.

III SPECTRE D'ABSORPTION INFRAROUGE DU COMPOSE $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Le spectre d'absorption infrarouge du monocristal $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ est reporté sur Figure 1, Les fréquences observées sont interprète de la manière suivante:

Vibrations des molécules d'eau

Les deux bandes larges situées entre 3474 et 3098 cm^{-1} sont dues aux vibrations de valence synectiques et antisymétriques des molécules d'eau de type A_1 et B_2 , et la bande située à 1556 cm^{-1} est attribuée à la vibration de déformation de H_2O de type A_1 . La bande observée à 592 cm^{-1} est due au mode rocking de la molécule d'eau.

Vibrations du groupement $[\text{H}_2\text{PO}_4]^-$

Les deux bandes d'intensités faibles localisées à 1226 et 1010 cm^{-1} sont assignées aux vibrations de P=O stretching.

La bande située à 534 cm^{-1} est attribuée à la vibration de déformation dans le plan de P-OH, alors que la bande observée à 480 cm^{-1} est due à la vibration de déformation hors le plan de P-OH [8].

Vibrations internes de la molécule d'arginine.

La molécule d'arginine n'a pas de symétrie donc tous les modes de vibrations seront actifs à la fois en infrarouge et actifs en Raman. La structure moléculaire discutée précédemment montre que la molécule d'arginine a les groupes moléculaires NH_3^+ , NH_2 , NH , CH_2 , CH et COO^- [9].

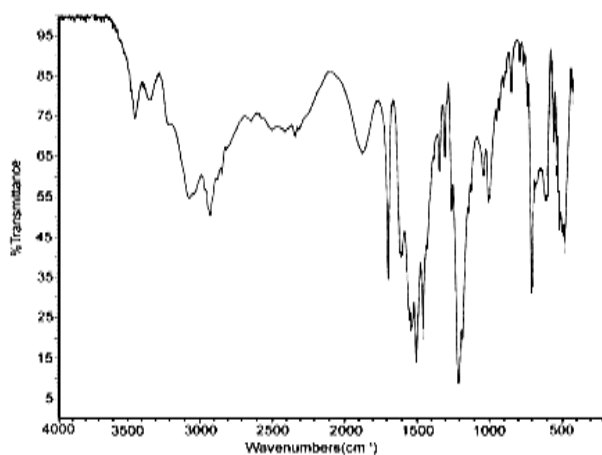


Figure 1: Spectres IR du monocrystal $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$

IV SPECTRE DE DIFFUSION RAMAN DU COMPOSE $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$.

Le spectre Raman de monocrystal $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$, dans la gamme de 4000-200 cm^{-1} est représenté sur la figure 2. Cette figure montre la position et l'intensité relative des bandes dans le spectre Raman. Il est évident qu'il existe de grandes parties entre 2000-2700 cm^{-1} du spectre où aucune intensité n'est observée.

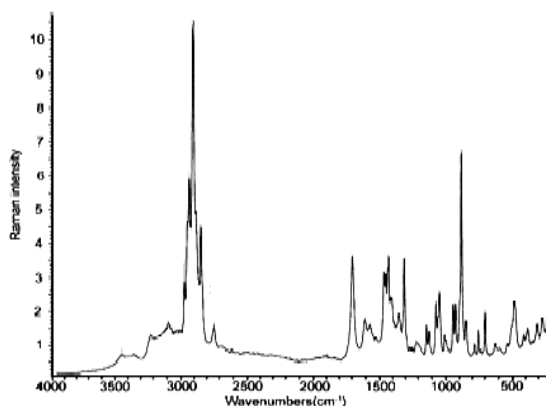


Figure 2: Spectres Raman du monocrystal $(\text{C}_6\text{H}_{15}\text{N}_4\text{O}_2)\text{H}_2\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$

Le spectre Raman est remarquable pour un groupe très intense à 890 cm^{-1} qui est affecté à C-C stretching. Ce groupe est donné la même mission, dont l'implication est que tous les unités de phosphate d'hydrogène ne sont pas équivalentes. Une bande Raman de faible intensité se trouve à 1054 cm^{-1} et est affectée à la vibration CH_2 Rocking and P=O symmetric stretching. D'autres bandes Raman sont observées à 1231 cm^{-1} P=O stretching, 1324 cm^{-1} C-O asymmetric stretching, 1479-1624 cm^{-1} NH_3^+ symmetric deformation and NH_2 in-plane - deformation, 1721-1961 cm^{-1} C=O stretching et

2773-2962 cm⁻¹ CH₂ asymmetric stretching and C-H stretching [10-11].

Les fréquences de modes d'eau sont $\nu_2 = 3652$, $\nu_1 = 1595$ et $\nu_3 = 3756$ cm⁻¹ [3]. La symétrie du site de la molécule d'eau dans le (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O est C₁ et, de plus, les molécules d'eau sont impliquées dans la liaison hydrogène. Par conséquent, les fréquences ν_1 et ν_3 de (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O sont inférieures de près de 200 cm⁻¹ aux fréquences correspondantes de la molécule libre.

Les résultats de l'analyse des composantes de bandes des spectres Raman et infrarouge sont indiqués dans le tableau 1.

Tableau 1: Vibrations des fréquences IR et Raman de (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O.

IR	RAMAN	Assignments
3474	3468	N-H asymmetric stretching and vas O-H
3368	3384	
3242	3254	
3098	3120	ν_8 H-O-H
2924	2962 2933	C-H stretching
2870	2874	CH ₂ asymmetric stretching
2668	2773	
2430	-	
1882	1961	C=O stretching
1714	1721	
1620	1624	N-H bending
1556	-	NH ₃ ⁺ symmetric deformation / NH ₂ in-plane deformation
1520	1479	
1470	1443	CH ₂ in-plane deformation
1352	1324	C-O asymmetric stretching
1226	1231	P=O stretching
1194	-	C-O stretching
1010	1054	CH ₂ Rocking and P=O symmetric stretching
926	890	C-C stretching
840	-	COO ⁻ Scissoring
704	708	NH ₂ out of plane deformation

592	-	O-H out of plane deformation
534	-	δ_{as} O-P-O
480	486	P-OH deformation
464	-	COO ⁻ Rocking
	340	External modes of N-H...O and O-H...O
	282	
	264	

CONCLUSION

Le monohydrate de phosphate de L-arginine monocristallin (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O a été préparé par une méthode directe. Le (C₆H₁₄N₄O₂) a été soigneusement ajouté goutte à goutte à la solution d'acide phosphorique pour atteindre le rapport stoechiométrique 1/1. Sa structure a été réexaminée et résolue par des méthodes directes à partir des données recueillies en utilisant la diffraction des rayons X sur monocristal. Les spectres de diffusion infrarouge et Raman nous ont permis de déterminer les symétries de différents modes de vibration moléculaire dans le monohydrate de phosphate de L-Arginine monocristallin. L'attribution de bandes Raman et infrarouge à diverses vibrations moléculaires dans le cristal de monohydrate de phosphate de L-arginine a été faite en tenant compte de la structure moléculaire et des données cristallines. Au vu de ce qui précède, les vibrations du cristal (C₆H₁₅N₄O₂)H₂PO₄.H₂O peuvent être considérées comme étant composées des vibrations suivantes: vibrations de la molécule d'eau; les vibrations internes de la molécule de L-arginine; vibrations internes du groupe phosphate avec symétrie C_{2v}.

REFERENCES

- [1] R. Alexander, Z.F. Kanyo, L.E. Chirlian, D.W. Christianson, J. Am. Chem. Soc. 112 (1990) 933.
- [2] P. Chakrabarti, J. Mol. Biol. 234 (1993) 463.3.
- [3] G.C. Bhar, A.V. Rudra, P.K. Datta, U.N. Roy, V.K. Wadhawan, T. Sasaki, Pramana: J. Phys. 44 (1995) 45.
- [4] G. M. Sheldrick, SHELX-97, University of Gottingen, Federal Republic of Germany, 1997.
- [5] G. M. Sheldrick, Acta Cryst., A64, (2008) 112.
- [6] L. J. Farrugia, J. Appl. Cryst. 30, (1997) 565.

Volume II N° 6

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

[7] K. Aoki, K. Nagano and Y. Iitaka, Acta Cryst. B27, (1971), 11-23.

[8] W. G. Fatel, F. R. Doolittle, N. T. Mc. Devitt et H. Bently. Infrared and Raman Selection Rules for Molecular and Lattice vibrations, Wiley-Interscience; New York (1972).

[9] B.J. Berenblut, P. Dawson and G. R. Wilkinson. Spectrochim Acta, 27A, 1849, (1971).

[10] G. Dhanaraj, M. R. Srinivasan and H. L. Bhat, Journal of Raman Spectroscopy, 22, (1991), 177-181.

[11] G. Herzberg, Infrared and Raman Spectra of Polyatomic Molecules. Van Nostrand, New York (1945).

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation
Amélioration des performances de la commande
vectorielle du moteur synchrone à aimants permanents
alimenté par un onduleur de tension à MLI

H. SAHMOUDA¹, K. CHIKH^{1,2}, A. MALAOU¹

¹ Équipe de Recherche en Électronique, Instrumentation et Mesures (E.R.E.I.M) de l'Université Sultan Moulay Slimane - Béni Mellal

² Laboratoire d'Ingénierie et Technologies Appliquées (LITA), Ecole Supérieure de Technologie, Université Sultan Moulay Slimane - Béni Mellal
Sahmouda.h@gmail.com

Résumé- L'objectif du présent travail, est d'améliorer les performances de la commande vectorielle à flux orienté, pour le contrôle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents alimenté par un onduleur de tension. En présentant en premier lieu, une étude comparative entre les correcteurs PI et IP classiques utilisés pour la régulation du couple et de la vitesse, dont la synthèse de ces derniers repose sur le modèle de la MSAP dans le repère (d, q) de Park. Ensuite, nous étudions l'influence de la technique de contrôle de l'onduleur sur le taux de fluctuation du couple et de la vitesse en régime permanent, en évaluant le THD% des courants statoriques, dont nous abordons les deux techniques couramment utilisées dans l'industrie, à savoir, la MLI sinus-triangle (SPWM) et la MLI vectorielle (SVPWM ou SVM). Les résultats de simulation sous l'environnement Matlab/Simulink, montrent une amélioration remarquable des performances avec le correcteur IP. Ainsi qu'une réduction des ondulations du couple et de la vitesse avec la MLI vectorielle.

Mots-clés MSAP, MLI sinusoidale, MLI vectorielle, commande vectorielle, onduleur de tension, PI, IP, THD.

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, les variateurs de vitesse à base des moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP) deviennent de plus en plus recommandés dans le monde industriel (servomoteur, transport ferroviaire, voiture électrique, systèmes embarqués...etc.). Ceci, grâce à l'amélioration de la qualité des aimants permanents et aux caractéristiques des MSAP : hautes performances, faible inertie, un grand facteur de puissance, etc. [1], ainsi qu'au développement de l'électronique de puissance et à l'évolution des techniques de commande.

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de vitesse ayant de hautes performances dynamiques, une bonne précision en régime permanent, une haute capacité de surcharge et une robustesse aux différentes perturbations. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre au variateur synchrone d'atteindre ces performances. Le contrôle vectoriel à flux orienté, appelé aussi en anglais Field Oriented Control (FOC), permet un découplage entre les variables de la commande, et donne de hautes performances dynamiques pour une large gamme d'application [2].

L'objectif de ce travail est d'améliorer les performances de la commande FOC, en utilisant les correcteurs IP au lieu des correcteurs PI pour le contrôle du couple et de la vitesse. D'autre part, en assurant le contrôle de l'onduleur par la technique de la MLI vectoriel symétrique à commutation de deux bras à la place de la MLI sinus-triangle classique.

Dans cet article nous traiterons les points suivants :

- La modélisation dynamique du MSAP alimenté en tension ;
- La commande vectorielle à flux orienté ;
- La synthèse des boucles de régulation du couple et de la vitesse en utilisant les deux correcteurs PI et IP ;

- Les techniques de contrôle de l'onduleur de tension, usuelles (SPWM et SVPWM).

Les performances des contrôleurs et des techniques de commande de l'onduleur étudiées, seront évaluées pour comparaison, par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.

Notation :

- V_a, V_b, V_c : les tensions statoriques dans le référentiel triphasé ;
- i_a, i_b, i_c : les courants statoriques dans le référentiel triphasé ;
- I_s : L'amplitude des courants statoriques.
- V_d, V_q : les tensions statoriques dans le repère de Park ;
- I_d, I_q : les courants statoriques dans le repère de Park ;
- Ψ_d, Ψ_q : les flux statoriques dans le repère de Park ;
- Ψ_m : le flux maximal des aimants permanent ;
- p : le nombre de paires de pôles ;
- ω_m : la vitesse angulaire de rotation en rad/s ;
- θ_m : la position mécanique du rotor en radian ;
- ω_s : la Vitesse angulaire électrique en rad/s ;
- θ_s : la position électrique du rotor en radian ;
- δ : l'angle interne du couple ;
- C_e : le couple électromagnétique en N.m ;
- L_d, L_q : l'inductance direct et en quadrature ;
- C_r : le couple de charge ;
- f : le coefficient des frottement visqueux ;
- J : le moment d'inertie ;
- s : opérateur de Laplace.

II. LA COMMANDE VECTORIELLE DU MSAP

La loi de commande la plus utilisée correspond au maintien de l'angle du couple égale à 90° , vue les performances remarquables qu'il présente en termes de stabilité statique et dynamique du MSAP [2]. Cependant, cette stratégie est souvent associée aux correcteurs de contrôle du couple et de la vitesse, chose qui nécessite la connaissance préalable du modèle dynamique du système à contrôler.

A. Modélisation du MSAP

Sous un ensemble d'hypothèses simplificatrices [3], le modèle dynamique du MSAP est décrit dans le repère (d q) en appliquant la

transformation de Clark-Park sur les variables de la machine faisant intervenir l'angle θ_s du rotor, par les systèmes d'équations suivants :

-Equations des flux statoriques :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d \cdot I_d + \Psi_m \\ \Psi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (1)$$

-Equations des tensions statoriques :

$$\begin{cases} V_d = R \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - p \cdot \omega_m \cdot \Psi_q \\ V_q = R \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + p \cdot \omega_m \cdot \Psi_d \end{cases} \quad (2)$$

-Equation du couple électromagnétique :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [\Psi_m \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q] \quad (3)$$

Pour $L_d = L_q$ (rotor à pôles lisses), l'expression (3) devienne :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_m \cdot I_q \quad (4)$$

-Equation mécanique :

$$C_e - C_r - f \cdot \omega_m = J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

L'équation (3) montre que le couple dépend à la fois de la composante directe I_d et en quadrature I_q du courant statorique, ce qui nécessite le contrôle de ces derniers pour assurer le contrôle du couple.

Avec cette formulation, le modèle dynamique du MSAP devienne moins complexe, permettant de traiter des grandeurs continues reliées entre eux par des équations linéaires à coefficients constants.

B. Principe de la commande vectorielle

Le contrôle par flux orienté est une méthode appropriée pour satisfaire des performances élevées. Il introduit un découplage entre le flux et le couple et assure une caractéristique de réglage du couple similaire à celle d'un moteur à courant continu à excitation séparée, (dont à flux inducteur constant le réglage du couple et de la vitesse se fait via le courant de l'induit uniquement) [3].

En effet, la **Fig. 1** correspond au diagramme de phase dans le repère (d q) du MSAP, où les courants statoriques sont représentés par un seul vecteur de courant i_s .

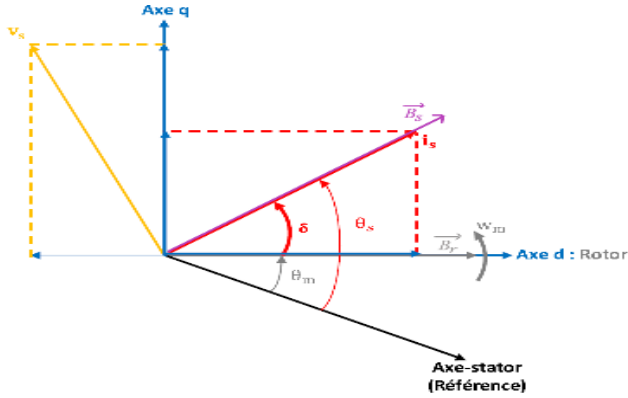


Fig. 1 : diagramme de phase du MSAP dans le repère (d q)

La projection de ce dernier sur les axes du repère (d q), permet d'écrire :

$$\begin{cases} I_d = I_s \cdot \cos \delta \\ I_q = I_s \cdot \sin \delta \end{cases} \quad (6)$$

Pour δ égale à 90° , l'équation (6) devient :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = I_s \end{cases} \quad (7)$$

En Remplaçant dans l'expression (3) du couple, on obtient :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_m \cdot I_s \quad (8)$$

Les expressions (7) et (8) montre que, avec le maintien de l'angle δ à 90° , le couple devient linéaire avec le courant en quadrature I_q quel que soit la relation entre les inductances L_d et L_q , chose qui permet de contrôler le couple ainsi que la vitesse en agissant seulement sur la composante I_q du courant statorique [4].

Sur le plan pratique, cette technique est obtenue en maintenant le courant I_d à zéro, permettant d'une part l'orientation du champ statorique en gardant l'angle interne du couple constant à 90° nécessaire pour assurer la stabilité et un fonctionnement optimal. D'autre part, le réglage

du couple est assuré uniquement par la composante en quadrature I_q du courant.

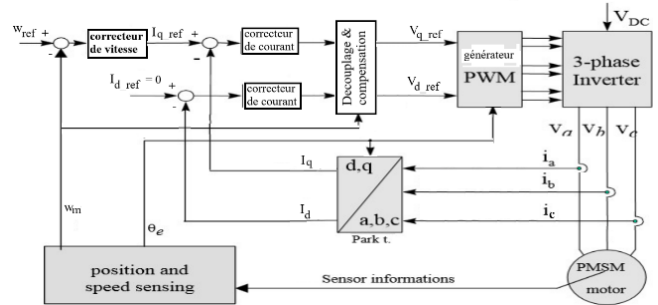


Fig. 2 : schéma bloc de la commande vectorielle du MSAP

Enfin, le contrôle vectoriel en vitesse du MSAP présenté par la **Fig. 2**, est réalisé par une chaîne de régulation en cascade, comprenant les boules internes des courants I_d et I_q et la boucle externe de la vitesse, dont la consigne du courant I_d est égale à zéro et la consigne du courant I_q correspond à la sortie du correcteur de vitesse [4].

III. SYNTHÈSE DES BOUCLES DE RÉGULATION

Classiquement la régulation des courants et de la vitesse est assurée par des régulateurs de type PI. Dans cette section nous allons voir les avantages qu'apporte un régulateur de type IP. Afin de tester et comparer ces deux régulateurs, nous allons les soumettre aux mêmes conditions de fonctionnement.

A. Régulation des courants

D'après les équations (1) et (2), la synthèse des boules de courant nécessite un découplage entre les grandeurs de l'axe d et de l'axe q.

La relations entre les tensions et les courants, peut s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{cases} V_d = V'_d + E_d \\ V_q = V'_q + E_q \end{cases} \quad (9)$$

Avec :

$$\begin{cases} V'_d = R \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} \\ V'_q = R \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (10)$$

Et,

$$\begin{cases} E_d = -p \cdot \omega_m \cdot L_q \cdot I_q \\ E_q = p \cdot \omega_m \cdot (L_d \cdot I_d + \Psi_m) \end{cases} \quad (11)$$

Le principe de découplage consiste à synthétiser les correcteurs en se basant sur les équations simplifiées (10), puis en ajoutant les termes de couplage de l'équation (11) à la sortie des correcteurs. De cette manière, la synthèse des correcteurs sera plus aisée [5] comme illustré par la **Fig. 3** pour l'axe d.

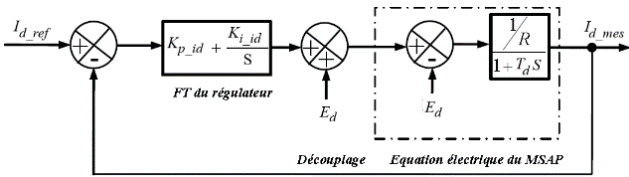


Fig. 3 : schéma bloc de la boucle de régulation du courant I_d

B. Régulation de la vitesse

Le contrôle de la vitesse est réalisé avec une chaîne de régulation en cascade, dont la boucle interne correspond à la boucle de régulation du courant I_q , cette dernière présente une dynamique très rapide et une erreur statique nulle, de telle sorte qu'on peut la modéliser par une fonction de transfert unitaire [2].

1) Synthèse du correcteur type PI

La structure de la boucle de régulation de la vitesse avec le correcteur PI est représentée par la **Fig. 4** :

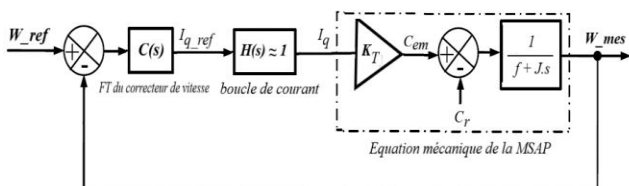


Fig. 4 : schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse avec correcteur de type PI

La fonction de transfert en poursuite ($C_r = 0$), est de la forme :

$$H(s) = \frac{1 + T_c \cdot s}{1 + 2 \cdot \frac{\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \quad (12)$$

Avec :

- $T_c = \frac{K_{p_v}}{K_{i_v}}$: la constante du temps du correcteur.
- $K_T = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \Psi_m$: la constante du couple.

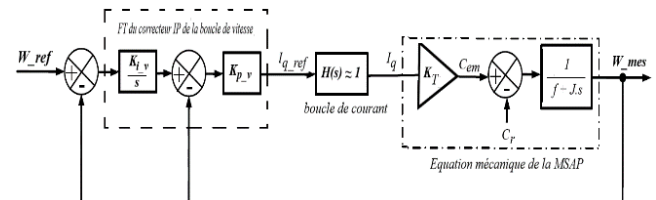
Et les coefficients du correcteur sont donnés par :

$$\begin{cases} K_{p_v} = \frac{2 \cdot J \cdot \xi \cdot \omega_n^{-f}}{K_T} \\ K_{i_v} = \frac{\omega_n^2 \cdot J}{K_T} \end{cases} \quad (13)$$

2) Synthèse du correcteur type IP

La structure de la boucle de régulation de la vitesse avec le correcteur IP est représentée par la **Fig. 5** :

Fig. 5 : schéma bloc de la boucle de régulation de la vitesse avec correcteur de type IP



En poursuite ($C_r = 0$), la fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$H(s) = \frac{1}{1 + 2 \cdot \frac{\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \quad (14)$$

Et les paramètres du correcteur sont calculés par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} K_{p_v} = \frac{2 \cdot J \cdot \xi \cdot \omega_n^{-f}}{K_T} \\ K_{i_v} = \frac{\omega_n^2 \cdot J}{2 \cdot J \cdot \xi \cdot \omega_n^{-f}} \end{cases} \quad (15)$$

3) Interprétation des résultats théoriques

D'après les expressions (12) et (14), on constate que pour les deux correcteurs, la réponse en vitesse est de type 2^{ème} ordre avec une erreur statique nulle et que la suppression est certaine de toute perturbation de type impulsion ou échelon.

Cependant, le correcteur IP permet d'obtenir une réponse en vitesse sans dépassement du type apériodique si on choisit un coefficient

d'amortissement ξ égal à l'unité. Dans ce cas, en poursuite, et contrairement au PI, le calcul des dérivées primaires en se basant sur les expressions (5), (12) et (14), montre que le IP permet d'éviter les discontinuités du couple, et d'obtenir un pic de couple de démarrage moins gênant dans les mêmes conditions de consigne et du temps de réponse.

IV. SYNTHÈSE DE LA TECHNIQUE DE CONTRÔLE DE L'ONDULEUR DE TENSION

Afin de reproduire au stator de la machine les tensions établies par la loi de la commande vectorielle, la machine est alimentée par un onduleur de tension à deux niveaux, qui correspond à la **Fig. 6**.

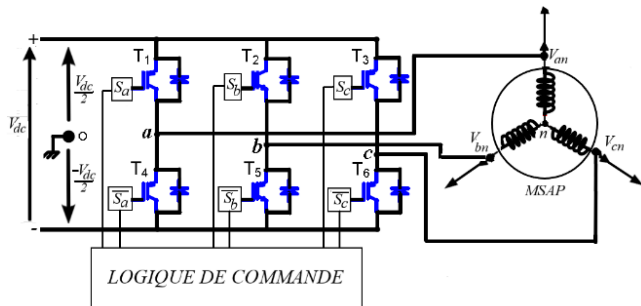


Fig. 6 : structure de l'onduleur de tension à deux niveaux

A. Modèle de l'onduleur de tension

L'onduleur est constitué par trois bras dont chacun comprend deux interrupteurs de l'électronique de puissance, commandés par les signaux S_j avec $j = \{a, b, c\}$, selon la logique suivante :

$$\begin{cases} S_j = 1 \rightarrow T_i \text{ fermé et } T_{i+3} \text{ ouvert} \\ S_j = 0 \rightarrow T_i \text{ fermé et } T_{i+3} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (16)$$

$i = \{1, 2, 3\}$

Ainsi, sous un ensemble d'hypothèses simplificatrices [5], l'onduleur est modélisé par le système matriciel suivant :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (17)$$

D'après la formule (17), on constate qu'à V_{dc} constante, les tensions de sortie de l'onduleur V_a , V_b et V_c ne dépend que de l'état des signaux logiques S_j avec $j = \{a, b, c\}$, chose qui nous permet d'avoir des tensions d'amplitude et de fréquence variables en agissant seulement sur le rapport cyclique des signaux S_j .

B. La technique de contrôle de l'onduleur

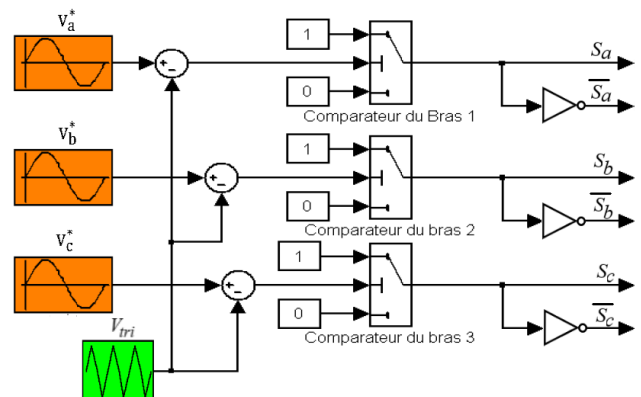
Généralement, la MLI est la technique la plus utilisée, répartie dans la littérature en deux grandes familles [6] :

- La MLI Sinus-Triangle, noté SPWM (Sine Pulse Width Modulation) ;
- La MLI Vectorielle, noté SVM ou SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation).

1) La MLI Sinus-Triangle (SPWM)

Le principe de cette technique est illustré par la **Fig. 7** :

Fig. 7 : schéma de principe de la MLI Sinus-Triangle



Les signaux de commande sont obtenus par la comparaison des tensions de référence de basse fréquence (V_a^* , V_b^* , V_c^*) avec une tension triangulaire symétrique de haute fréquence (3 à 10kHz environ) appelée porteuse. Le signal modulé obtenu à la sortie de chaque comparateur change d'état comme suit :

$$\begin{cases} S_j = 1 \text{ si } V_j^* \geq V_{tri} \\ S_j = 0 \text{ si } V_j^* < V_{tri} \end{cases}, j = \{a, b, c\} \quad (18)$$

Cette technique est caractérisée principalement par [7] :

- 12 commutations par période de modulation ;
- Une amplitude maximale à la tension de sortie égale à $\frac{V_{dc}}{2}$.

2) La MLI vectorielle (SVM)

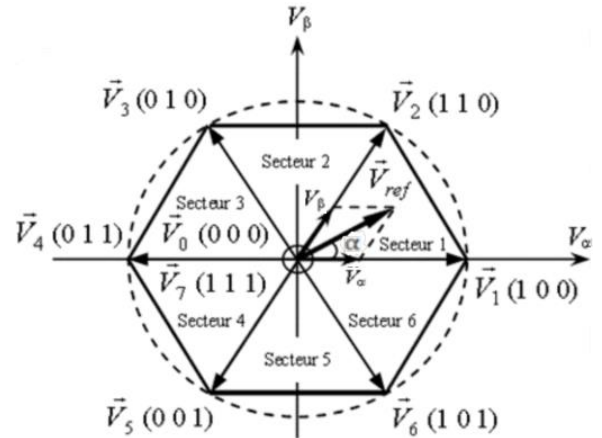
Cette technique consiste à calculer directement, pour chaque période de modulation T_m , les temps de conduction des interrupteurs de l'onduleur. Ceci, en se basant sur l'estimation d'un seul vecteur tension de référence V_{ref} qui représente le système des tensions triphasé désiré, et qui se caractérise par son module et son argument calculés par le système d'équations (19) suivante [7.8]:

$$\begin{cases} V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \\ \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_\beta}{V_\alpha} \right), \text{ avec } \alpha \in [0 \ 2\pi] \end{cases} \quad (19)$$

Avec,

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \quad (20)$$

En effet, la connaissance de l'amplitude et de l'argument permet de connaître à chaque instant



la position exacte de ce vecteur tension V_{ref} dans le plan (α, β) comme illustré par la **Fig. 8**.

Fig. 8 : présentation de V_{ref} et des vecteurs de base de sortie onduleur dans le plan biphasé (α, β)

Dans la même **Fig. 8**, est représenté les huit vecteurs tension de base de V_{ref} , noté V_0 à V_7 obtenus à l'aide des formules (17), (19) et (20) et des combinaisons possibles des états des bras de l'onduleur. Les vecteurs V_0 et V_7 sont appelés vecteurs zéro ou séquences de tension nulle tandis que les autres (V_1 à V_6) sont des vecteurs de tension active d'amplitude $2*V_{dc}/3$ et décalés l'une par rapport à l'autre de $\pi/3$, formant ainsi un hexagone réparti en six secteurs [9.10].

Alors, une première approximation consiste à échantillonner la tension V_{ref} , de tel sorte que, durant chaque pas d'échantillonnage T_m et pour un secteur donné, on peut l'approcher par combinaison des vecteurs tension de base, comme suit [9] :

$$T_m V_{ref} = T_1 V_x + T_2 V_{x+1} + T_0 (V_0 \text{ ou } V_7) \quad (21)$$

Avec :

- $x = \{1 \text{ à } 6\}$ est le secteur d'appartenance du vecteur tension V_{ref} ;
- V_x et V_{x+1} sont les vecteurs tension de base adjacentes du secteur x ;
- T_1 , T_2 et T_0 sont respectivement les durées des états de commutation correspondant respectivement aux vecteurs tension de base V_x , V_{x+1} et (V_0 ou V_7) formant le secteur contenant V_{ref} .

Volume II N° 6

Revue de l'Entrepreneuriat et de l'Innovation

Noté bien qu'en pratique, l'équation (21) n'est valable que si la variation de la tension V_{ref} reste négligeable durant la période T_m .

Soit :

$$a = \sqrt{3} \frac{V_{ref}}{V_{dc}}, \text{ appelé l'indice de modulation ;}$$

Alors, les durées T_1 , T_2 et T_0 sont obtenues par projection de l'équation (21) sur les axes du plan (α, β) , d'où :

$$\begin{cases} T_1 = T_m \cdot a \cdot \sin\left(\frac{x\pi}{3} - \alpha\right) \\ T_2 = T_m \cdot a \cdot \sin\left(\alpha - \frac{(x-1)\pi}{3}\right) \\ T_0 = T_m - (T_1 + T_2) \end{cases} \quad (22)$$

Cependant, le temps de conduction de chaque interrupteur de l'onduleur se diffère selon l'ordre de disposition des tensions de base V_x , V_{x+1} et $(V_0$ et/ou $V_7)$ durant chaque période T_m , dont ils en résultent différente modèle de forme d'onde des signaux de commande des bras de l'onduleur.

Dans ce travail, nous intéressons à la technique SVM symétrique à commutation de deux bras [9]. Ainsi, pour chaque période T_m , l'estimation de la tension V_{ref} est donné par :

$$T_m V_{ref} = \frac{T_1}{2} V_x + \frac{T_2}{2} V_{x+1} + T_0(V_0 \text{ ou } V_7) + \frac{T_2}{2} V_{x+1} + \frac{T_1}{2} V_x \quad (23)$$

Le choix de V_0 ou de V_7 dépend du secteur x dont il correspond à celui qui se diffère de V_{x+1} par l'état d'un seul bras de l'onduleur. Ainsi, les signaux de commande des trois bras de l'onduleur sont de la forme suivante pour le secteur 1 ($x=1$) :

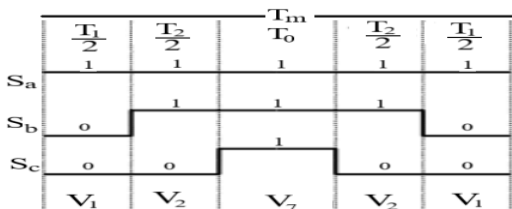


Fig. 9 : forme d'onde des signaux de commande dans le secteur 1 avec la SVM

Cette version de la SVM est caractérisée par :

- 8 commutations par période de modulation ;
- Une amplitude maximale à la tension de sortie égale à $\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}$;

V. RESULTATS DE SIMULATION

A. Présentation des résultats

Afin de comparer les performances en vitesse des deux contrôleurs PI et IP, nous avons simulé, dans l'environnement Matlab/Simulink, la commande vectorielle du MSAP, dont les paramètres sont mentionnés dans le tableau I.

**Tableau VIII
Paramètres du MSAP**

Nom du paramètre	Valeur
Puissance nominale en W	500
Couple de charge nominale en N.m	0.8
Tension nominale en V	190
Courant nominale en A	4.7
Vitesse nominale en tr/mn	6000
Nombre de paires de pôles	3
Résistance statorique en Ohm	1.59
Inductance directe en H	0.0033
Inductance en quadrature en H	0.0033
Flux maximal en Wb	0.052
Moment d'inertie kg.m ²	0.003573
Coefficient de frottement en N.m.s/rd	0.00047

Cette simulation, a été réalisée en tenant en considération les paramètres indiqués dans le tableau II.

Tableau II
Paramètres MLI et de simulation

Nom du paramètre	Valeur
Tension du bus continu V_{dc} en V	311
Fréquence de modulation en kHz	10
Fréquence de simulation en kHz	200
Temps de simulation en sec	8

Les paramètres des correcteurs de vitesse et du courant regroupées dans le même tableau III, sont calculés pour atteindre les performances désirées, indiquées dans le même tableau.

Tableau III
Paramètres des correcteurs PI et IP de courant et de la vitesse

	ξ	$t_r(5\%)$	PI		IP	
			K_p	K_i	K_p	K_i
Boucle du courant	1	0.062 sec	3.445	1920	3.445	557.5
Boucle de vitesse	1	1 sec	0.143	0.34	0.143	2.41

Les courbes de comportements des grandeurs électriques et mécaniques correspondant aux **Fig. 10-14**, sont relevées sous les conditions de marches suivantes :

- Démarrage à vide ($C_r=0$) avec une consigne de vitesse de 3000tr/mn ;
- À l'instant $t=3$ sec, augmentation de la consigne de vitesse de 3000 à 6000tr/mn ;
- À l'instant $t=6$ sec, application du couple de charge nominal égale à 0.8N.m.

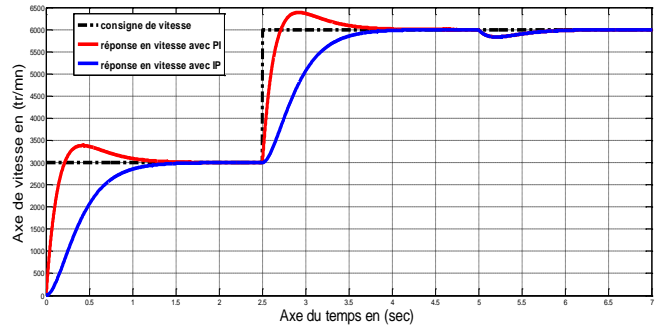


Fig. 10 : courbes de vitesse en fonction du temps

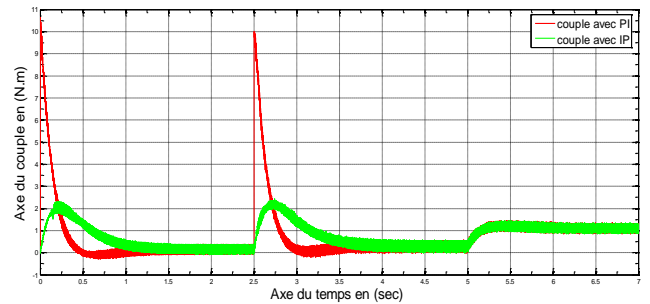


Fig. 11 : courbes du couple moteur en fonction du temps

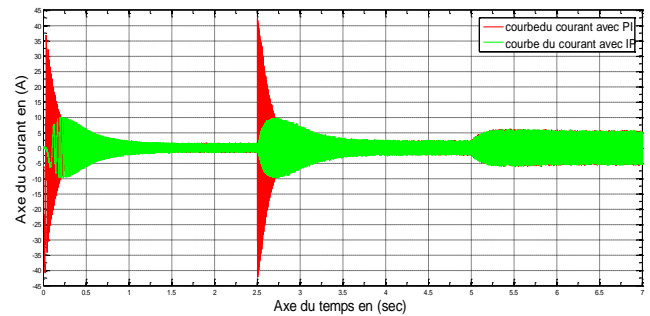


Fig. 12 : courbes du courant en fonction du temps

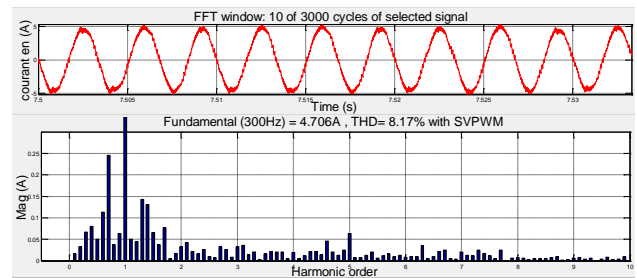


Fig. 13 : spectre fréquentiel du courant statorique avec **SVPWM**

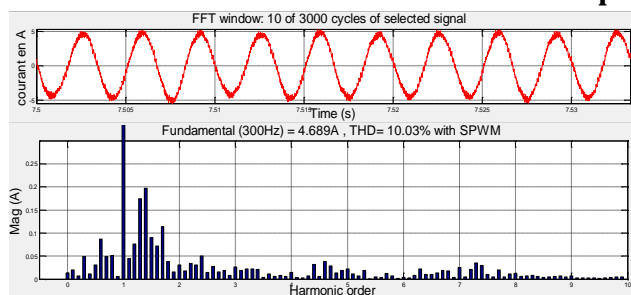


Fig. 14 : Spectre fréquentiel du courant statorique avec SPWM

B. Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation montrent que, la commande vectorielle par orientation de flux avec les deux régulateurs PI et IP arrivent en fin de compte à contrôler le couple et la vitesse de la machine (**Fig. 10 & 11**) aussi bien en poursuite qu'en régulation tout en assurant les performances dynamiques et statiques désirées. Toutefois, le régulateur IP présente des performances en régime transitoire plus satisfaisantes, en éliminant le dépassement de vitesse et en limitant les pics du courant et du couple, observés avec le correcteur PI (**Fig. 10, 11 & 12**).

En outre, les **Fig. 13 et 14** montrent que le contrôle de l'onduleur avec la MLI vectoriel présente l'avantage, en régime permanent, de diminuer le THD du courant de 10% à 8% environ, chose qui se répercute automatiquement sur les ondulations du couple et par la suite sur la vitesse.

VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Dans ce document, nous avons présenté la commande vectorielle par orientation du flux, pour le contrôle de vitesse d'un moteur synchrone à aimants permanents, alimentée par un onduleur de tension contrôlé par la technique de la MLI. D'une part, la robustesse du correcteur IP par rapport au PI en termes de régulation de vitesse et de courant est bien

justifié théoriquement ainsi que par simulation. Néanmoins, les expressions des gains des correcteurs du courant et de la vitesse, font intervenir les paramètres de la machine, ainsi toute influence de ces derniers par la température, l'état magnétique et/ou la charge du moteur détériora les performances dynamiques du système en sa globalité.

L'étape suivante serait de développer des techniques de commande adaptatif basé sur la logique floue, permettant la mise à jour en temps réel des paramètres des correcteurs, tout en gardant le même niveau de performances.

Références

- [1] sA. GH. AISSAOUI, M. ABID, H. ABID, A. TAHOUR, "LA COMMANDE ADAPTATIVE PAR MODÈLE DE RÉFÉRENCE DE LA MACHINE SYNCHRONE", Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 53, 3, p. 295–307, Bucarest, 2008
- [2] K. CHIKH, A. SAAD, M. KHAFALLAH and D. YOUSFI, "PMSM vector control performance improvement by using pulse with modulation and anti-windup PI controller", 978-1-61284-732-0/11/\$26.00 ©2010 IEEE.
- [3] A. LOKRITI, Y. ZIDANI et S. DOUBABI, "COMPARAISON DES PERFORMANCES DES REGULATEURS PI ET IP APPLIQUES POUR LA COMMANDE VECTORIELLE A FLUX ROTORIQUE ORIENTE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE", 8^{ème} Conférence Internationale de Modélisation et Simulation - MOSIM'10 - 10 au 12 mai 2010 - Hammamet – Tunisie.
- [4] M. SEBBA, A. CHAKER, Y. MESLEM et S. HASSAINE, "Commande en Vitesse du Moteur Synchrone à Aimants Permanents Dotée d'un Observateur d'Etat de LUENBERGER", 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 03-04 November 2007.
- [5] R. K. Sharma, V. Sanadhya, L. Behera and S. Bhattacharya, "Vector Control Of A Permanent Magnet Synchronous Motor", 978-1-4244-2746-8/08/\$25.00 © 2008 IEEE.
- [6] Shweta Singh and A.N. Tiwari, "Analysis and Simulation of Vector Controlled PMSM Drive using SVPWM Inverter", 2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 978-1-5090-4307-1/17/\$31.00 ©2017 IEEE.
- [7] M. SEBBA, S. HASSAINE, S. MOREAU et A. CHAKER, "analyse et synthèse d'une structure de contrôle vectoriel simplifiée associée au couple de charge appliquée au moteur synchrone à aimants permanents", ACTA ELECTROTECHNICA, volume 50, Numbre 02 2009.
- [8] A. G. AISSAOUI, M. ABID, H. ABID et A. TAHOUR, "LA COMMANDE ADAPTATIVE PAR MODÈLE DE RÉFÉRENCE DE LA MACHINE SYNCHRONE", Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg., 53, 3, p. 295–307, Bucarest, 2008.
- [9] Zhenyu Yu, "Space-Vector PWM With TMS320C24x/F24x Using Hardware and Software Determined Switching Patterns", Application Report SPRA524, 1999.