

**Proceedings Book Series -PBS-**

**10th International Conference  
on Green Energy & Environmental Engineering**

**-GEEE-**

**Editeur : Dr. Ahmed Rhif (Tunisie)**





# CNPSI

Centre National de la Promotion Scientifique et de L'innovation

**Proceedings Book Series -PBS-**

**10th International Conference  
on Green Energy & Environmental Engineering**

**-GEEE-**

# Comités

## Partenaires Honoraires

Dato' Dr. Mohamed Yussof Ghazali (MYS)

*CEO of NUSATEK Company*

Dr. Khai Mun (MYS)

*Dean of Engineering Faculty (IUL)*

## Présidents d'honneurs

Nabila Guerfi (ALG)

Bendifallah Leila (ALG)

El Mati Khoumri (MOR)

Amer Zerek (LYB)

## Présidents Généraux

Ahmed Rhif (TUN)

Fatima Zohra Boufadi (ALG)

Jeru Achyl Hounogbe (SEN)

Tayane Souad (MOR)

## Comité d'organisation

Abdoulaye Bouya Diop (SEN)

Akrouch Soukaina (MOR)

Allé Dioum (SEN)

Belatel Mimi (ALG)

Gherbi Mohamed (ALG)

Georges Descombes (FR)

Hamitri Fatiha (ALG)

Kasbadji Merzouk Nachida (ALG)

Meriem Hayani Mechkouri (MOR)

Nada Chtioui (TUN)

Nawel Seddiki (ALG)

Sara Zatir (ALG)

Sahbeni Kawther (TUN)

Salma El Aimani (MOR)

Yosra Lahdheri (TUN)

## Comité Technique

Abdelkrim Khireddine (ALG)

Abdellah Mechaqrane (MOR)

Barara Mohamed (FR)

Berbaoui Brahim (ALG)

Bedoud khouloud (ALG)

Bouslah Naima (USTHB, ALG)

Cherkaoui Abdeljzbbbar (MOR)

Djalila Boudemagh (ALG)

El Fadar Abdellah (MOR)

Fateh Mebarek-Oudina (ALG)

Hadja Fatima Mehnane (ALG)

Haitham Saad Mohamed Ramadan (FR)

Kamal Reklaoui (MOR)

Kheiri Abdelhamid (FR)

Kouzou Abdallah (ALG)

Madiha Yessari (MOR)

Manal Marzouq (MOR)

Merchichi Amira (UQAT, CAN)

Mhamed Hammoudi (ALG)

Mounir Gaidi (UAE)

Ouadjaout djamel (CRTSE, ALG)

Ould Hamou Malek (ENP, ALG)

Olga Boiprav (BLR)

Rabhi Selma (ALG)

Rachid Benchrifa (MOR)

Rafika Boudries (ALG)

Rahmouni Soumia (ALG)

Sana Ahmed Abdaljlil (LBY)

Seddiki Nesrinne (UMBB, ALG)

Sellam Mebrouk (ALG)

Slimane Semghouli (MOR)

Sofiane Amara (ALG)

Youssef Errami (MOR)

Zohra Ameer (ALG)

# Sommaire

L'influence des ajouts minéraux sur Le gain dans la fabrication d'un ciment <i>Y. Labbaci, Y. Abdelaziz, N. Alouani, A. Mekkaou</i> .....	1
Elaboration et caractérisation de Certaines céramiques sans plomb de type pérovskite $Ba_{1-x}Y_x/3 Bix/3 (Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$ <i>BOUTAL N, TAIBI K</i> .....	7
Conception d'un système aquaponique avec une optimisation énergétique intégrée <i>Dorra Cherif, Salmen CHEHAIBI, Salwa Bouadila, AmenAllah Guizani</i> .....	17
Estimation des paramètres de la machine asynchrone monophasée par le filtre de kalman étendu <i>Samir Arfa, AblaAbla Khiareddine</i> .....	25
Monitoring De La Population De Cerf De Barbarie Dans La Foret De Beni Salah (Wilaya D'el Tarf- Nord-Est Algerien) <i>Bouaicha Badreddine, Lazli Amel</i> .....	32
Application de l'Indice Diatomique Générique (IDG) et de l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN) pour Déterminer la Qualité Écologique des Eaux de l'Oued Nfifikh et du Barrage de l'Oued El Maleh <i>H. Nassur, SN. Nassor, K. Hilmi, N. Meskini, H. Messaouri</i> .....	37



## L'influence des ajouts minéraux sur Le gain dans la fabrication d'un ciment

Y. Labbaci<sup>1</sup> | Y. Abdelaziz<sup>2</sup> | N. Alouani<sup>3</sup> | A. Mekkaou<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université Ahmed Draia Adrar

<sup>2</sup>université Tahri Mohamed Bechar

<sup>3</sup> université Tahri Mohamed Bechar

<sup>4</sup> université Tahri Mohamed Bechar

[labbaciyasser@yahoo.fr](mailto:labbaciyasser@yahoo.fr)

00213671519245

### 1- Résumé

Le but de ce travail est de déterminer l'efficacité dans l'utilisation des ajouts minéraux comme une substitution partielle du ciment pour la fabrication d'un mortier économique. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer l'influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et l'énergie de fabrication. Nous avons déterminé les résistances mécaniques des mortiers de ciment Portland contenant un pourcentage variable des ajouts (10, 15, 20, 25 et nous avons estimé par la suite son énergie de fabrication.

**Mots-clés :** ajout minéraux, ciment, résistance mécanique, durabilité.

### 2- Introduction

Vu le besoin de plus en plus important en matériau de construction. Cette étude a pour objet et dans un contexte général, de contribuer à valoriser l'utilisation les ajouts minéraux dans la fabrication des mortiers. Alors que cette l'utilisation des ajouts comme substitution du ciment pour la fabrication des mortiers a permis d'apporter quelques avantages :[1][2][3][4][5][6][7]

- En fonction d'un besoin, un pourcentage de remplacement conduit a des propriétés physiques et mécaniques ciblées.
- Economiquement : l'utilisation du clinker (constituant clé du ciment) démunie en fonction du taux de la substitution.
- Valorisation des ressources locales par cette utilisation des ajouts tel que la pouzzolane, les fumés de silice, les sables de dune.

### 3- Caractérisation des mortiers à l'état durci

La résistance mécanique a été déterminée expérimentalement par écrasement des échantillons [8] pour des taux variables de pourcentage de l'ajout (10, 15, 20, 25 et 30%) pour suivre l'influence du niveau de remplacement.

L'évolution de cette résistance à la compression à différents âges est donnée par la courbe de la figure .1

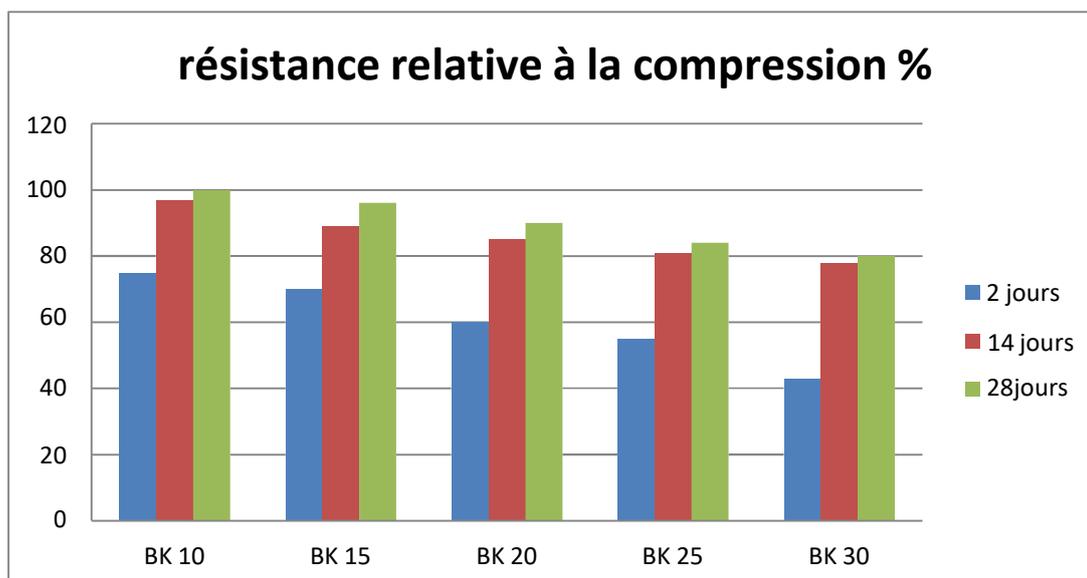


Fig.1 Développement de la résistance relative à la compression des différents mortiers à base de la substitution

#### 4- Calcul de la consommation d'énergie

Sur la base des données rapportées dans la littérature [9][10][11][12], on peut évaluer par un simple calcul la demande énergétique lorsque des roches volcaniques sont utilisées comme remplacement partiel du ciment. Le tableau .1 regroupe les valeurs de la demande énergétique.

Tableau 1. Demande énergétique [9].

<sup>a</sup> Valeurs dans la littérature entre 800 et 1200 kWh / t pour le procédé à sec.

<sup>b</sup> Sans tenir compte du processus d'extraction de la carrière.

<sup>c</sup> Evaluation pour la calcination à 800 ° C.

La consommation d'énergie pour la production d'une tonne de mortier est évaluée en utilisant la relation suivante [8]:

$$E = C_c E_c + C_{vp} E_{vr}$$

où:

E : est la consommation d'énergie pour la production d'une tonne de mortier.

C<sub>c</sub> et C<sub>vp</sub> : sont les proportions de ciment et de poudre dans le mortier.

E<sub>c</sub> :est la consommation d'énergie du procédé de fabrication du ciment (950 kWh/t) et la finition du ciment (50 kWh/t).

E<sub>vr</sub> est la consommation d'énergie pour le broyage des roches volcaniques (75 kWh/t).

Par rapport à la consommation d'énergie d'une tonne de ciment, la figure. 2 résume la consommation d'énergie pour la production d'une tonne de mortier de ciment à base de poudre volcanique (10, 15, 20, 25 et 30%).

<b>Ciment</b>	
<b>Procédé de fabrication</b>	950 <sup>a</sup>
<b>Broyage</b>	50
<b>Poudre volcanique</b>	
<b>Naturelle ou calcinée</b>	0 ou 500 <sup>c</sup>
<b>Broyage des roches volcaniques</b>	0 ou 75

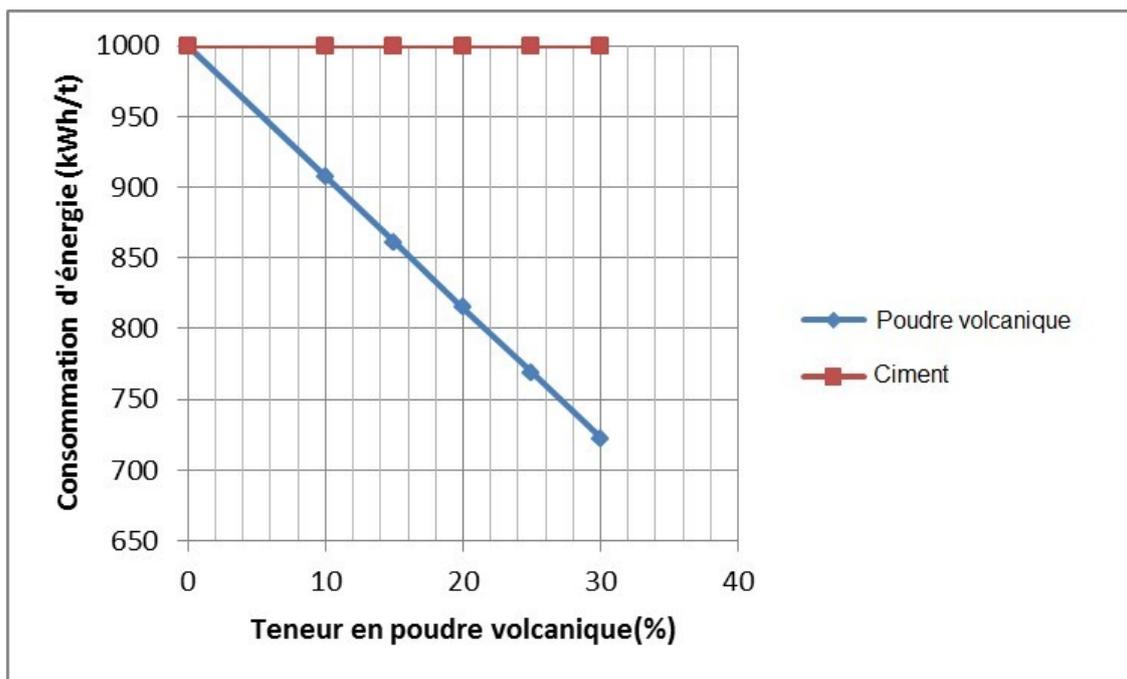


Fig.2. Consommation d'énergie pour la production d'une tonne de mortier.

### 5- Conclusion :

Suite ces résultats, il est possible de constater les observations principales suivantes :

- Tous les mortiers, avec ou sans ajout minéral, montrent une augmentation de la résistance avec le temps de durcissement. Cette constatation peut être attribuée à l'hydratation du ciment qui génère des changements dans la compacité.
- Lorsque le niveau du remplacement augmente, la résistance à la compression des mortiers à base de ce ciment diminue à différents âges.
- Au jeune âge, la résistance à la compression diminue significativement avec l'augmentation du pourcentage de l'ajout. Cette réduction de la résistance à la compression est attribuée principalement à une activité pozolanique plus lente des matériaux cimentaires supplémentaires [13], [14].
- Cependant après quelques semaines, les résistances à la compression ont été augmentées. En effet, à 28 jours, une résistance à la compression comparable à celle du mortier témoin a été observée pour des mortiers contenant 10% d'ajout. A 28 jours, une augmentation des résistances à la compression a été observée pour les mortiers contenant 15% et 20% .

- Ces résultats obtenus sont en parfait accord avec ceux déjà trouvés par Senhadji [15]. Les auteurs ont noté que les mortiers contenant la scorie présentent des résistances à la compression comparables à celles du mortier témoin à partir de la période de 28 jours.
- D'après les résultats illustrés sur la figure.2, on constate que la consommation d'énergie pour la production d'une tonne de ciment à base de poudre volcanique (10, 15, 20, 25 et 30%) est plus faible que celle du ciment seul.

## 6- Références

[1] Boubekeur T (2009). Evaluation des performances des ciments Portland au calcaire : exemple de la cimenterie de Chlef. Mémoire de Magister. Université Hassiba Benbouali de Chlef.

[2] Meindre M. (1952). Geology of massive Boukaïs. Scientific Economic Bulletin, Mining Research Office of Algeria 2, 8-45.

[3] Papadakis, V, Tsimas, S. (2002). Supplementary materials in concrete. Part I: Efficiency and design. Cement and Concrete Research, Vol. 32, 1035-1041.

[4] Senhadji Y, Escadeillas G, Khelafi H, Mouli M, Benosman A. (2012) Evaluation of natural pozzolan for use as supplementary cementitious material. European Journal of Environmental and Civil Engineering 16(1), 77-96.

[5] Yang K, Jung Y, Cho M , Tae S. (2015). Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO<sub>2</sub> emissions from concrete. Journal of Cleaner Production 103(15), 774-783.

[6] Al-Chaar, G. K., Al-Kadi, M., & Asteris, P. G. (2013). Natural pozzolan as a partial substitute for cement in concrete. The Open Construction and Technology Journal, 7, 33–42.

[7] Kaid N, Cyr M, Khelafi H. (2015). Characterization of an Algerian natural pozzolan for its use in eco-efficient cement. International Journal of Civil Engineering 13(4), 444-454.

[8] NF EN 196-1(2005). Methods of testing cement. Determination of strength. AFNOR.

**[9]** Hamidi M, Kacimi L, Cyr M, Clastres P. (2013). Evaluation and improvement of pozzolanic activity of andesite for its use in eco-efficient cement. *Construction and Building Materials* 47, 1268-1277.

**[10]** Madloul N, Saidur R, Hossain M, Rahim N. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renew Sustainable Energy Rev* 15(4), 2042-60.

**[11]** Bribián I, Capilla A, Usón A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Build Environ* 46(5), 1133-40.

**[12]** Hosten C, Fidan B. (2012). An industrial comparative study of cement clinker grinding systems regarding the specific energy consumption and cement properties. *Powder Technol* 221, 183-8.

**[13]** Shannag M, Yeginobali A (1995). Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan, *Cem. Concr. Res.* 25 647– 657.

**[14]** Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nded.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

**[15]** Senhadji Y., Escadeillas G., Mouli M., Khelafi H., Benosman A. (2014). Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar. *Powder Technology* 254, 314-323.

## Elaboration et caractérisation de Certaines céramiques sans plomb de type pérovskite $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$

BOUTAL N.<sup>1</sup>, TAIBI K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département de chimie faculté des sciences exactes, université Mohamed El Sedik Ben Yahia, Jijel

<sup>1,2</sup>Laboratoire de Cristallographie et thermodynamique, Faculté de Chimie, U.S.T.H.B., B.P. 32 El-Alia

---

### RESUME

Les matériaux ferroélectriques actuellement utilisés sont des céramiques à base de plomb. De tels composés sont nocifs à l'environnement en raison de la toxicité et de la volatilité de l'oxyde de plomb. Notre travail intervient dans le cadre de la protection de l'environnement. Dans cet esprit de nouveaux matériaux sans plomb dérivés de  $BaTiO_3$ , par des substitutions cationiques en site dodécaédrique ont été examinés. La présente étude concerne des compositions relativement proches de  $BaTiO_3$ . Ainsi, nous avons élaborés les composés  $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$  ( $x=0.25$  et  $x=0.05$ ). Les synthèses ont été réalisées par réaction à l'état solide. La pureté des phases obtenues a été contrôlée par DRX. L'étude des propriétés a été réalisée par des mesures diélectriques en température et en fréquence respectivement dans les gammes 77-400 K et  $10^2$ - $2 \cdot 10^5$  Hz. Les résultats obtenus montrent que les matériaux  $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$  ( $x=0.25$  et  $x=0.05$ ) présentent des propriétés ferroélectriques relaxeurs.

**Mots-clés :** *céramique, ferroélectrique, relaxeur.*

---

### I. Introduction

Selon leur comportement en fréquence et en température, on distingue les composés ferroélectriques classiques (FC) des ferroélectriques relaxeurs (FR) [1]. Ces derniers présentent une forte dispersion en fréquence, caractérisée par une diminution du maximum de la permittivité diélectrique ( $\epsilon'_{max}$ ) et une augmentation de la température ( $T_m$ ) associée à ce maximum lorsque la fréquence de mesure augmente. En outre la transition de phase diffuse et la polarisation ne disparaît pas à  $T_m$  comme dans le cas des F.C. Les matériaux ferroélectriques actuellement utilisés sont des céramiques à base de plomb. De tels composés sont nocifs à l'environnement en raison de la toxicité et de la volatilité de l'oxyde de plomb. Dans le cadre du respect de l'environnement, les recherches actuelles sont orientées vers de nouveaux produits dépourvus de plomb mais qui présenteraient des performances similaires à celles actuellement utilisées dans l'industrie. C'est dans cet esprit que de nombreux travaux sont menés sur des matériaux pérovskites dérivés de  $BaTiO_3$ , obtenus par des substitutions cationiques (homovalentes ou hétérovalentes) en site A et/ou B [2].

C'est également dans cette perspective que se situe le présent travail : de nouveaux matériaux sans plomb dérivés de  $BaTiO_3$ , par des substitutions cationiques en site octaédrique et/ou dodécaédrique ont été examinés. Notre objectif est non seulement d'élaborer et de caractériser les céramiques, mais également de relier leurs propriétés ferroélectriques à leur composition et notamment à la nature des substitutions. Parmi les substitutions hétérovalentes couplées en sites A et B, nous avons examiné les compositions  $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$  pour  $x = 0,025$  et  $0,050$ .

## II. Préparation

Les compositions  $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$  sont préparées à partir des réactifs  $BaCO_3$ ,  $Y_2O_3, Bi_2O_3$ ,  $TiO_2$  et  $ZrO_2$  avec une pureté de 99,9% (TABLEAU 1). selon le schéma réactionnel  $(1-x)BaCO_3 + x/3 Y_2O_3 + x/3 Bi_2O_3 + 0,65TiO_2 + 0,35ZrO_2 \longrightarrow Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$

Les poudres sont préparées par réaction à l'état solide. Après pesée (200 à 250 mg de produit) et broyage fin durant 2 heures, le mélange stœchiométrique des produits de départ est placé dans un creuset en platine, puis introduit dans le four pour le traitement thermique.

La durée de calcination comprise entre 15 et 17 heures, et le domaine de température variant entre 850°C et 1300°C. La durée et la température de calcination dépendent de la nature des phases préparées.

La poudre obtenue après calcination est homogénéisée puis rebroyée finement au mortier d'agate durant 2 heures, puis pressée à 1.8 T.Cm<sup>-2</sup> pendant 1 minute, sous forme de disque de 8 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur environ. La pastille est d'abord pesée, ensuite placée dans un creuset en platine, puis frittée durant 4 heures à des températures comprises entre 1100 et 1400 °C.

\* L'étude radiocristallographique sur poudre à température ambiante a permis de contrôler la pureté de différentes solutions solides et de limiter leurs domaines d'existence.

\* L'étude diélectrique a été menée sur céramiques: les variations en température (77-400 K) et en fréquence (0,1-100 kHz) des permittivités relatives réelle ( $\epsilon'_r$ ) et imaginaire ( $\epsilon''_r$ ) ainsi que celle du rapport  $1/\epsilon'_r$  ont été examinées à l'aide d'un pont de mesure de capacité de type Wyne Kerr.

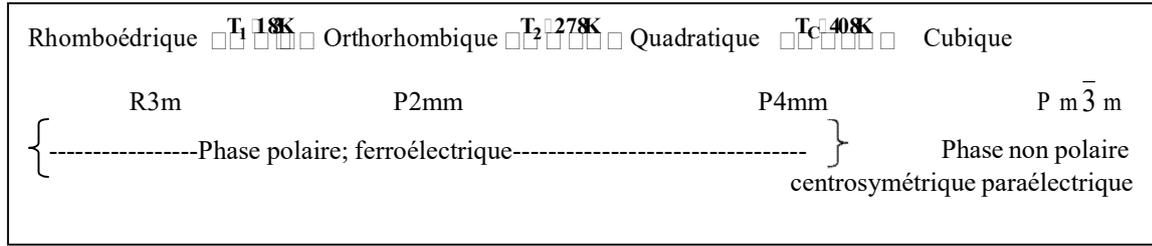
Produit	Marque et pureté	Produit	Marque et pureté
BaCO <sub>3</sub>	(Merck, 99,9%)	TiO <sub>2</sub>	(Aldrich, 99,9%)
ZrO <sub>2</sub>	(Aldrich, 99,9%)	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Aldrich, 99,9%)
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(Aldrich, 99,9%)		

TABLEAU I : CARACTERISTIQUES DES PRODUITS DE DEPART

## III. Résultats et discussions

### Introduction

Les matériaux perovskites simples sont des composés de formulation  $ABO_3$ , dont les sites cuboctaédrique (A) et octaédrique (B) sont occupés chacun par un seul type d'atome. Les matériaux perovskites sans plomb ( $A \neq Pb$ ) les plus connus sont :  $BaTiO_3$ ,  $BaZrO_3$ ,  $CaTiO_3$ ,  $CaZrO_3$ ,  $SrTiO_3$ ...etc. Parmi cela,  $BaTiO_3$  (BT) s'est avéré l'un des plus intéressants en raison de ses propriétés ferroélectriques. Généralement, les matériaux pérovskites simples présentent des propriétés ferroélectriques classiques (F.C) caractérisées comme l'exemple de BT ci-dessous par les trois transitions structurales suivantes:



Au-dessus de  $T_c$ , BT se présente sous la forme d'une maille pérovskite idéale de symétrie cubique, de paramètre  $a = 4,031 \text{ \AA}$  (ICDD N°81-0213). A température ambiante, la maille est de symétrie quadratique de paramètres  $a = 3,993 \text{ \AA}$  et  $c = 4,036 \text{ \AA}$  (ICDD N°81-2205).

## Perovskites dérivées de $BaTiO_3$ par substitutions en site A

### III.2.1 les composés $Ba_{1-x}A_{2x/3}TiO_3$ (A= Bi, Y)

De telles compositions s'obtiennent par substitution de  $Ba^{2+}$  par des ions de charge différentes  $Bi^{3+}$  ou  $Y^{3+}$  (**substitution hétérovalente**).

#### $Ba_{1-x}Bi_{2x/3}TiO_3$

Une étude cristallographique a montré que la solution solide  $Ba_{1-x}Bi_{2x/3}TiO_3$  existe dans le domaine  $0 \leq x \leq 0,15$ . L'évolution en température et en fréquence de la permittivité relative réelle a mis en évidence deux comportements distincts selon le taux de substitution de Ba par Bi. Un comportement F.C est observé pour  $x < 0,09$ . Cependant, un comportement F.R apparaît dans le domaine  $0,09 \leq x \leq 0,15$ . Le remplacement de  $Ba^{2+}$  par  $Bi^{3+}$  conduit à une importante diminution de  $T_c$  ( $T_m$ ) dont la valeur est proche de l'ambiante. Les valeurs caractéristiques ( $\Delta T_r/T_r$  et  $\Delta T_m$ ) indiquent que le degré de diffusion de la transition augmente avec l'ajout de  $Bi^{3+}$ . Ce comportement a été relié à la structure électronique particulière de  $Bi^{3+}$  qui possède un doublet 6 (SP)<sup>2</sup> le rendant fortement polarisé [3-4].

#### $Ba_{1-x}Y_{2x/3}TiO_3$

Tout comme l'eupratrium, L'yttrium présente la particularité de s'incorporer en site A et B du réseau cristallin de  $BaTiO_3$ . Des études menées par diffraction des rayons X et par microscopie électronique à balayage sur des compositions  $Ba_{1-x}Y_{2x/3}TiO_3$  ont révélé une très faible incorporation de l'yttrium en site A de  $BaTiO_3$  ( $x \leq 0,015$ ) [51]. L'étude diélectrique a mis en évidence un comportement F.C pour  $x < 0,028$  et F.R pour  $x > 0,028$ . Ce dernier est caractérisé par un pic avec dispersion en fréquence et dont le maximum décroît lorsque la quantité d'yttrium augmente [5].

Par ailleurs, l'incorporation de Y en site B a donné lieu au composé  $BaTi_{1-y}Y_yO_3$  dont le domaine d'existence se limite à  $y \leq 0,122$ . Par ailleurs, les échantillons avec  $y \leq 0,059$  présentent une symétrie quadratique et un caractère FC alors que ceux pour lesquels  $y \leq 0,059$  la symétrie est cubique leur comportement est de type FR.

## Pérovskites dérivées de BaTiO<sub>3</sub> par substitutions en site B :

### III-3-1 Ba(Ti<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>)O<sub>3</sub> (BTZ)

D'une manière générale :

- pour les compositions proches de BaTiO<sub>3</sub> ( $y < 0.15$ ), l'évolution thermique de la permittivité met en évidence trois anomalies similaires à celles observées dans BaTiO<sub>3</sub> caractéristiques des ferroélectriques classiques. Dans ce domaine de composition, l'augmentation de la teneur en zirconium ( $y$ ) tend à abaisser la température de Curie ( $T_C$ ) et à augmenter  $T_2$  et  $T_1$ , impliquant une réduction du domaine ferroélectrique où les trois anomalies sont observées. Sous la température de Curie  $T_C$  ces compositions sont ferroélectriques et obéissent à la loi de Curie-Weiss.
- pour les compositions en zirconium comprises entre 0.15 et 0.24, un seul pic apparaît à la température de Curie, associé à la transition de la structure cubique (paraélectrique) à la structure rhomboédrique (ferroélectrique). De tels matériaux présentent un léger écart à la loi de Curie-Weiss et se distinguent par des pics diélectriques relativement larges (ou diffus).
- pour des taux de zirconium compris entre 0.25 et 0.5, les matériaux se distinguent par une structure macroscopique cubique indépendamment de la température. Ceci implique l'absence de transition structurale dans tout le domaine de température exploré. Cependant, les mesures diélectriques mettent évidence un très large pic dont le maximum de permittivité dépend en amplitude et en position de la fréquence : l'augmentation de la fréquence déplace le pic vers de faibles valeurs de permittivité et de fortes valeurs de la température du maximum de permittivité (noté  $T_m$ ). De tels matériaux sont nommés F.R et présentent un fort écart à la loi de Curie-Weiss.

Les travaux sur les BTZ ont été marqués par l'étude des transitions structurales et la construction du diagramme des phases du système BaTiO<sub>3</sub>-BaZrO<sub>3</sub> (Fig. III-1). Ils ont également montré qu'une faible augmentation de la teneur en Zr (5% en moles) conduisait à un maximum de la constante diélectrique à la température  $T_C$  proche de 378 K [6-7].

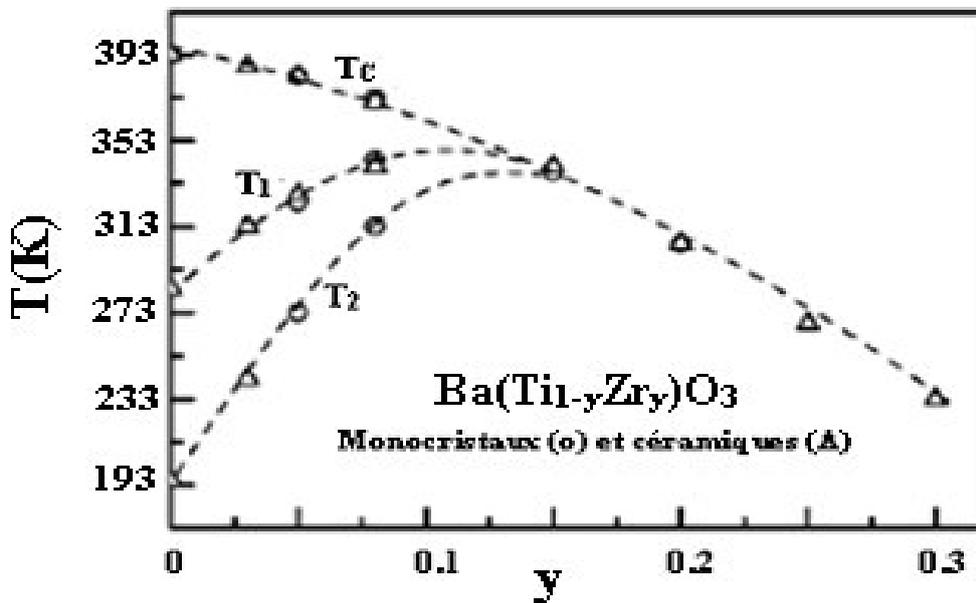


Fig. III-1 : Diagramme des phases pour des céramiques Ba(Ti<sub>1-y</sub>Zr<sub>y</sub>)O<sub>3</sub> (0 ≤ y ≤ 0.3) à 1 kHz

Lors d'une étude par DRX, ATD, mesures diélectriques et détermination de la polarisation rémanente, D. Hennings et al [8] ont mis en évidence la coexistence des phases ferroélectrique et paraélectrique dans un large intervalle de température au voisinage de la transition de phase. En outre, d'un point de vue structural, le caractère diffus de la transition a été relié à l'hétérogénéité chimique de composition au sein du site B de ces perovskites.

D'autres études sur des compositions  $Ba(Ti_{1-y}Zr_y)O_3$  élaborées ont mis en évidence que l'augmentation de la teneur en zirconium conduisait à :

\* l'écart à la linéarité dans la variation de température transition en fonction de la composition x. [63]

\*un minimum de la fréquence de relaxation diélectrique se produisant près de  $T_C$ . Ces variations sont corrélées avec l'homogénéité chimique et la microstructure [9].

D'autre part, des investigations par DRX ont affirmé que les BTZ présentaient un comportement relaxeur de même type que les matériaux à base de plomb bien connus:  $Pb(Mg_{0.3}Nb_{0.6}Ti_{0.1})O_3$ ,  $PbSc_{1/2}Nb_{1/2}O_3$  et  $PbSc_{1/2}Ta_{1/2}O_3$ . Les BTZ subissent une transition de phase rhomboédrique à champ nul et se transforment spontanément d'un état FR vers un état FC lors du refroidissement. Ce résultat indique que les BTZ comme candidats prometteurs pour les matériaux accordables à température ambiante [10-11]

Des expériences par diffusion Raman, associées à des mesures diélectriques ont été effectuées sur diverses céramiques BTZ [12-13]. Lorsque la concentration de zirconium augmente :

- la température de transition de phase évolue vers les basses températures
- le comportement FC se transforme en FR
- la présence de nanorégions polaires localement rhomboédriques résultant des champs aléatoires associés aux ions.

Par ailleurs, X. G. Tang et al. [14-15] ont corroboré les résultats précédents en prouvant que :

- lorsque Zr augmentait, la nature diffuse de la transition de phase s'amplifiait
- le comportement relaxeur apparaissait pour une teneur en Zr supérieure à 0,25
- la granulométrie influençait les propriétés diélectriques des BTZ: la présence de grains de faible taille favorisait le comportement FR; cependant, les valeurs de permittivité et de la température de Curie diminuaient.

L'étude diélectrique des BTZ dans une vaste gamme de fréquences de  $10^{-2}$ - $10^6$ Hz a montré que le processus de relaxation suit la loi de Vogel-Fülcher [16] mais devient presque indépendant de la température en dessous de  $T_m$  indiquant le début de l'état qu'ils ont appelé « quasi ferroélectrique ». Le paradoxe peut être compris en tenant compte des inhomogénéités à l'échelle nanométrique de la structure quasi ferroélectrique dans lequel les régions ferroélectriques séparées par des régions riches en Zr non polaires sont trop petites pour être détectées à partir des profils des pics de DRX [17].

### **Double substitution en site A : Les compositions $(Ba_{1-x}A_{x/3}A'_{x/3})(Ti_{1-y}Zr_y)O_3$ (A = Y, A' = Bi) (x=0.025 . 0.050 et y=0.35)**

A température ambiante, quel que soit y nous obtenons des phases pures pour x = 0,025.

Malgré le choix optimal des conditions d'élaboration, dès la valeur x = 0,050, quelques raies d'impuretés apparaissent à côté des pics de Bragg.

La figure III.2 présente les diffractogrammes obtenus dans le cas des compositions  $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{1-y}Zr_y)$  pour x = 0,025 (a) ; 0,050 (b) et y=0.35.

La présence de ces impuretés peut être attribuée au fait que ces terres rares présentent une faible solubilité en site A des pérovskites et qu'ils sont généralement susceptibles de s'incorporer simultanément en site A et B. Dans tous les cas, les diffractogrammes sont caractéristiques de la phase cubique de BaTiO<sub>3</sub>.

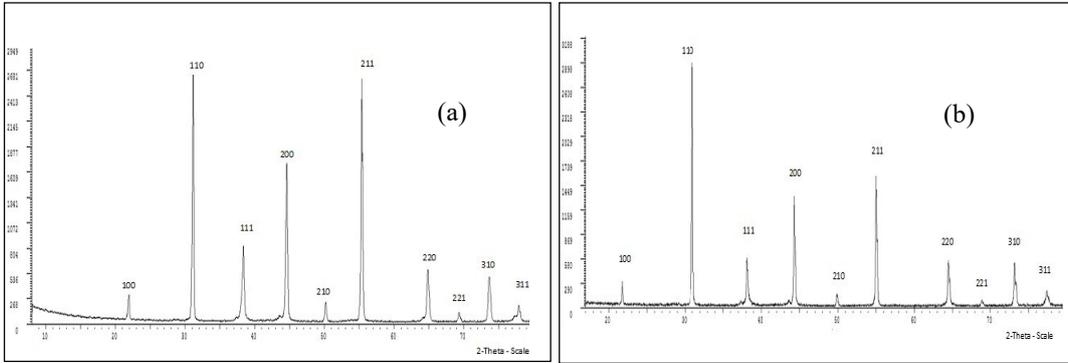
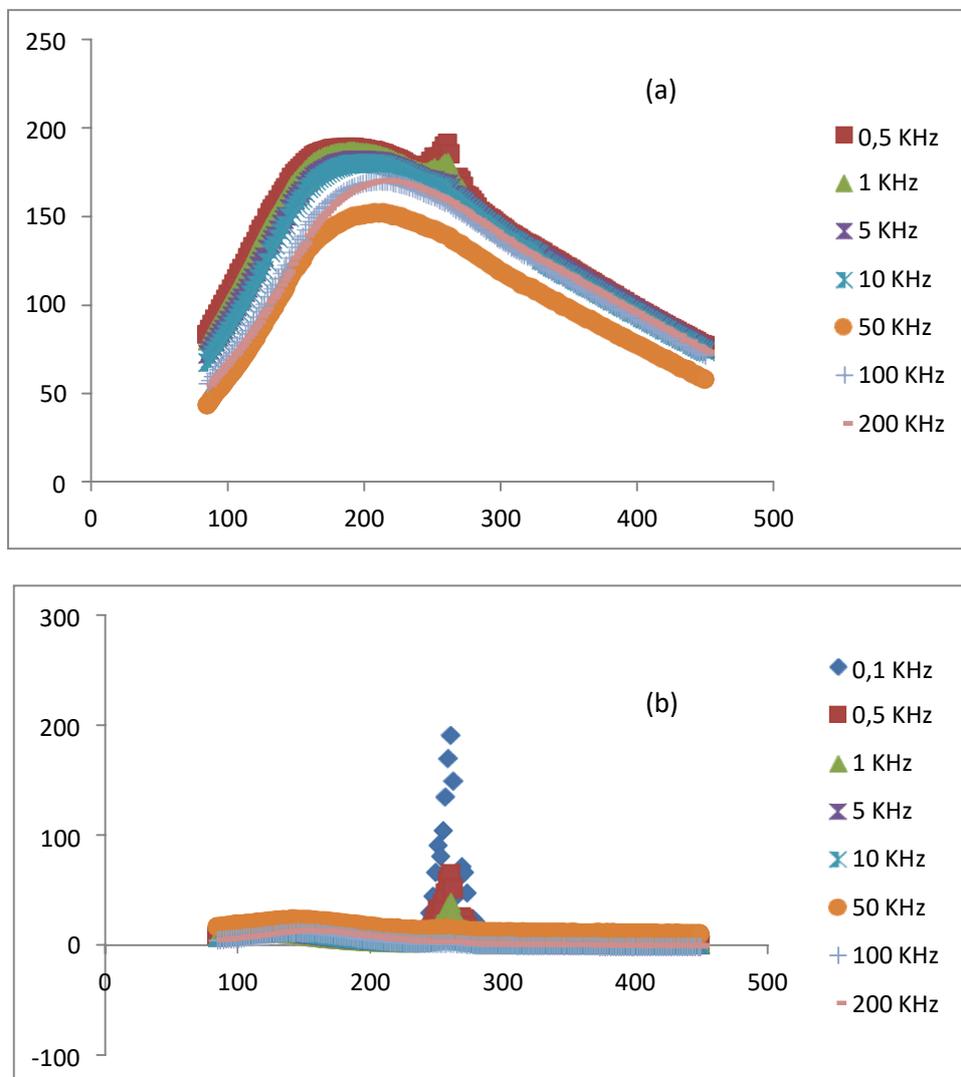


Figure III.2. Spectres de diffraction des rayons X du composé Ba<sub>1-x</sub>Y<sub>x/3</sub>Bi<sub>x/3</sub>(Ti<sub>0,65</sub>Zr<sub>0,35</sub>)O<sub>3</sub> (x=0,025 (a) et x=0,050 (b)).

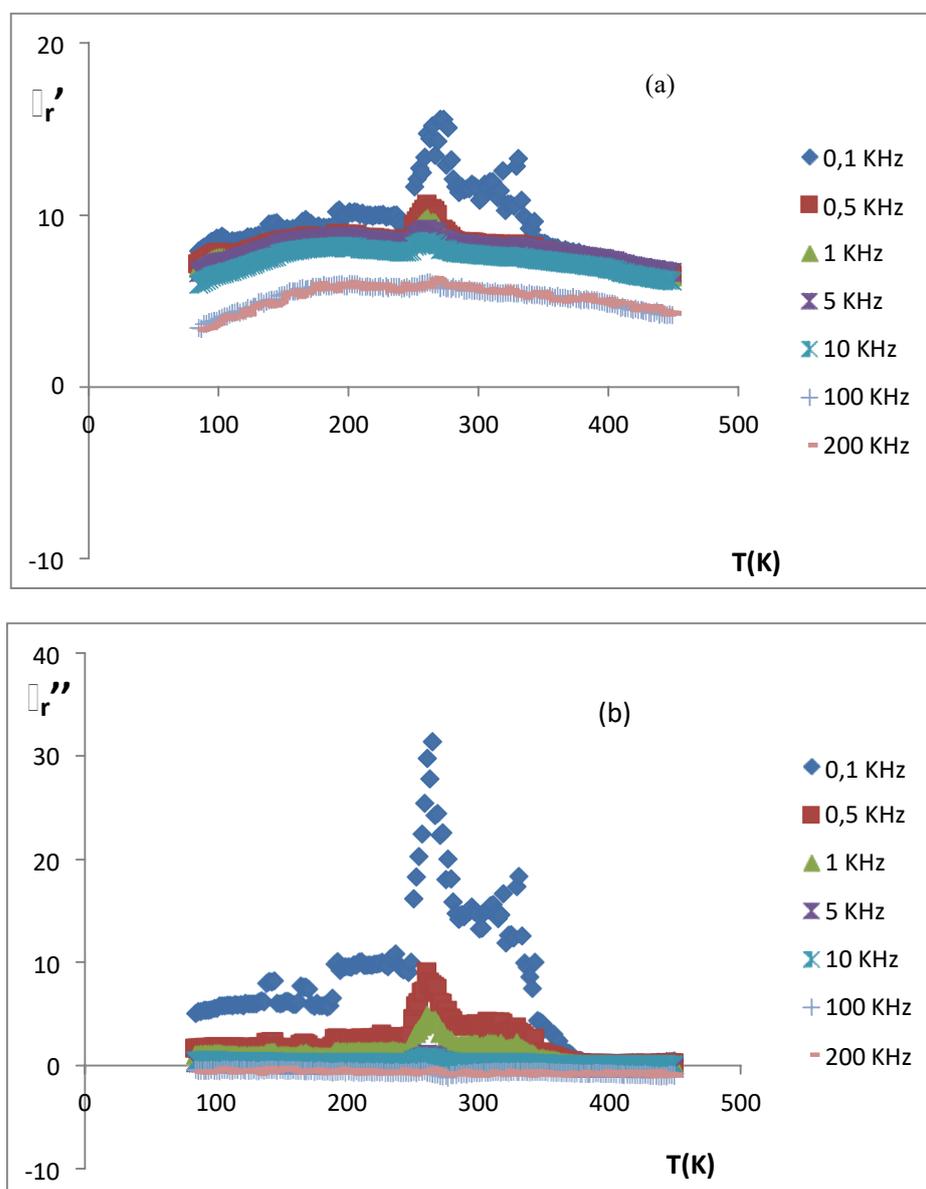
Les mesures diélectriques effectuées sur ces compositions révèlent un comportement assez particulier (figures III.3 et III.4):

- les transitions de phase sont très diffuses.
- les valeurs des permittivités sont très faibles.
- Le maximum de permittivité s'étend sur une large gamme de température (incluant le domaine de la température ambiante).
- La qualité des figures est médiocre en raison de perturbations apparaissant en particulier sur les courbes de permittivité relative imaginaire.

Il faut noter que les mêmes résultats ont été observés antérieurement sur des matériaux à base de bismuth comme substituant. A l'heure actuelle, nous ne connaissons pas les causes exactes de ces perturbations. Cependant, nous pensons qu'ils seraient liés à la volatilité de l'oxyde de bismuth. Celui-ci contribuerait à une mauvaise densification lors de l'élaboration des céramiques. En effet, nous avons toujours remarqué que les composés au bismuth sont moins denses que les autres composés ce qui donne lieu à des céramiques peu compactes. Cette faible compacité influencerait sur leurs propriétés ferroélectriques. Ceci dit, le remplacement de Ba<sup>2+</sup> par Bi<sup>3+</sup> conduit à des valeurs de T<sub>m</sub> proches de l'ambiante. En outre, la transition de phase ferroélectrique-paraélectrique est diffuse [18, 19].



**Fig. III-3:** Variation thermique de  $\epsilon_r'$  (a) et  $\epsilon_r''$  (b) pour une céramique de composition  $Ba_{1-x}Y_{x/3}Bi_{x/3}(Ti_{0,65}Zr_{0,35})O_3$  ( $x=0,025$ ).



**Fig. III-4:** Variation thermique de  $\epsilon_r'$  (a) et  $\epsilon_r''$  (b) pour une céramique de composition  $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_{x/3}\text{Bi}_{x/3}(\text{Ti}_{0,65}\text{Zr}_{0,35})\text{O}_3$  ( $x=0,050$ ).

#### IV. Conclusions

Diverses compositions dérivées de  $\text{BaTiO}_3$  et de formule  $\text{Ba}_{1-x}\text{Y}_{x/3}\text{Bi}_{x/3}(\text{Ti}_{0,65}\text{Zr}_{0,35})\text{O}_3$  ont été préparées et les céramiques correspondantes ont été obtenues par frittage à haute température. Cette étude a été menée en opérant par des substitutions homovalentes en site octaédrique (B) et hétérovalentes en site dodécaédrique (A) de la pérovskite  $\text{BaTiO}_3$ .

L'étude radiocristallographique sur poudre à température ambiante a permis de contrôler la pureté de différentes solutions solides et de limiter leurs domaines d'existence. A température les réflexions relatives aux phases présentant un comportement ferroélectrique relaxeur s'indexent dans la symétrie cubique

L'étude diélectrique dans un large domaine de température et de fréquence a mis en évidence un comportement est de type ferroélectrique relaxeur avec des transitions de phase très diffuse dans le cas des matériaux contenant du bismuth.

Les compositions étudiées présentent un intérêt du fait que les céramiques correspondantes possèdent des propriétés ferroélectriques relaxeurs. En outre, ces compositions préservent l'environnement et par conséquent peuvent remplacer les matériaux à base de plomb actuellement utilisés dans divers appareillages électroniques. Cependant, ces composés ont des températures  $T_m$  relativement basses.

En perspective, les études que nous prévoyons s'orienteront vers l'obtention de diélectriques de forte permittivité, pouvant être frittées à basse température, présentant des températures  $T_m$  voisines de l'ambiante et des caractéristiques relaxeurs optimales.

## References

- [1] Cross L.E. *Ferroelectrics*, 151(1994)305.
- [2] Ravez J. et Simon A., *J. Korean Phys.* 32(1998) S 955
- [3] F. Bahri, A. Simon, H. Khemakhem, J. Ravez, Classical or relaxor ferroelectric behaviour of ceramics with composition  $Ba_{1-x}Bi_{2x/3}TiO_3$ , *Phys. Status Solid (a)*, 184, (2001)459-464
- [4] F. Bahri, H. Khemakhem, A. Simon, R. Von der Mühl et J. Ravez, dielectric and pyroelectric studies on the  $Ba_{1-3a}Bi_{2a}TiO_3$  classical and relaxor ferroelectric ceramics, *Solid State Sci.*, 5, 9 (2003)1235-1238
- [5] J. Zhi, A. Chen, Y. Zhi, P.M. Vilarinho, and J.L. Baptista, Dielectric properties of  $Ba(Ti_{1-y}Y_y)O_3$ , *J. Appl. Phys.*, 84, 2 (1998)983-986
- [6] M. Mcquarrie et F.W. Behnke, Structural and dielectric studies in the system  $(Ba, Ca)(Ti, Zr)O_3$ , *J. Amer. Ceram. Soc.* 27, 11(1954) 539-543.
- [7] T.N. Verbitskaia, G.S. Zhdanov, Lu N. Venevtsev et S.P. Soloviev, Electrical and X-ray Diffraction Studies of the  $BaTiO_3$ - $BaZrO_3$  System, *Sov. Phys. Crystallogr.*, 3 (1958)182-192
- [8] D. Hennings, A. Schnell et G. Simon, Diffuse Ferroelectric Phase Transitions in  $Ba(Ti_{1-y}Zr_y)O_3$  Ceramics, *J. Amer. Ceram. Soc.* 65, 11 (1982) 539-544)
- [9] S. Kazaoui et J. Ravez, dielectric relaxation in  $Ba(Ti_{0.8}Zr_{0.2}O_3)$  ceramics prepared from sol-gel and solid state reaction powders, *J. Mater. Sci.* 28, 5 (1993) 1211-1219
- [10] J. Ravez et A. Simon, A. Temperature and frequency dielectric response of ferroelectric ceramics with composition  $Ba(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$ , *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.*, 34, 11(1997) 1199-1209
- [11] Zhi Yu, Chen Ang, Ruyan Guo, and A. S. Bhalla, Dielectric properties and high tunability of  $Ba(Ti_{0.7}Zr_{0.3})O_3$  ceramics under dc electric field, *Appl. Phys. Lett.*, 81, 7 (2002)1285-1287
- [12] R. Farhi, M. El Marsi, A. Simon and J. Ravez, A Raman and dielectric study of ferroelectric  $Ba(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$  ceramics, *Eur. Phys. J. B9*,(1999)599-604
- [13] P. S. Dobal, A. Dixit, R. S. Katiyar, Z. Yu, R. Guo, and A. S. Bhalla, Micro-Raman scattering and dielectric investigations of phase transition behaviour in the  $BaTiO_3$ - $BaZrO_3$  system, *J. Appl. Phys.*, 89, 12 (2001)8085-8091
- [14] X. G. Tang, K.H Chew et H.L.W. Chan, Diffuse transition and dielectric tunability of  $Ba(Ti_{1-y}Zr_y)O_3$  relaxor ferroelectric ceramics, *Acta materialia*, 52, 17(2004)5177-5183
- [15] X. G. Tang, X.X. Wang et K.H Chew, Relaxor behaviour of  $(Ba,Sr)(Zr,Ti)O_3$  ferroelectric ceramics, *Solid state Communications*, 136, 2 (2005)89-93.
- [16] S.G. Fülcher, Analysis of recent measurements of the viscosity of glasses, *J. Amer. Ceram. Soc.*, 8,6 (1925)339-355
- [17] A.A. Bokov, M Maglione and Z-G Ye, Quasi-ferroelectric state in  $Ba(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$  relaxor: dielectric spectroscopy evidence, *J. Phys.: Condens. Matter* 19 (2007) 092001-092010
- [18]- F. Bahri, A. Simon, H. Khemakhem et J. Ravez, *Phys. Status Solid (a)*, 184, 459, (2001)
- [19]- F. Bahri, H. Khemakhem, A. Simon, R. Von der Mühl et J. Ravez, *Solid State Sci.*, 5, 1235,(2003)

# Conception d'un système aquaponique avec une optimisation énergétique intégrée

Dorra Cherif<sup>#1</sup>, Salmen CHEHAIBI<sup>#2</sup>, Salwa Bouadila<sup>#3</sup>, AmenAllah Guizani<sup>#4</sup>

# Centre de Recherches et des Technologies de l'Energie, Laboratoire des Procédés Thermiques- Technopôle de Borj Cédria BP: 95, Hammam Lif, Ben Arous, Tunisia

Email 1 - [cherifdorra11@gmail.com](mailto:cherifdorra11@gmail.com) Email

2- [chehaibisalmen@gmail.com](mailto:chehaibisalmen@gmail.com) Email 3 -

[salwa.bouadila@crten.rnrt.tn](mailto:salwa.bouadila@crten.rnrt.tn) Email 4

[amenallah.guizani@crten.mesrs.tn](mailto:amenallah.guizani@crten.mesrs.tn)

## Introduction :

L'aquaponie est une méthode innovante et durable de production alimentaire qui combine l'aquaculture (l'élevage de poissons) et l'hydroponie (la culture de plantes hors sol) [1]. Dans un système aquaponique, les déchets produits par les poissons fournissent des éléments nutritifs essentiels aux plantes, tandis que les plantes filtrent et purifient l'eau pour les poissons [2]. Cette symbiose entre les poissons et les plantes crée un écosystème équilibré et auto-suffisant, nécessitant moins d'eau et d'engrais que les méthodes agricoles traditionnelles. De plus, l'aquaponie peut être pratiquée dans des espaces restreints, ce qui en fait une solution viable pour la production alimentaire urbaine [3]. On combinant cette approche avec des stratégies d'optimisation énergétique pour économiser l'énergie et en adoptant les énergies renouvelables comme source durable, les systèmes aquaponique peuvent être plus éco énergétiques et efficaces [4]. D'autre part, l'hydroponie est une technique offre plusieurs avantages, notamment une croissance des plantes plus rapide, un contrôle précis des nutriments, et une utilisation efficace de l'eau et de l'espace [5]. En supprimant le besoin de sol, l'hydroponie permet une production de cultures tout au long de l'année et dans des environnements où la terre arable est limitée. De plus, elle réduit le risque de maladies du sol et offre un contrôle accru sur les conditions environnementales, favorisant ainsi des récoltes de qualité supérieure. En combinant l'hydroponie avec des technologies d'éclairage LED et des systèmes d'automatisation, il est possible de créer des fermes verticales et des serres urbaines hautement productives [6], contribuant ainsi à répondre aux défis croissants de l'approvisionnement alimentaire dans un contexte de population mondiale en expansion et de pression sur les ressources naturelles.

Parmi les techniques les plus couramment utilisées, on trouve la méthode de culture en eau profonde (Deep Water Culture), où les racines des plantes sont suspendues dans une solution

nutritive oxygénée. La culture en mèche (Wick System) utilise une mèche pour transporter la solution nutritive jusqu'aux racines des plantes. Le système de culture en goutte à goutte (Drip System) fournit aux plantes une solution nutritive à intervalles réguliers via un système de goutteurs. En outre, il existe des systèmes de tour de culture (Vertical Tower) qui permettent de cultiver des plantes sur plusieurs niveaux verticaux, maximisant ainsi l'utilisation de l'espace. Ces techniques d'hydroponie offrent un contrôle précis sur les nutriments, l'eau et les conditions environnementales [7]. Nous citons, la méthode NFT (Nutrient Film Technique) est souvent citée. Elle implique un flux continu d'une fine couche d'eau contenant des nutriments le long des racines des plantes [8]. Cette méthode a été choisie pour notre serre hydroponique située au Laboratoire des Procédés Thermiques (LPT) du CRTEn. Cette méthode s'est avérée être la plus efficace pour notre configuration, avec trois niveaux et huit tubes répartis sur chaque niveau.

Il est essentiel d'optimiser les dimensions de chaque composante d'un système aquaponique pour assurer le bon fonctionnement ce qui implique la nécessité d'ajuster avec précision les dimensions de chaque composante. Cela englobe notamment le dimensionnement approprié du réservoir aquatique, du système de filtration et de l'espace dédié à la croissance des plantes [9], ce qui constitue notre principal objectif de travail.

## Résultats :

Nous avons dimensionné notre système aquaponique en fonction de notre serre hydroponique préexistante sur le site. Les dimensions de chaque composant mentionné précédemment sont présentées dans le dans le [Tableau 1](#) :

<b>Volume du Bac de poisson</b>	1000 litre	
<b>Biomasse de poisson adéquate</b>	20 kg de Tilapia	Densité d'élevage : 20 kg / 1000 litre
<b>Nombre de Tilapia nécessaire</b>	65 à 133 alevins	Poids moyen : 35gr
<b>Quantité d'aliment nécessaire</b>	170 gr d'aliment/jour	2% de la biomasse totale
<b>Surface végétale nécessaire pour les plantes à feuille</b>	3.5 m <sup>2</sup>	40 à 50 g d'aliment/ m <sup>2</sup>
<b>Nombre de plante à cultivé dans la surface nécessaire</b>	135 plantes	20 à 25 plantes / m <sup>2</sup>
<b>Volume du filtre mécanique</b>	350 litres	10 à 30 % du volume d'eau totale
<b>Volume du filtre biologique</b>	200 litre de bille d'argile	1l de bille d'argile /1gr aliment

**Tab-1 : Dimensionnement de notre système aquaponique**

## Optimisation Energétique de Notre Système :

Nous avons mené une étude énergétique approfondie dans notre système aquaponique, visant à analyser en détail les besoins électriques de notre serre hydroponique ainsi que d'une installation hybride PV/batterie [Figure 1](#). Cette approche combine les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque avec les capacités de stockage d'énergie, en se focalisant sur les performances et l'efficacité du système. Nous avons élaboré une conception détaillée pour cette installation hybride PV/batterie, décrivant en profondeur les composants clés tels que les panneaux solaires, les onduleurs, les batteries et les dispositifs de gestion de l'énergie. Nous avons également examiné les critères de sélection des composants et les aspects de conception afin d'améliorer les performances de notre système aquaponie Enfin, nous avons évalué les performances de l'installation hybride PV/batterie en termes d'efficacité énergétique, de production d'électricité, d'utilisation de la batterie et de stabilité du système.



Figure 1 : Systèmes solaires utilisés pour le conditionnement et l'électrification de notre système

Pour mettre en place un système photovoltaïque efficace pour alimenter une serre hydroponique, il est crucial de prendre en compte divers aspects. Cela comprend l'analyse de l'exposition au soleil sur toute l'année, la quantité d'électricité requise par la serre annuellement, ainsi que la disponibilité d'espace pour l'installation des panneaux solaires, incluant leur orientation et inclinaison. En se basant sur ces critères, le processus de conception doit inclure l'évaluation des besoins énergétiques, le dimensionnement des

panneaux solaires, le calcul de la capacité de stockage nécessaire, et le choix des convertisseurs adaptés (Singo, 2018).

L'énergie produite par ce système ( $E_{p\ an}$  exprimé en  $KWh\ an$ )/sera influencée par ces facteurs ainsi que par le rendement des panneaux solaires, parmi d'autres éléments

$$E_{p/an} = \frac{E_{c\ \mu n}}{k} \tag{Eq.1}$$

Avec :

$E_{c\ \mu n}$  : L'énergie annuelle consommée  $KWh\ \mu n$

$k$  : Une constante qui dépend de la situation géographique, elle est généralement comprise entre 0,65 et 0,75.

La puissance de l'installation photovoltaïque ( $P_{pv}$  exprimée en  $KWc$ ) est déterminée à l'aide de l'équation suivante.

$P_{pv} = \frac{E_{p\ /an}}{I_{tot\ /an}} \tag{Eq.2}$
---

$I_{tot\ an}$  ( $KWh\ an$ ) : L'irradiation annuelle disponible à l'emplacement de la centrale photovoltaïque.

D'après les équations (Eq.1) et (Eq.2) les besoins électrique de notre système correspondent à une puissance crête  $P_{pv}=2.1\ KWc$

La consommation électrique de notre système aquaponique fluctue en fonction des phases de croissance des cultures, de nos besoins spécifiques, ainsi que du fonctionnement des équipements. La figure II.3(a) met en évidence l'évolution mensuelle cumulative de cette consommation électrique, détaillant les activités telles que l'irrigation, la ventilation, l'éclairage et le contrôle thermique. En moyenne, notre système utilise entre 25 et 50 kWh d'électricité. Par exemple, le système de contrôle thermique consomme entre 15 et 30 kWh par jour, avec une demande plus élevée pendant les périodes chaudes lorsque la pompe à chaleur est plus sollicitée. La ventilation maintient une consommation électrique relativement stable, aux alentours de 9 kWh, assurant ainsi une circulation uniforme de l'air à l'intérieur de la serre et évitant les problèmes de stratification tout au long de l'année. Les systèmes

d'irrigation et d'éclairage contribuent de manière marginale à la consommation totale d'électricité, représentant entre 4% et 10%, comme le montre la [Figure 3](#) et la [Figure 4](#).

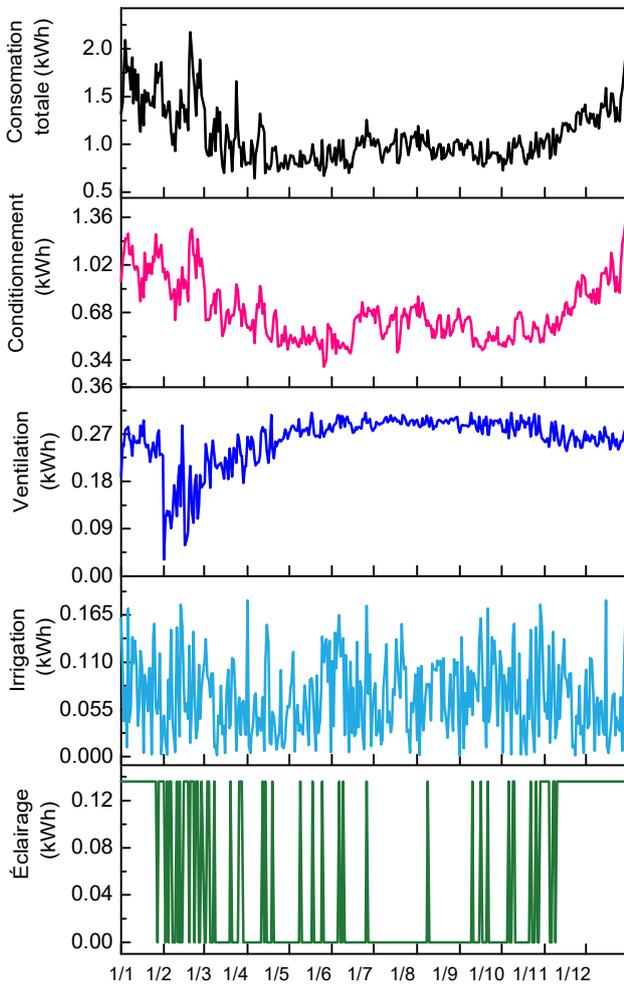


Figure2: Puissance utilisée pour les opérations dans notre système

Équipement	Unité	Puissance (W)
Aérateur	2	60
Variateur de vitesse	1	900
Ventilateur type 1	2	250
Ventilateur type 2	1	50
Contrôleur d'irrigation	1	10
Pompe à eau	1	80
Pompe centrifuge	1	370
Lampe	8	16
Chaine d'acquisition	1	20

Figure3: Equipements desystème Aquaponie

La [Figure 4](#) illustre l'évolution de la consommation électrique cumulée de notre système pour chaque jour de chaque mois de l'année, avec des valeurs variant de 0,75 à 2 kWh. Concernant l'irrigation, sa consommation électrique présente une fluctuation tout au long de l'année, oscillant entre 25 et 165 Wh. Les systèmes d'irrigation et d'éclairage consomment relativement peu d'électricité par rapport à la consommation totale de la serre, ne dépassant pas 0,16 kWh. Les principaux consommateurs d'électricité sont les systèmes de conditionnement thermique.

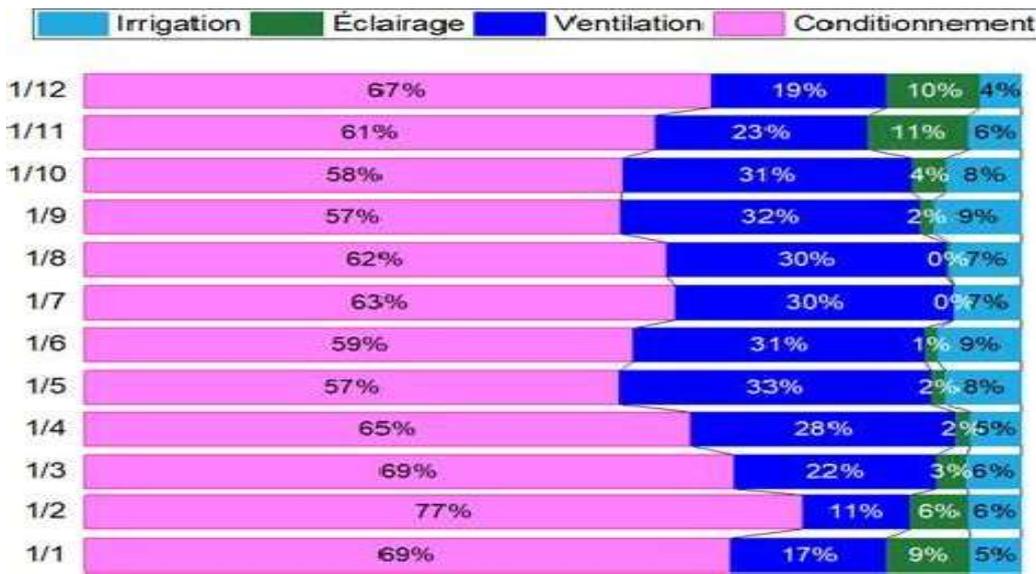


Figure 4 : Consommation de l'énergie électrique de la serre et (b) Pourcentage de la consommation de l'énergie électrique des équipements de la serre

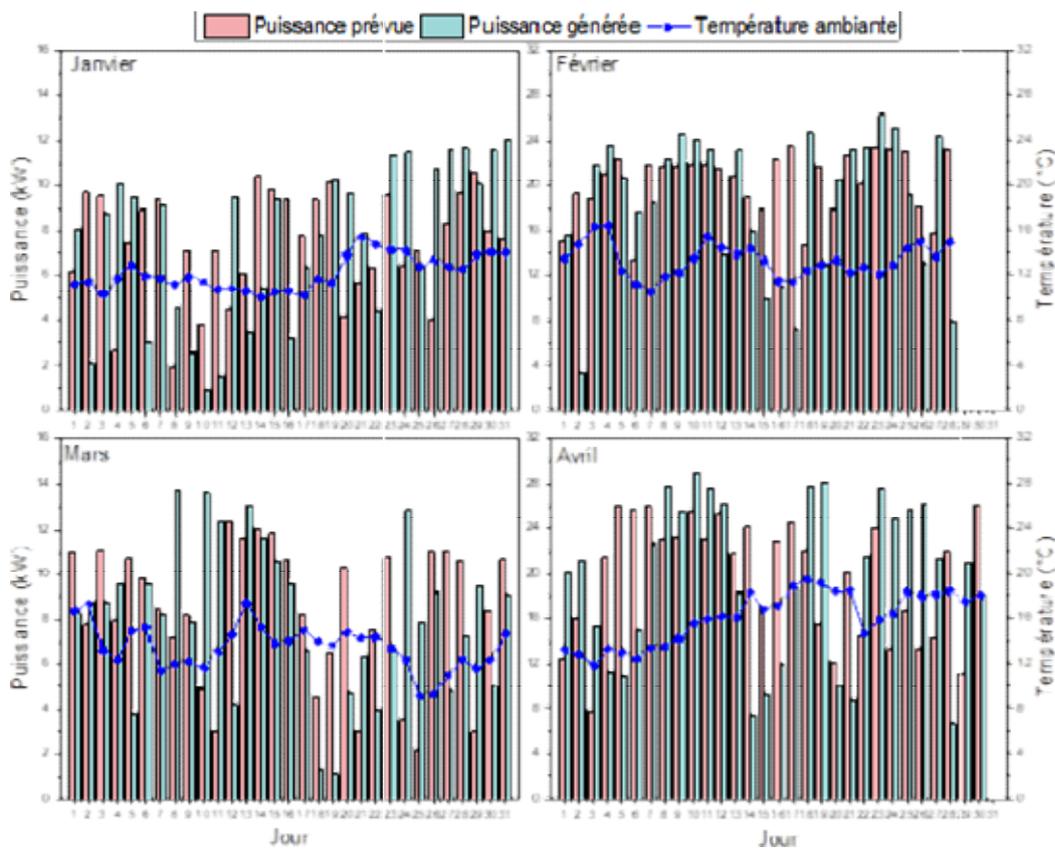


Figure 5 : Janvier, février, mars et avril

Les informations concernant la puissance photovoltaïque et la température ambiante, à la fois mesurées et simulées, sont présentées dans la Figure 5 afin de vérifier la précision du modèle

Matlab/Simulink élaboré dans cette étude. Les résultats illustrent la fiabilité du modèle, avec une légère disparité entre les valeurs mesurées et prédites durant l'hiver, caractérisé par une température ambiante d'environ 16 °C. En revanche, pendant l'été et l'automne, lorsque la température ambiante est plus élevée, les courbes des résultats expérimentaux et numériques sont quasiment indiscernables.

### **Conclusion :**

Cette étude a mis en évidence l'importance des systèmes hybrides PV/batterie en tant que solution énergétique durable. L'analyse détaillée des performances de cette installation souligne son potentiel à répondre aux besoins énergétiques d'une serre hydroponique tout en réduisant son empreinte environnementale. Ces conclusions encouragent l'adoption plus large de l'énergie solaire et du stockage d'énergie à l'échelle mondiale, favorisant ainsi une transition vers une société plus respectueuse de l'environnement et durable. De plus, l'optimisation de chaque composant de notre système aquaponique joue un rôle crucial dans cette démarche. En conclusion, notre système aquaponique est à la fois durable et écologique.

### **Référence :**

- [1] A. K. Verma, M. H. Chandrakant, V. C. John, R. M. Peter, and I. E. John, "Aquaponics as an integrated agri-aquaculture system (IAAS): Emerging trends and future prospects," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 194, p. 122709, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2023.122709.
- [2] I. Ezzahoui, R. A. Abdelouahid, K. Taji, and A. Marzak, "Hydroponic and Aquaponic Farming: Comparative Study Based on Internet of things IoT technologies.," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 191, pp. 499–504, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.07.064.
- [3] M. M. M. Mahmoud, R. Darwish, and A. M. Bassiuny, "Development of an economic smart aquaponic system based on IoT," *J. Eng. Res.*, no. August, 2023, doi: 10.1016/j.jer.2023.08.024.
- [4] A. Udovichenko, B. A. Fleck, T. Weis, and L. Zhong, "Framework for design and optimization of a retrofitted light industrial space with a

- renewable energy-assisted hydroponics facility in a rural northern canadian community,” *J. Build. Eng.*, vol. 37, no. October 2020, p. 102160, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102160.
- [5] P. Dumont, “Du céleri pour épurer les eaux,” *Biofutur*, vol. 1999, no. 188, pp. 40–43, Apr. 1999, doi: 10.1016/S0294-3506(99)80097-0.
- [6] T. M. Montero, E. M. Mollá, R. M. Esteban, and F. J. López-Andréu, “Quality attributes of strawberry during ripening,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 65, no. 4, pp. 239–250, Aug. 1996, doi: 10.1016/0304-4238(96)00892-8.
- [7] S. A. Gillani, R. Abbasi, P. Martinez, and R. Ahmad, “Comparison of Energy-use Efficiency for Lettuce Plantation under Nutrient Film Technique and Deep-Water Culture Hydroponic Systems,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 217, pp. 11–19, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.PROCS.2022.12.197.
- [8] S. Smoleń, I. Kowalska, and W. Sady, “Assessment of biofortification with iodine and selenium of lettuce cultivated in the NFT hydroponic system,” *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 166, pp. 9–16, Feb. 2014, doi: 10.1016/J.SCIENTA.2013.11.011.
- [9] M. Çelik, A. Diler, and A. Küçükgülmez, “A comparison of the proximate compositions and fatty acid profiles of zander (*Sander lucioperca*) from two different regions and climatic conditions,” *Food Chem.*, vol. 92, no. 4, pp. 637–641, Oct. 2005, doi: 10.1016/J.FOODCHEM.2004.08.026.

# Estimation des paramètres de la machine asynchrone monophasée par le filtre de kalman étendu

Samir Arfa<sup>#1</sup>, AblaAbla Khiareddine<sup>#2</sup>

<sup>#1</sup>: ISET de Kairouan – Campus Universitaire; Adresse: · 3 199 Raccada – Kairouan, Tunisia.

<sup>#2</sup>: ISET de Sousse – Cité Erriadh - B.P 135 - 4023 Sousse, Tunisia.

**Abstract**—La connaissance avec précision des paramètres du modèle de la machine asynchrone est une étape nécessaire pour pouvoir implanter des algorithmes de commandes performantes. De plus, dans les variateurs de vitesse pour les machines à induction, la sensibilité de la commande étant relativement importante en fonction des variations de la résistance rotorique, il a semblé tout naturel de se pencher sur son identification en ligne. L’objectif de ce papier est d’estimer les paramètres de la machine pour assurer la robustesse de la commande. Dans ce cadre, la méthode de filtre de Kalman qui se présente sous la forme d’un ensemble d’équations différentielles ou récurrentes peut donner de bons résultats en faisant un choix judicieux des conditions initiales qui conditionne le bon fonctionnement du filtre. Les résultats obtenus, montrent l’efficacité du filtre de Kalman étendu. Ils se caractérisent par une erreur d’estimation très petite.

**Keywords**—SPIM, Filtre de Kalman étendu, estimation des paramètres, résistance rotorique, erreur, s-fonction.

## I. INTRODUCTION

Ce travail consiste à mettre en œuvre les méthodes d’identification par le filtre de Kalman pour estimer les paramètres d’un modèle de connaissance avec un minimum de mesures à l’entrée et à la sortie d’un dispositif équipé d’une machine à induction. On s’intéresse aux méthodes récursives par rapport au temps, c.à.d. celles qui permettent de réactualiser les paramètres au fur et à mesure que le système fonctionne et évolue dans son environnement. La détermination des paramètres électriques et mécaniques d’une machine à induction est réalisée à partir de la simulation des tensions, des courants statoriques et de la vitesse de la rotation de la partie de commande.

## II. MODÈLE DE SPIM

Le modèle de SPIM (Single Phase Induction Motor) est exprimé en cadre de référence stationnaire de « d-q » par:

$$V_{sd} = R_{sd} i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + M_{srd} \frac{di_{rd}}{dt} \quad (1)$$

$$V_{sq} = R_{sq} i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + M_{srq} \frac{di_{rq}}{dt} \quad (2)$$

$$0 = R_{rd} i_{rd} + L_{rd} \frac{di_{rd}}{dt} + M_{srd} \frac{di_{sd}}{dt} + \omega (L_{rr} i_{rq} + M_{srq} i_{sq}) \quad (3)$$

$$0 = R_{rq} i_{rq} + L_{rq} \frac{di_{rq}}{dt} + M_{srq} \frac{di_{sq}}{dt} - \omega (L_{rr} i_{rd} + M_{srd} i_{sd}) \quad (4)$$

## III. APPLICATION DU FILTRE DE KALMAN À LA MACHINE ASYNCHRONE

Le filtre de Kalman est un reconstruteur d’état dans un environnement stochastique qui permet de reconstituer les états d’un système perturbé en utilisant des mesures (incomplètes, indirectes, intermittentes, bruitées). C’est un outil mathématique utilisé aussi bien pour l’estimation de l’état que l’estimation des paramètres des systèmes linéaires et non linéaires à partir de la représentation des systèmes dans l’espace d’état. [1], [9]

Le développement de l'algorithme du filtre de Kalman nécessite le modèle d'état dynamique, en s'appuyant seulement sur les équations électriques de la machine, pour l'estimation conjointe de l'état des paramètres. La technique consiste à considérer un vecteur d'état de dimension supérieure incluant les paramètres à estimer.

*A. Modèle d'état de correspondant à l'estimation de la résistance rotorique  $R_r$*

L'application du filtre de Kalman aux systèmes linéaires multivariables est basée sur la notion d'équation d'état suivante [7]:

$$\begin{cases} \dot{X} = [A][X] + [B][U] \\ [Y] = [C][X] \end{cases} \quad (5)$$

❖ **Modèle d'état correspondant :**

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ R_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}\omega_r & a_{13}R_r & a_{14}\omega_r & 0 \\ a_{21}\omega_r & a_{22} & a_{23}\omega_r & a_{24}R_r & 0 \\ a_{31} & a_{32}\omega_r & a_{33}R_r & a_{34}\omega_r & 0 \\ a_{41}\omega_r & a_{42} & a_{43}\omega_r & a_{44}R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{22} \\ b_{31} & 0 \\ 0 & b_{42} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} \quad (6)$$

❖ **Equation de sortie:**

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ R_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

Avec:  $[X] = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq} \ R_r]^T$ ,  $[U] = [v_{sd} \ v_{sq}]^T$  et  $[Y] = [i_{sd} \ i_{sq}]^T$ ;

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{1}{\tau_a \sigma_a}; a_{12} = -\frac{M_{srq} M_{srq}}{L_r L_{sd} \sigma_a}; a_{13} = -\frac{M_{srd}}{L_r L_{sd} \sigma_d}; a_{14} = -\frac{M_{srd}}{L_{sd} \sigma_d} \\ a_{21} &= -\frac{M_{srd} M_{srq}}{L_r L_{sq} \sigma_q}; a_{22} = -\frac{1}{\tau_q \sigma_q}; a_{23} = -\frac{M_{srq}}{L_{sq} \sigma_q}; a_{24} = -\frac{M_{srq}}{L_r L_{sq} \sigma_q} \\ a_{31} &= -\frac{M_{srd}}{L_r \tau_d \sigma_d}; a_{32} = -\frac{M_{srq}}{L_r \sigma_d}; a_{33} = -\frac{1}{L_r \sigma_d}; a_{34} = -\frac{1}{\sigma_d}; a_{41} = \frac{M_{srd}}{L_r \sigma_a}; a_{42} = \frac{M_{srq}}{L_r \tau_a \sigma_a}; a_{43} = \frac{1}{\sigma_a} \\ a_{44} &= -\frac{1}{L_r \sigma_q}; b_{11} = \frac{1}{L_{sd} \sigma_d}; b_{22} = \frac{1}{L_{sq} \sigma_q}; h_{s1} = \frac{M_{srd}}{L_r L_{sd} \sigma_d} \text{ et } h_{s2} = \frac{M_{srq}}{L_r L_{sq} \sigma_q} \end{aligned}$$

*B. Discrétisation du modèle de SPIM*

L'élaboration du filtre de Kalman est basée sur des équations mathématiques discrètes, alors que le modèle de la machine est continu. Donc, le passage du modèle continu au modèle discret se fait par discrétisation à l'aide de la méthode d'Euler en appliquant un développement d'ordre 1 pour une période d'échantillonnage constante [5], [10] [6].

*C. Modèle d'état étendu de la machine asynchrone monophasée correspondant à l'estimation de la résistance rotorique  $R_r$  :*

Le modèle (6) adopté à l'estimation de la résistance rotorique  $R_r$  est un modèle non-linéaire [1], [2].

$$\begin{cases} X(k+1) = f(X(k), U(k), k) \\ Y(k+1) = C(k)X(k) \end{cases} \quad (8)$$

Pour:

$$f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5]^T \quad (9)$$

Que l'on peut encore écrire :

$$f = \begin{cases} f_1 = i_{sd}(k) + T[a_{11}i_{sd}(k) + a_{12}\omega_r(k)i_{sq}(k) + a_{13}R_r(k)i_{rd}(k) + \\ \quad a_{14}\omega_r(k)i_{rq}(k) + b_{11}v_{sd}(k)] \\ f_2 = i_{sq}(k) + T[a_{21}\omega_r(k)i_{sd}(k) + a_{22}i_{sq}(k) + a_{23}\omega_r(k)i_{rd}(k) + \\ \quad a_{24}R_r(k)i_{rq}(k) + b_{22}v_{sq}(k)] \\ f_3 = i_{rd}(k) + T[a_{31}i_{sd}(k) + a_{32}\omega_r(k)i_{sq}(k) + a_{33}R_r(k)i_{rd}(k) + \\ \quad a_{34}\omega_r(k)i_{rq}(k) + b_{31}v_{sd}(k)] \\ f_4 = i_{rq}(k) + T[a_{41}\omega_r(k)i_{sd}(k) + a_{42}i_{sq}(k) + a_{43}\omega_r(k)i_{rd}(k) + \\ \quad a_{44}R_r(k)i_{rq}(k) + b_{42}v_{sd}(k)] \\ f_5 = R_r(k) \end{cases}$$

#### D. Procédure de linéarisation

L'application du filtre de Kalman à la machine asynchrone aboutit à un système modélisé par des équations d'état non-linéaires et c'est ainsi que la matrice de transition  $F(k)$  et l'observation sont des fonctions non-linéaires. Pour la linéarisation, l'algorithme de filtre de Kalman étendu utilise les jacobiens [8], [3], [4], [9].

$$\begin{cases} F(k) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} / x=\hat{x}(k) \\ H(k) = \frac{\partial c(x)}{\partial x} / x=\hat{x}(k) \end{cases} \quad (10)$$

La matrice de linéarisation :

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} / x=\hat{x}(k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial i_{sd}(k)} & \frac{\partial f_1}{\partial i_{sq}(k)} & \frac{\partial f_1}{\partial i_{rd}(k)} & \frac{\partial f_1}{\partial i_{rq}(k)} & \frac{\partial f_1}{\partial R_r(k)} \\ \frac{\partial f_2}{\partial i_{sd}(k)} & \frac{\partial f_2}{\partial i_{sq}(k)} & \frac{\partial f_2}{\partial i_{rd}(k)} & \frac{\partial f_2}{\partial i_{rq}(k)} & \frac{\partial f_2}{\partial R_r(k)} \\ \frac{\partial f_3}{\partial i_{sd}(k)} & \frac{\partial f_3}{\partial i_{sq}(k)} & \frac{\partial f_3}{\partial i_{rd}(k)} & \frac{\partial f_3}{\partial i_{rq}(k)} & \frac{\partial f_3}{\partial R_r(k)} \\ \frac{\partial f_4}{\partial i_{sd}(k)} & \frac{\partial f_4}{\partial i_{sq}(k)} & \frac{\partial f_4}{\partial i_{rd}(k)} & \frac{\partial f_4}{\partial i_{rq}(k)} & \frac{\partial f_4}{\partial R_r(k)} \\ \frac{\partial f_5}{\partial i_{sd}(k)} & \frac{\partial f_5}{\partial i_{sq}(k)} & \frac{\partial f_5}{\partial i_{rd}(k)} & \frac{\partial f_5}{\partial i_{rq}(k)} & \frac{\partial f_5}{\partial R_r(k)} \end{bmatrix}$$

#### E. Modèle stochastique de la machine

Dans un contexte idéal, les mesures effectuées sur un processus ne sont pas entachées d'erreurs et les hypothèses de travail fixées sont parfaites. Cependant, ceci n'est pas toujours conforme avec la réalité. En effet, les sorties mesurées du processus sont accompagnées de perturbations aléatoires, bien que les conditions essentielles de travail soient maintenues constantes. Il est, donc, évident pour remédier à ce problème, de tenir compte de l'environnement stochastique dans lequel évolue le processus. Ceci peut être justifié par les bruits [1], [8] et [9].

$$\begin{cases} X(k+1) = f\{X(k), U(k), k\} + b_{rs}(k) \\ Y(k+1) = C(k)X(k) + b_{rm}(k) \end{cases} \quad (11)$$

$b_{rs}$  : Vecteur de bruit sur le système.

$b_{rm}$  : Vecteur de bruit sur les mesures.

Ces deux vecteurs sont définis par les matrices de covariances supposées indépendantes, blanches non corrélées et de moyenne nulle [9].

$$\begin{cases} E[b_{rs}] = 0 & E[b_{rm}] = 0 \\ E[b_{rs} b_{rs}^T] = Q & E[b_{rm} b_{rm}^T] = R \end{cases}$$

- ❖  $E$  Représente l'opérateur d'espérance mathématique.
- ❖  $Q$  est la covariance de l'erreur du modèle qui traduit la perturbation sur l'état.
- ❖  $R$  est la covariance de l'erreur de mesure qui traduit le bruit de mesure.

F. Choix des matrices de covariance  $Q$  et  $R$

L'une des principales difficultés de la mise en œuvre du filtre de Kalman réside dans le choix des conditions initiales. Ce choix est souvent très délicat, vu que le point critique dans la conception du filtre de Kalman est d'obtenir une bonne évaluation numérique des paramètres du filtre à partir de la connaissance des conditions initiales. [7], [10].

G. Implantation de l'algorithme de filtre de Kalman étendu

Concernant l'implantation, le filtre de Kalman étendu est reconnu par un algorithme qui s'appuie sur un calcul matriciel très compliqué et généralement lourd. Il s'avère donc très difficile de l'implanter en utilisant Simulink. Donc, il est évident de l'employer sous forme d'une s-fonction, représentée par un bloc Simulink, inséré dans le schéma de simulation globale du système [3].

IV. RÉSULTATS D'ESTIMATION DE L'ÉTAT DANS LE CAS D'ESTIMATION DE LA RÉSISTANCE ROTORIQUE  $R_R$

Les résultats de simulations obtenus sont donnés par les figures suivantes:

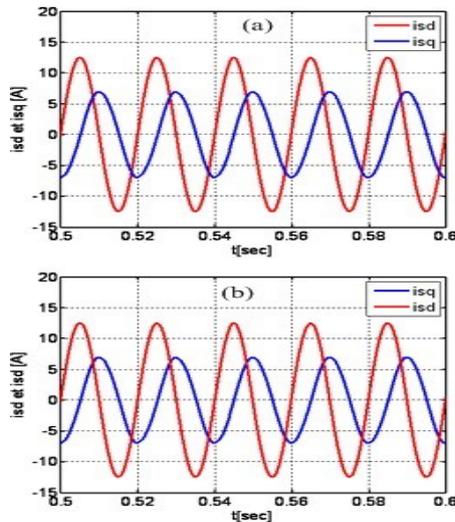


Figure 1 :  
 (a) : Courants statoriques  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  simulés suivant l'axe 'd' et l'axe 'q'.  
 (b) : Courants statoriques  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  estimés suivant l'axe 'd' et l'axe 'q'.

Fig. 1 Courants statoriques

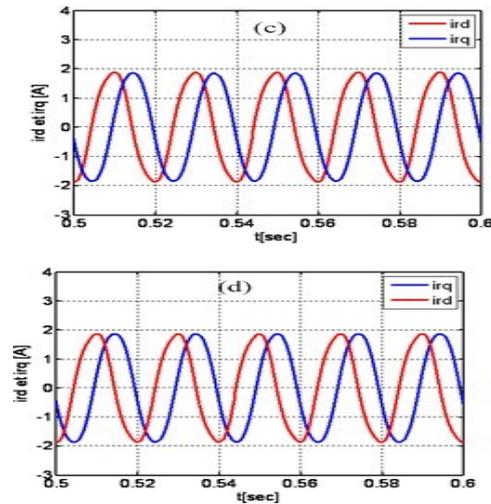


Figure 2 :  
 (c) : Courants rotoriques  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  simulés suivant l'axe 'd' et l'axe 'q'.  
 (d) : Courants rotoriques  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  estimés suivant l'axe 'd' et l'axe 'q'.

Fig. 2 Courants rotoriques

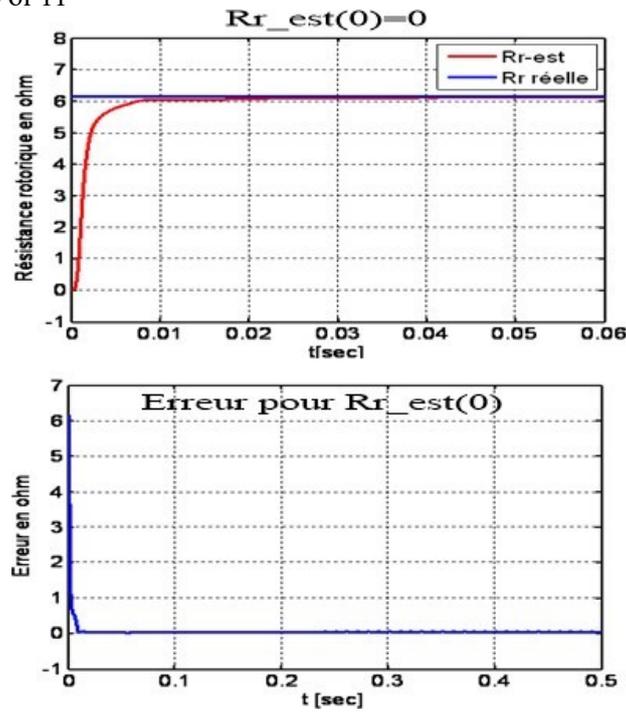


Fig. 3 Résistance rotorique estimée et erreur  $Rr\_est(0)=0$

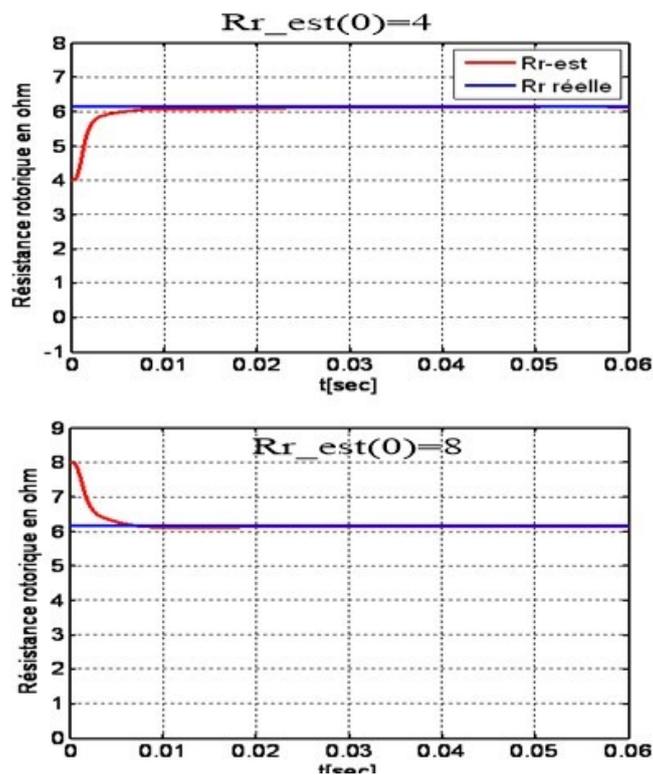


Fig. 4 Résistance rotorique estimée et erreur  $Rr\_est(0)=8 \Omega$

L'analyse des résultats d'estimation montre que:

- La variation des conditions initiales permettent de tester la robustesse de l'estimateur.
- En régime transitoire, les grandeurs estimées par le filtre de Kalman étendu sont légèrement différentes de celles simulées.

- Cependant, en régime permanent l'erreur entre les différentes grandeurs estimées et simulées sont approximativement négligeables.
- Pour les courants statoriques et rotoriques, l'erreur entre les différentes grandeurs estimées et simulées est approximativement nulle.

## V. CONCLUSION

Les méthodes de filtre de Kalman sont très intéressantes pour l'estimation de l'état et des paramètres d'un modèle de connaissance. Elles sont adoptées aussi bien pour des systèmes linéaires que pour des systèmes non linéaires. Les avantages de cette méthode résident dans le fait qu'elle permet d'identifier les paramètres et l'état.

Les résultats obtenus, montrent l'efficacité du filtre de Kalman étendu. Ils se caractérisent par une erreur d'estimation très petite.

TABLE I PARAMETRES DE LA SPIM.

Paramètres de SPIM(p=2)	
Tension nominale	220V
courant nominal	7.58 A
Condensateur	35 $\mu$ F
Résistance de l'enroulement principal	$R_{sd} = 2.40 \Omega$
Résistance de l'enroulement auxiliaire	$R_{sq} = 6.06 \Omega$
Résistance de l'enroulement rotorique	$R_r = 6.0738 \Omega$
Inductance de l'enroulement principal	$L_{sd} = 0.0908 \Omega$
Inductance de l'enroulement auxiliaire	$L_{sq} = 0.1156 \Omega$
Inductance de l'enroulement rotorique	$L_r = 0.0915 \Omega$
Mutuelle inductance suivant l'axe d	$M_{srd} = 0.0828 \Omega$
Mutuelle inductance suivant l'axe q	$M_{srq} = 0.0986 \Omega$
Coefficient de frottement visqueux	$2,026 \cdot 10^{-4} \text{ N.m/rad s}^{-1}$

## NOMENCLATURE AND ABBREVIATIONS

SPIM: Single Phase Induction Motor

$V_{sd}, V_{sq}$  : Tensions statoriques selon l'axe d et q;

$i_{sd}, i_{sq}$  : Courants statoriques selon l'axe d et q;

$i_{rd}, i_{rq}$  : Courants rotoriques selon l'axe d et q;

$R_{sd}, R_{sq}, R_r$  : Résistances statoriques et rotoriques;

$L_{sd}, L_{sq}, L_r$  : inductances statoriques et rotoriques;

$M_{srd}$  et  $M_{srq}$  : Mutuelles d'inductances selon l'axe d et q;

$\sigma_d = 1 - \frac{M_{srd}^2}{L_{sd} L_r}$  : Coefficient de blondel selon l'axe direct d

$\sigma_q = 1 - \frac{M_{srq}^2}{L_{sq} L_r}$  : Coefficient de blondel selon l'axe q

$\tau_d = \frac{L_{sd}}{R_{sd}}$  : Constante de temps statorique selon l'axe d

$\tau_q = \frac{L_{sq}}{R_{sq}}$  : Constante de temps statorique selon l'axe q

$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  : Constante de temps rotorique

$\omega_r$  : Vitesse angulaire électrique du rotor.

REFERENCES

- [1] Loukil.I: « Estimation des Paramètres et du Flux d'une Machine Asynchrone par la Méthode du Filtre de Kalman ». Mémoire de DEA présenté à l'École Supérieure des sciences et Techniques de Tunis (ESSTT), le 31 juillet 1995.
- [2] K.L.Shis, T.F .Chan, Y.K.Wong, and S.L.Ho « Speed Estimation of an Induction Motor Drive Using Extended Kalman Filter » Department of electrical engineering, the Hong Kong polytechnic university, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, IEEE 2000.
- [3] K.L Shi, T. F. Chan, Y.K.Wong, S.L.Ho, « Speed Estimation of an Induction Motor Drive using an Optimized Extended Filter ». Industrial Electronics, IEEE transactions on volume: 49, Issue, Feb 2002.
- [4] B. Aki, « State Estimation Techniques for Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motors ». These de Master, The Middle East technical universities. Août 2002.
- [5] L. Loron, G.Laliberte, « Application of the Extended Kalman Filter to Parameters Estimation of Induction Motors ». Power Electronics and Applications, Fifth European Conference on, 13-16 Sep 1993.
- [6] R. Pena Eguiluz. « Commande Algorithmique d'un Système Mon-onduleur Bimachine Asynchrone Destiné à la Traction Ferroviaire ». Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse, 8 novembre 2002.
- [7] . Bachir, JC. Trigeassou, S. Caut, S. Tnani, « Diagnostique des Défauts Statoriques et Rotoriques par Identification Paramétrique sans Capteurs de Vitesse ». Conférence Internationale Francophone d'automatique, Nantes, 8 Juillet 2002.
- [8] V. Comnac, M.N. Cirstea,F. Moldoveanu,D. N. Ilea, R, M. Cernat « Sensorless Speed and Direct Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine based on Extended Kalman Filter ». Industrial Electronics, Proceedings of IEEE International Symposium on, Volume: 4, 8-11 July 2002
- [9] T. SAHEB « Etude de Comportement du Filtre de Kalman et de l'Observateur de Luenberger au Voisinage d'un Point Singulier non Observable: Application à l'Estimation de Flux et de la Vitesse de la Machine Asynchrone ». JCGE, 2003.
- [10] F. Benchabane, A. Benakcha, A. Menacer, D. Taibi, K. YAHIA.application du filtre de kalman etendu dans une commande vectorielle en position du moteur synchrone à aimants permanents.

# Monitoring De La Population De Cerf De Barbarie Dans La Foret De Beni Salah (Wilaya D'el Tarf- Nord-Est Algerien)

Bouaicha Badreddine<sup>#1</sup>, Lazli Amel<sup>\*2</sup>

<sup>#</sup> District des forêts de Hammam Béni Salah, Conservation des forêts de wilaya d'El Tarf – Algérie.

<sup>\*</sup> Laboratoire des Sciences de l'environnement et d'Agroécologie. Université Chadli Bendjedid d'El Tarf. Algérie.

<sup>1</sup>first. [Bouaichabadri@gmail.com](mailto:Bouaichabadri@gmail.com)

<sup>2</sup>second. [am-lazli@univ-eltarf.dz](mailto:am-lazli@univ-eltarf.dz)

**Abstract**— Le Cerf de Barbarie (*Cervus Elaphus Barbarus*) est considéré comme l'un des mammifères rares et en voie d'extinction d'Afrique du Nord. De part sa mosaïque d'écosystèmes, l'Algérie l'un des pays qui lui offre un habitat adéquat et des ressources trophiques illimitées. Pour sa protection, un certain nombre de lois et de mécanismes ont été adoptés depuis des décennies.

Notre étude a permis de confirmer la présence de cet animal dans la forêt de Béni Salah, située dans la wilaya d'El Tarf, à l'extrême nord-est du pays et à la frontière algéro-tunisienne. Les lieux où l'espèce a été observée s'avèrent se trouver dans des zones protégées connues.

**Keywords**— Forêt de Béni Salah, Cerf de Barbarie, comptage, effectif, Wilaya d'El-Tarf, Réserve de Béni Salah.

## I. INTRODUCTION

Le Cerf de Barbarie (*Cervus elaphus barbarus*), qui reste le seul représentant autochtone des Cerfs élaphe en Afrique, occupait toute l'Afrique du Nord au paléolithique [1]. Il fait partie des animaux protégés en Algérie par différents textes de lois, notamment le décret 508/83[2], la loi 05/06 [3] et la loi N° 04-07 relative à la chasse[4]. Rare en Afrique du Nord, il est protégé par L'UICN et concerné par la convention de CITES [5].

La forêt de Béni Salah abrite une grande diversité biologique et s'étend sur trois wilayas : Guelma, Souk Ahras et El Tarf. Elle est caractérisée par climat semi-humide avec des variations saisonnières de températures et de précipitations qui ont permis le développement d'une végétation luxuriante, habitat d'une faune très variée. C'est dans sa partie de Guelma, qu'une réserve naturelle a été établie dans le but de protéger cet animal rare et en voie de disparition depuis 1972 [6].

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à l'observation et au suivi du Cerf de Barbarie en dehors de la réserve naturelle de Béni Salah dans le but de mettre en place un plan d'actions visant la sauvegarde de cet animal qui représente l'emblème de la région en général et de la commune de Hammam Béni Salah en particulier.

## II. MATÉRIELS ET MÉTHODES :

Site d'étude :

Cette forêt qui s'étend sur environ 17000 hectares, se compose de 5191 ha de Chêne liège *Quercus suber*, de 2502 ha de Chêne Zeen *Quercus faginea* et d'environ 9190 ha de broussaille ou d'herbacées. D'autres surface sont vides et d'autres sont des propriétés privées [8]

Le Chêne liège est présent dans l'ensemble des 12 cantons de la forêt de Béni Salah (commune de Hammam Béni Salah), tandis que le Chêne zeen cupe que 9 cantons. Il est absent des cantons de Fedj Tourba, Oued Rbeh et Sidi Boutadjine[9]. La végétation riche et diversifiée de ces deux formations forestières (Chêne-liège et Chêne zeen) est considérée comme un lieu favorable à la présence du Cerf de Barbarie.

En effet, plusieurs espèces de sous-bois des deux chênaies entrent dans le régime alimentaire du Cerf barbarie, notamment : *Arbutus unedo*, *Calycotome spinosa*, *Erica arborea* en hiver ; les feuilles de Chêne zeen, de C. liège et d'Arbousier, ainsi que des champignons au printemps. En été, des herbes qui poussent dans les lieux humides, en particulier sous C. liège et C. zeen, des gousses et des feuilles de *Calycotome* et les feuilles de *Arbutus unedo*. À l'automne, il se nourrit d'autres plantes telles que *Phillyrea angustifolia*, *Myrtus communis* et des feuilles de Chênes [10].

Méthodes :

Nos investigations de terrain se sont appuyées sur certaines caractéristiques, notamment les ressources trophiques de cet animal. Nous avons choisi certains sites comme stations de surveillance et de suivi du déplacement des individus (Fig. 2). Pour cela, nous avons pris en considération les signes de présence directe : les empreintes, les excréments ainsi que les endroits de repos.

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION:

Notre étude a porté sur la connaissance du mode de vie du Cerf de Barbarie, son habitat, son régime alimentaire et son mode de distribution. La forêt de Béni Salah offre ainsi en dehors de la réserve naturelle de Hammam Beni Salah, un habitat idéal pour cet animal.

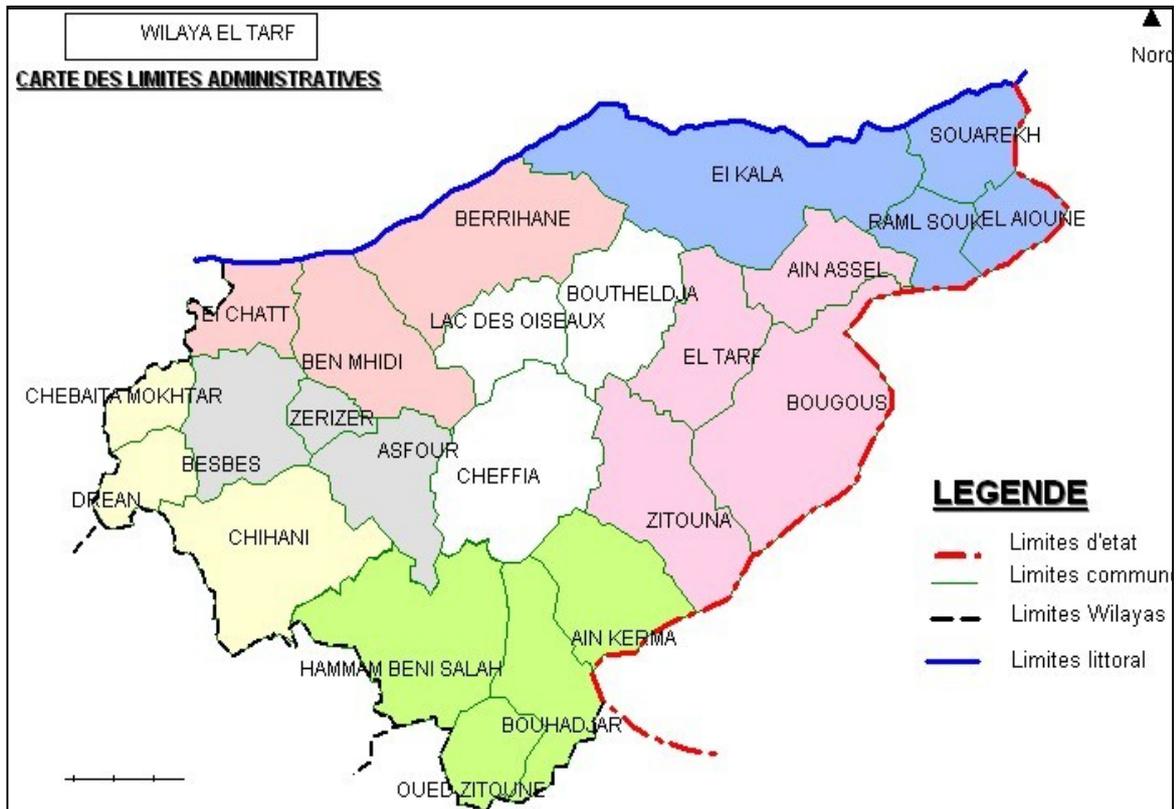


Fig. 1. Carte de localisation de la commune de Hammam Béni Salah.

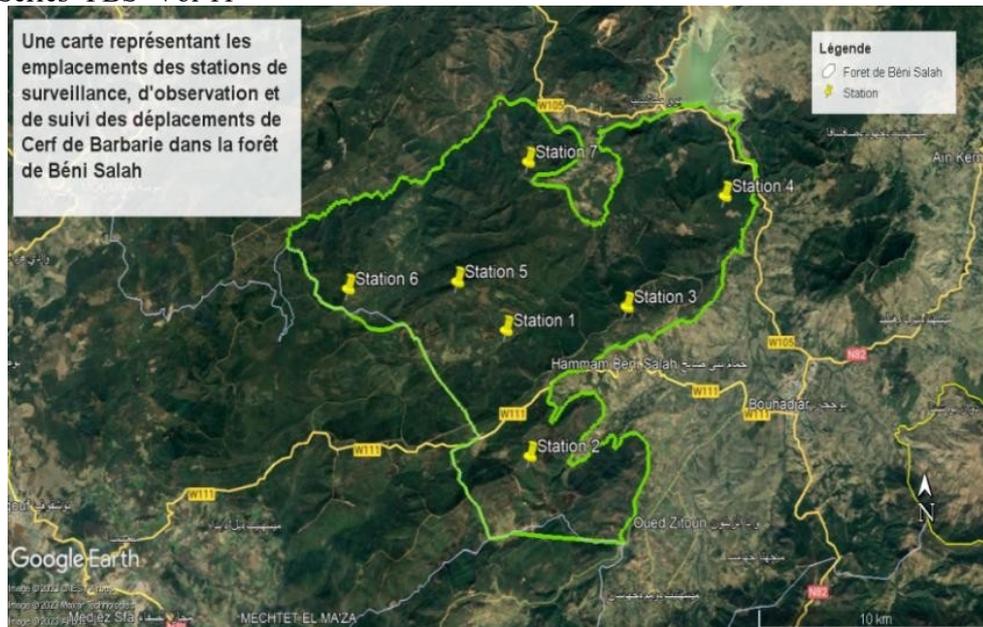


Fig. 2. Une carte représente les stations d'observation et suivie de Cerf de Barbarie.

Nos investigations de terrain ont montré que les cerfs se rassemblent dans la forêt de Béni Salah sous forme de troupeaux et sont rarement observés seuls. Parmi ces lieux : Safsafa, Rheb, Oued Soudan, Toufaha ... De plus grands groupes sont notés dans les sections de : Ain Mzouz et El Geuria, où les troupeaux dépassent quatre individus.

Selon nos observations, la présence du Cerf de Barbarie au lieu-dit Rhab est un cas exceptionnel, car les lieux que nous avons cités précédemment ont été exposés à des incendies pendant l'été 2022 [11], ce qui a poussé cet animal à vivre ailleurs.

En dehors de la réserve naturelle, la présence du cerf dans la forêt de Béni Salah n'était connue qu'à travers le brame dans certains endroits seulement, et ce pendant les campagnes de comptage par les services concernés. Mais pendant la période du Covid entre 2020 et 2022, l'apparition de l'animal est devenue perceptible en raison du manque de dérangements dans la forêt. Cela a conduit à l'observation de l'animal même en dehors de la forêt, près des habitations voisines de la forêt et mélangé parfois aux troupeaux de bovins et de moutons [13] (fig. 3).



Figure.3 : Cerf de Barbarie dans la forêt de Béni Salah [14]

Cependant, étant donné que la forêt de Béni Salah est en dehors de la réserve naturelle, l'absence de statistiques précises pour cet animal augmente la complexité des questions concernant sa protection en tant qu'espèce rare et menacée. En prenant les mesures nécessaires, notamment en créant une partie de la réserve naturelle de Béni Salah-Bouhegouf au niveau de la commune de Hammam Béni Salah, ceci garantit un habitat soustrait à tout type de danger comme les incendies, les dérangements et le braconnage.

Le braconnage est la principale raison qui a entraîné une régression importante des effectifs de cet animal, de même que les chasseurs de la région et des zones limitrophes. Les cornes, trophée de cette chasse sont prisées pour le plaisir et pour la décoration.

La précision des statistiques reste difficile du fait de l'ampleur des pertes résultant de la chasse illégale, sans oublier l'état phytosanitaire des essences forestières (Chênes lièges et Chênes zeen) dans les régions de Toufaha et Boumia.

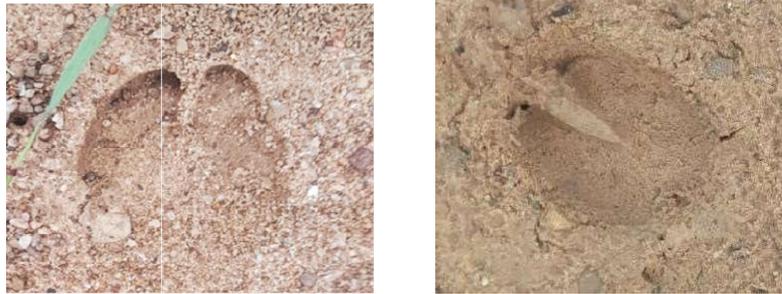


Figure.4 : Empreintes du Cerf de Barbarie dans la forêt de Béni Salah. (Bouaïcha B., 2020)



Figure.5 Lieu de repos du Cerf de Barbarie (Bouaïcha B., 2023)

Nous avons estimé, à partir de l'observation des crottes, empreintes (fig. 4). et lieux de repos du Cerf de Barbarie(fig. 5), comme indiqué par Amzal & Boudjellouah [17], le nombre d'individus qui ne dépasse pas d'ailleurs les 25 cerfs. La plupart d'entre eux sont éparpillés et se déplacent dans des endroits où il y a le Chêne zeen. La répartition de cet animal au niveau de la forêt de Béni Salah est consignée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1. Répartition du Cerf de Barbarie à travers la forêt de Béni Salah

Stations	Cantons	Nombre d'individus
01	Oued Soudaine	4
02	Rhab+ Boumia	5
03	Safsafa	3
04	Boukhendef	2
05	Rmal El Gaid	3
06	El Garia	3
07	Toufaha	5
Total		25

En raison de l'absence de toute forme de mise en défens limitant les déplacements du Cerf de Barbarie, celui-ci se déplace à l'intérieur de la forêt de Béni Salah et hors de la réserve, au niveau de points limitrophes avec les communes de Chihani, El Machrouha, ainsi que Asfour et même Bouchegouf. Par conséquent, sa population reste difficile à estimer du fait de sa présence dans des endroits difficiles d'accès, surtout que l'observation doit se faire tôt le matin ou la nuit. Cependant, son Brame a été entendu dans le canton d'El Garia.

Le nombre compté dans la forêt de Béni Salah est important pour cet animal rare, d'autant plus que son recensement en 2022 au niveau de la Réserve du même nom dans la wilaya de Guelma, a atteint 51 individus [18].

#### IV. CONCLUSIONS

A travers les résultats obtenus lors de cette étude, le Cerf de Barbarie, mammifère rare d'Afrique du Nord et menacé d'extinction, a réussi à s'adapter et à se maintenir dans la forêt de Béni Salah (wilaya d'El Tarf) car cet écosystème offre des conditions de vie qui conviennent à cet animal. Cela fait de cette forêt un habitat idéal pour sa population. D'où l'importance de protéger cette forêt de toute dégradation et de réfléchir à la possibilité de créer une réserve commune entre la wilaya d'El Tarf et celle de Guelma.

#### ACKNOWLEDGMENT

NOUS TENONS A REMERCIER TOUTE PERSONNE AYANT PARTICIPER DE PRES OU DE LOIN A LA REALISATION DE CE TRAVAIL.

#### REFERENCES

- [1] Abdoulaye Amadou Oumani & Aissa Patricia (2015) : Biologie de reproduction du cerf de Barbarie (*Cervus elaphus barbarus*, Bennett, 1833) en captivité dans le parc d'El Feidja et dans la réserve de Mhebes, en Tunisie, Afrique SCIENCE (Revue internationale des sciences et technologie), Vol 11 N°(1), page 168.
- [2] Décret n° 83-509 du 20 août 1983 relatif aux espèces animales non domestiques protégées, numéro 35 du Journal Officiel de la République algérienne, du 23 août 1983.
- [3] Décret n° 05-06 du 15 juillet 2006 relatif à la protection et à la préservation de certaines espèces animales menacées, numéro 47 du Journal Officiel de la République Algérienne, du 19 juillet 2006.
- [4] Loi n° 04-07 du 14 août 2004 relative à la chasse, Journal Officiel de la République algérienne numéro 51.
- [5] Quatorzième session de la Conférence des Parties de convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction, La Haye (Pays-Bas), 3 – 15 juin 2007, Examen des propositions d'amendement des annexes I et II, CoP14 Prop. 9, page 1-2-3-4.
- [6] Dehamnia Fawzia & Hireche Oum Elkheir (2021) : Evaluation des résultats de dénombrements du Cerf de Barbarie (*Cervus elaphus barbarus*) à l'état naturel dans les régions de Souk Ahras, de Guelma et d'El Taref (Algérie) de 2013 à 2020, , Mémoire de fin d'étude Master, Université Saad Dahleb-Blida 1-, page 29.
- [7] Bouaïcha Badreddine & Lazli Amel (2022): Overview of the Faunal Diversity of the Béni Salah Region (Wilaya of El Tarf), Preprint № 8744, Oum El-Bouaghi, Algeria, September 25 – 26 2022
- [8] Bouaïcha Badreddine & Lazli Amel (2021): Risks and threats for the Béni Salah forest in El Tarf region (north-east Algeria), in the absence of sustainable development mechanisms. 1er Séminaire National de Biologie Végétale et Environnement « SNBVE 2021 » 24 & 25 Novembre 2021. Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, Algérie.
- [9] Rapport des statistiques de district des forêts de Hammam Béni Salah. Wilaya d'El Tarf.
- [10] AREZKI Samia et LATBI Aissa, Evolution des effectifs du Cerf de Barbarie (*Cervus elaphus barbarus* Bennett, 1833) dans son site de réintroduction dans la forêt d'Akfadou, Bejaia, Mémoire de MASTER, Université A. MIRA – Béjaia, 2020-2021, page 8.
- [11] Rapport du district des forêts de Hammam Béni Salah.
- [12] Enquêtes avec les habitants de la forêt 2022.
- [13] Amzal Siham et Boudjellouah Lamia, Contribution à l'étude du régime alimentaire du Cerf de Bérberie *Cervus elaphus barbarus* (Bennett, 1833) au niveau de l'enclos d'Addekar (Bejaïa), Mémoire de fin d'étude Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2022.
- [14] Journal Algérien arabophone, El Massa, Numéro 8064, page 09

# Application de l'Indice Diatomique Générique (IDG) et de l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN) pour Déterminer la Qualité Écologique des Eaux de l'Oued Nfifikh et du Barrage de l'Oued El Maleh

H. Nassur<sup>1</sup>, SN. Nassor, K. Hilmi, N. Meskini, H. Messaouri

*BioSaNE, Laboratory of Chemistry-physics and biotechnologies of biomolecules and materials (CP2BM), University Hassan II of Casablanca, Morocco*

*<sup>1</sup>nassur.haidar-etu@etu.univh2c.ma*

**Résumé**— Actuellement, la qualité des cours d'eau et les réserves en eau sont de plus en plus alarmantes avec d'un côté les changements climatiques et de l'autre, les activités anthropiques qui entraînent sa détérioration. Pour évaluer la santé des écosystèmes aquatiques, on s'intéresse aux bioindicateurs qui peuplent ces environnements, notamment les macro-invertébrés et les diatomées.

Dans le cadre de cette étude, on a choisi d'analyser la qualité des eaux de trois sites du Grand-Casablanca situés dans des zones opposés concernant la qualité de leur eau (propre et polluée) à savoir le barrage de l'Oued El Maleh (S1) du côté de Jemaa Fedalate, l'aval de l'Oued El Maleh (S2) et l'aval de l'Oued Nfifikh (S3) à Mohammedia. L'échantillonnage a concerné les diatomées et les macro-invertébrés, afin de calculer les 2 indices biotiques : l'Indice Diatomique Générique (IDG) et l'indice des macro-invertébrés, Indice Biologique Global Normalisé (IBGN) [1], [2]. Parallèlement, l'Indice de Pollution Organique (IPO) est calculé à partir des analyses physico-chimiques réalisées sur chaque site [3], [4].

Nos résultats montrent que le site S1 présente une grande diversité de diatomées bio-indicatrices de zone de bonne qualité écologique telles que *Cymatopleura*, *Cymbella* et *Stauroneis*. L'indice IDG confirme cette conclusion avec une valeur de 15,3 qui correspond à une zone à eutrophisation modérée. Ce résultat est appuyé par la valeur de l'IBGN de 15,0 valeur synonyme d'un site de bon état écologique avec comme taxon dominant les mollusques. Cette classification est confirmée par le résultat de l'IPO de 4,3. Cependant, dans le cas du S2 et S3, la faible diversité des diatomées et la présence d'espèces, telles que *Nitzschia* et *Bacillaria* qui sont des bioindicateurs d'un site pollué. L'IDG est respectivement de 7,98 et 2,60. L'ensemble de ces arguments confirme que les deux sites sont qualifiés de sites pollués. La prédominance des taxons polluo-résistants, les oligochètes en S2 et les chironomidae en S3, et les faibles valeurs de l'IBGN, respectivement de 8 et 4, nous renseignent encore une fois qu'il s'agit de sites pollués. Les valeurs respectives de l'IPO de 1,5 et 2 corroborent la classification de ces 2 sites comme sites pollués

**Mots clés**— Diatomées, Macro-invertébrés, qualité de l'eau, IDG, IBGN, bioindicateur, Grand Casablanca.

## I. INTRODUCTION

Actuellement, le monde est confronté à une pénurie d'eau qui subit d'une part les effets du changement climatique comme la hausse des températures et d'autre part la détérioration accrue de sa qualité potable.

Les rejets ponctuels des eaux usées des égouts, les effluents des rejets industriels, l'utilisation intensive des pesticides et des engrais chimiques, en font les principales sources de pollution [5]. Les conséquences sont nombreuses telles qu'un déséquilibre des écosystèmes du milieu, entraînant une disparition de certaines espèces végétales et animales, ainsi que le dysfonctionnement de la chaîne trophique [5]. L'enrichissement du milieu entraîne une eutrophisation du milieu avec des blooms ou efflorescences phytoplanktoniques, ce qui peut causer la détérioration du milieu aquatique [6].

Pour évaluer la qualité des milieux aquatiques, on s'intéresse aux bioindicateurs qui peuplent ces milieux comme les macro-invertébrés et les microalgues particulièrement les diatomées (bacillariophyceae). Concernant les macro-invertébrés, on a l'indice biologique global normalisé (IBGN) et l'Indice Biologique Global adapté à la Directive cadre sur l'eau et l'Indice Invertébrés Multi-métriques (I2M2 – NF T90-333 et NF T 90-388). Pour les diatomées, on a l'indice diatomique générique (IDG), l'indice biologique diatomique (IBD) et l'indice de polluo-sensibilité etc.

L'objectif principal de l'étude est d'utiliser l'IDG et l'IBGN pour déterminer la qualité écologique des eaux de l'aval de l'Oued Nfifikh (S3), l'aval de l'Oued El Maleh (S2) et du barrage de l'Oued El Maleh (S1). Les objectifs spécifiques sont d'une part l'identification et le recensement des genres de diatomées et des macro-invertébrés notamment les groupes bioindicateurs. Et d'autre part confronter les résultats avec ceux des paramètres physico-chimiques.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. Sites d'Etude

Les 3 sites de l'étude et leurs caractéristiques sont montrés dans la figure 1 et le tableau I.

TABLEAU I : CARACTÉRISTIQUES DES SITES ÉTUDIÉS

Sites	Coordonnées Lambert	Caractéristiques
S1	X : 319711, Y : 324847	Superficie de 1800 m <sup>2</sup> , Situé à 30 km de l'embouchure de l'oued sur l'Océan Atlantique au niveau de Mohammedia.
S2	X : 313337, Y : 344413	Situé à 1 km de l'embouchure atlantique
S3	X : 320768, Y : 346978	Situé à la limite de la zone de confluence entre les eaux continentales et celles de l'océan atlantique à l'embouchure de la plage des Sablettes à Mohammedia.

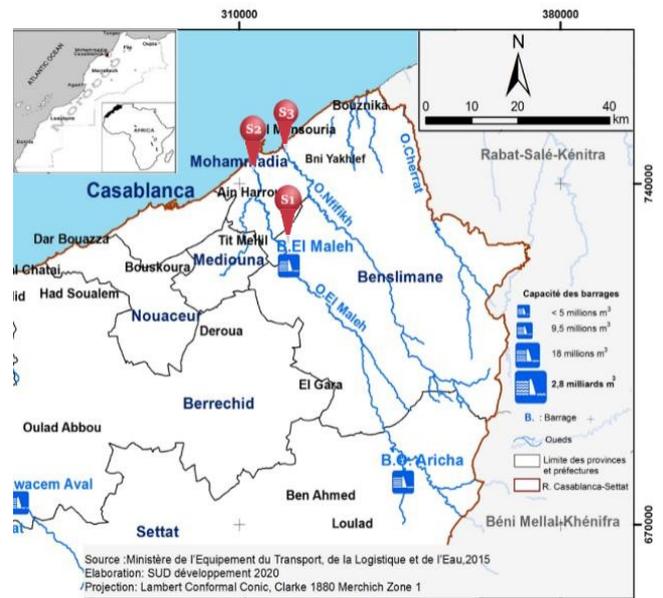


Fig. 1 Zone d'étude et sites d'échantillonnage

B. Analyses des Paramètres Physico-Chimiques

Des analyses physico-chimiques des échantillons collectés ont été réalisées en partie sur le terrain à l'aide d'appareil compteur portable multiparamètres à triple entrée (HQ40d) afin de mesurer le pH, la température, l'oxygène dissous (O<sub>2</sub>), et la conductivité électrique. D'autres analyses, tels que l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), la demande biologique en oxygène en 5 jours (DBO<sub>5</sub>), le nitrite (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) et le phosphate (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), ont été effectuées en conformité avec la norme française (NF T 90-354, 2000) au sein du Laboratoire.

L'indice IPO basé sur les valeurs des paramètres de pollution à savoir l'NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, la DBO<sub>5</sub>, le NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et le PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> a été calculé afin d'évaluer la charge organique de nos sites d'étude (tableau II) [4].

TABLEAU II : CLASSES DE RÉFÉRENCES POUR LE CALCUL DE L'INDICE DE POLLUTION ORGANIQUE (IPO)

Classes	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	DBO <sub>5</sub> (mg/l)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/l)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/l)	IPO	Pollution organique
5	< 0,1	< 2	≤ 5	≤ 15	4,6-5,0	Nulle
4	0,1-0,9	2,1-5	6-10	16-75	4,0-4,5	Faible
3	1-2,4	5,1-10	11-50	76-250	3,0-3,9	Modérée
2	2,5-6	10,1-15	51-150	251-900	2,0-2,9	Forte
1	>6	>15	> 150	> 900	1,0-1,9	Très forte

C. Échantillonnage, Traitements Chimiques et Identification des Diatomées

Le prélèvement des diatomées est réalisé selon des méthodes normalisées [7]. Le nettoyage des échantillons par de l'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) à 40% laisse apparaître l'ornementation des frustules (Stries, Raphés, Capitules, Fibules, Côtes...) [8]. L'identification des genres de diatomées est basée sur la morphologie et l'ornementation des frustules.

D. Détermination de l'État Écologique Avec l'IDG

Pour déterminer l'état écologique, on calcule l'indice Diatomique N qu'on convertit en IDG selon les deux équations suivantes[1] :

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n Si Vi Ai}{\sum_{i=1}^n Vi Ai}; \quad \text{IDG} = N \times 4,75 - 3,75$$

Si : Classe de sensibilité variant de 1 à 5 (du plus résistant au plus sensible)  
 Vi : Amplitude écologique du genre varie 1 = forte, 2 = moyenne, 3 = faible.  
 Ai : Effectif

L'appréciation de l'état écologique d'un milieu dulcicole est déterminée à partir des valeurs de l'IDG variant de 1 à 20. Elle est répartie selon cinq classes de qualités biologiques avec des codes couleurs associés (tableau III).

E. Échantillonnage des Macro-Invertébrés

Protocole d'échantillonnage et Identification des macro-invertébrés : Ce protocole ainsi que le calcul de l'IBGN sont définis selon la norme AFNOR (IBGN – NF T90-350 - Mars 2004) et IMANOR (IBGN - N°1677-16 du 06 juin 2016) [2].

Chaque macro-invertébré récolté est photographié puis identifié d'après le guide et la clé de détermination [9],[10]. L'IBGN est calculé selon la norme AFNOR[2]. Les résultats sont exprimés par une note de 0 à 20 (tableau III).

### III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### A. Indice de Pollution Organique

Les résultats des différents paramètres chimiques ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{DBO}_5$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{PO}_4^{3-}$ ) nécessaires au calcul de l'IPO qui est à la base de la classification de la pollution organique sont montrés dans le tableau IV.

La comparaison du site S2 et des sites S1 et S3 montre que le site S2 présente les valeurs les plus élevées aussi bien dans le cas de la  $\text{DBO}_5$  (58,9) que dans le cas de l'ammonium et du phosphate (72 et 5380). Ceci suggère une très forte contamination organique et minérale. Ces résultats sont confirmés par la plus faible valeur de l'IPO de 1,5. Les plus fortes valeurs en nitrite et en phosphate dans le S3 peuvent s'expliquer par une pollution d'origine agricole, industrielle ou domestique (tableau IV) [11].

#### B. Indice Diatomique Générique

1) *Identification des Diatomées par Sites* : Les genres de diatomées du site S1 représente la plus grande diversité avec 17 genres identifiés à savoir : *Bacillaria* (4,28%), *Campilodiscus* (5%), *Cocconeis* (4,28%), *Cymatopleura* (1,42%), *Cymbella* (5%), *Diploneis* (0,72%), *Donkia* (0,72%), *Eunotia* (0,72%), *Fragilaria* (7,85%), *Gyrosigma* (2,14%), *Navicula* (22,14%), *Nitzschia* (13,58%), *Rhoicosphenia* (2,14%), *Rhopalodia* (18,57%), *Synedra* (0,72%), *Surirella* (2,14%), *Stauroneis* (5%). Le pourcentage le plus élevé est celui de *Navicula* avec 22,14%. Les genres en gras sont comptés parmi les bioindicateurs sensibles à la pollution (d'après Omnidia).

Les genres du S2 sont : *Cyclotella* (10,52%), *Cymbella* (2,63%), *Craticula* (3,94%), *Fallacia* (11,84%), *Frustulia* (1,31%), *Gomphonema* (17,1%), *Navicula* (10,52%), *Surirella* (2,63%) et *Nitzschia*, majoritaire avec 39,47%, est le genre bioindicateur pollueurésistant.

Le site S3 est le moins diversifié avec seulement 4 genres identifiables : *Bacillaria* (3%), *Donkia* (1%), *Navicula* (10%) et *Nitzschia* qui représente le genre majoritaire avec 82% et qui compte parmi les bioindicateur de pollution.

2) *Qualité Biologique et Caractéristique Écologique des Sites Étudiés Selon l'IDG* : Les résultats du tableau V montrent que les eaux du S1 sont de bon état écologique avec eutrophisation modérée avec un IDG de 15,35 alors que S2 et S3 sont de mauvais à très mauvais état écologique avec une pollution respective forte et très forte avec eutrophisation. Leurs IDG respectifs est de 7,98 et 2,55.

#### C. Indice Biologique Global Normalisé

Après identification des macro-invertébrés par site, on a : En S1, 311 individus ont été identifiés dont 93% sont des indicateurs de pollution. Ces indicateurs sont répartis en trois groupes à savoir les gastéropodes (32%), les oligochètes (32%) et les chironomidae (29%). En S2, parmi les 45 individus récoltés, 49% sont des gastéropodes et 38% des ceratopogonidae. En S3, on n'a trouvé que 13 individus majoritairement des chironomidae avec un pourcentage de 84%.

Le classement des 3 sites selon l'IBGN est représenté dans le tableau VI. La qualité biologique de S2 est mauvaise avec un indice de 8 mais l'habitat est très biogène. Celle de S3 est très mauvaise avec un indice de 4 et un habitat peu biogène. Cependant, celle de S1 est bonne avec un indice de 15 (tableau VI). Les eaux du S1 sont donc de bon état écologique avec eutrophisation modérée mais un habitat peu biogène.

En S1, les valeurs des deux bioindicateurs calculés (IDG et IBGN) sont respectivement de 15,35 et 15. Ces valeurs élevées confirment la qualification de ce site comme site de bon état

TABLEAU III : CLASSES DE REFERENCE DE LA QUALITE BIOLOGIQUE AVEC UNE COULEUR ASSOCIEE. SOURCE: PRYGIEL, COSTE (2000), KARIM ET AL. (2017) [1]

IDG	IBGN	Qualité biologique	Caractéristiques écologique
$\text{IDG} \geq 17$	$\text{IBGN} \geq 17$	Très bon état	Eutrophisation nulle à faible
13 - 16	13 - 16	Bon état	Eutrophisation modérée
9 - 13	9 - 12	Etat passable	Pollution moyenne ou eutrophisation forte
5 - 9	5 - 8	Mauvais état	Pollution forte
$\text{IDG} < 5$	$\text{IBGN} \leq 4$	Très mauvais état	Pollution très forte

TABLEAU IV : PARAMÈTRE DE POLLUTION ORGANIQUE PAR SITE

SITE	$\text{DBO}_5$ mg/L	$\text{NH}_4^+$ mg/L	$\text{NO}_2^-$ µg/L	$\text{PO}_4^{3-}$ µg/L	IPO	Pollution organique
S1	4,35	0,031	-	< 20	4,33	Faible
S2	58,9	72	19	5380	1,5	Très forte
S3	2,79	3,69	2060	3800	2	Forte

TABLEAU V : QUALITE BIOLOGIQUE ET CARACTERISTIQUE ÉCOLOGIQUE DES 3 SITES ÉTUDIÉS D'APRES L'IDG

Site	IDG	Classe de la qualité biologique	Caractéristique écologique
S1	15,35	Bon État	Eutrophisation modérée
S2	7,98	Mauvais état	Pollution forte
S3	2,55	Très mauvais État	Pollution ou eutrophisation très forte

TABLEAU VI : QUALITÉ BIOLOGIQUE ET CARACTÉRISTIQUE ÉCOLOGIQUE EN TERME D'IBGN POUR LES 3 SITES ÉTUDIÉS

Site	IBGN	Classe de la qualité biologique	Caractéristique écologique
S1	15	Bon État	Eutrophisation modérée
S2	8	Mauvais état	Pollution forte
S3	4	Très mauvais État	Pollution ou eutrophisation très forte

écologique avec eutrophisation modérée. Cette classification biologique est confirmée par la valeur haute de l'IPO qui est de 4,33. En effet, selon Merbouh et al en 2023, les résultats sur la qualité physico-chimique révèlent que les eaux en amont des cours d'eau sont généralement classées de bonne qualité, alors qu'en aval, elles sont affectées par les activités humaines [12].

Les sites S2 et S3 sont caractérisés par la faible diversité de diatomées. Le genre le plus abondant est *Nitzschia* qui est considéré parmi les genres de diatomées résistants à la pollution. Les valeurs de l'IDG des sites S2 et S3 sont respectivement égales à 7,98 et 2,55 et celles de l'IBGN sont de 8 et 4. Les faibles valeurs des 2 bioindicateurs prouvent que ce sont des sites de mauvaise et très mauvaise qualité avec une forte pollution pour S2 et une pollution ou eutrophisation très forte pour S3. Ces résultats sont confirmés par ceux de l'IPO qui sont de 1,5 et 2. En effet, le S2 reçoit des effluents domestiques et industriels non traités. Cette zone a été désignée "site Ramsar" en 2005 sous le numéro 1486.24 [13]. Il se trouve dans un environnement urbain qui constitue une ancienne décharge. Ce site Ramsar, est soumis à une activité anthropo-zoologique intense, qui comprend le pâturage, le braconnage et le déversement illégal de produits liquides et de déchets peu dégradables (pneus, déchets métalliques et plastiques, etc.). En plus, parmi les autres sources de pollution figurent les eaux usées des particuliers ne bénéficiant pas d'un système d'assainissement, des entreprises de boucherie et de l'abattoir municipal [13]. Tout comme le S2, le S3 est traversé par de nombreuses zones rurales et urbaines et reçoit différents types de rejets liquides et solides provenant des activités anthropiques installés le long du cours d'eau [12].

#### IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Les conclusions des trois méthodes de surveillance d'eau utilisées à savoir les deux indices biologiques, IDG et IBGN, et l'indice physico-chimique IPO, convergent vers les mêmes résultats. Cependant, l'intérêt des bioindicateurs par rapport au dosage physico-chimique est que l'échantillonnage des bioindicateurs est facile à mettre en œuvre, peu coûteux et peu sensible aux variations environnementales brusques.

En effet, les bioindicateurs gardent en mémoire les perturbations du milieu et ils peuvent résister aux perturbations de courtes durées contrairement aux paramètres physico-chimiques qui subissent des variations instantanées selon les conditions du milieu. Par ailleurs, le principal avantage des indicateurs biologiques réside dans le fait qu'ils permettent d'évaluer les impacts des différentes perturbations sur la faune et la flore aquatique, contrairement aux indicateurs physico-chimiques qui permettent seulement de faire le diagnostic de ces perturbations [14].

Ce travail préliminaire prometteur doit être poursuivi d'une part par la considération d'un nombre plus important de sites de prélèvement sur les 4 saisons. L'utilisation de l'indice de polluo-sensibilité spécifique (IPS) et l'indice biologique diatomique (IBD) qui sont très pertinents pour caractériser l'état écologique de cours d'eau [4]. Les macrophytes sont également à considérer comme un volet supplémentaire de la biosurveillance.

#### RÉFÉRENCES

- [1] P. L. Karim, D. Kamel, D. A. Hamouche, et M. B. Nadjiba, « Contribution à l'évaluation de la qualité des eaux du Lac de Réghaia par Indice Diatomique Générique –IDG. », 2017.
- [2] IMANOR, « Qualité de l'eau - Détermination de l'indice biologique global normalisé (IBGN) - N°1677-16 du 06 juin 2016 ». Consulté le: 27 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.imanor.gov.ma/Norme/nm-03-7-214/>
- [3] S. Bahroun et H. Kherici Bousnoubra, « évaluation de l'indice de pollution organique dans les eaux naturelles cas de la région d'el tarf (nord-est algérien) », *LARHYS J.*, vol. 8, n° 2, p. 171-178, sept. 2010.
- [4] M. Bekri et al., « Utilisation Des Indices De Qualité Et De Pollution Organique Dans L'évaluation De La Qualité Physico- Chimique Des Eaux Superficielles Des Oueds Moulouya et Ansegmir (Haute Moulouya, NE Du Maroc) », *Eur. Sci. J.*, vol. 16, p. 55-75, sept. 2020, doi: 10.19044/esj.2020.v16n27p55.
- [5] A. Adjagodo, M. A. D. Tchibozo, N. C. Kelome, et R. Lawani, « Flux des polluants liés aux activités anthropiques, risques sur les ressources en eau de surface et la chaîne trophique à travers le monde : synthèse bibliographique », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 10, n° 3, Art. n° 3, 2016, doi: 10.4314/ijbcs.v10i3.43.
- [6] C. A. Dedjiho et al., « Influence de l'état d'eutrophisation de la lagune de Gbèzoumè (Ouidah) sur sa faune aquatique », *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, vol. 7, n° 5, Art. n° 5, 2013, doi: 10.4314/ijbcs.v7i5.24.
- [7] « EN 13946:2003 - Water quality - Guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers », iTeh Standards. Consulté le: 22 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/8e62f4b7-732a-4197-9efa-681b339b3740/en-13946-2003>
- [8] S. F. P. Almeida et al., « Water quality assessment of rivers using diatom metrics across Mediterranean Europe: A methods intercalibration exercise », *Sci. Total Environ.*, vol. 476-477, p. 768-776, avr. 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.11.144.
- [9] J. Moisan, « Guide d'identification des principaux macroinvertébrés benthiques d'eau douce du Québec, 2010 – Surveillance volontaire des cours d'eau peu profonds ».
- [10] « Invertébrés des eaux douces — Eduterre ». Consulté le: 14 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/hydro/travail-coop/determin/identif?searchterm=classi>
- [11] « Nitrates / Nitrites | INSPQ », Institut national de santé publique du Québec. Consulté le: 16 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/nitrates>
- [12] C. Merbouh, M. Kabriti, A. Nahli, A. Rihane, et N. Iounes, « Physicochemical Characterization and Metallic Contamination of the Waters of Oued Njifikh (Morocco) », *Ecol. Eng. Environ. Technol.*, vol. 24, n° 1, p. 1-11, janv. 2023, doi: 10.12912/27197050/154911.
- [13] A. Hatib, N. Hassou, A. Benani, J. E. Hafid, et M. M. Ennaji, « Molecular Detection of Rotavirus in Mollusks from the Oued El Maleh Estuary of Mohammedia, Morocco », *J. Pure Appl. Microbiol.*, vol. 15, n° 4, p. 2358-2366, déc. 2021, doi: 10.22207/JPAM.15.4.60.
- [14] V. Benoit-Chabot, « Les facteurs de sélection des bio-indicateurs de la qualité des écosystèmes aquatiques : élaboration d'un outil d'aide à la décision », *Essai, Université de Sherbrooke, 2014*. Consulté le: 14 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7036>



