



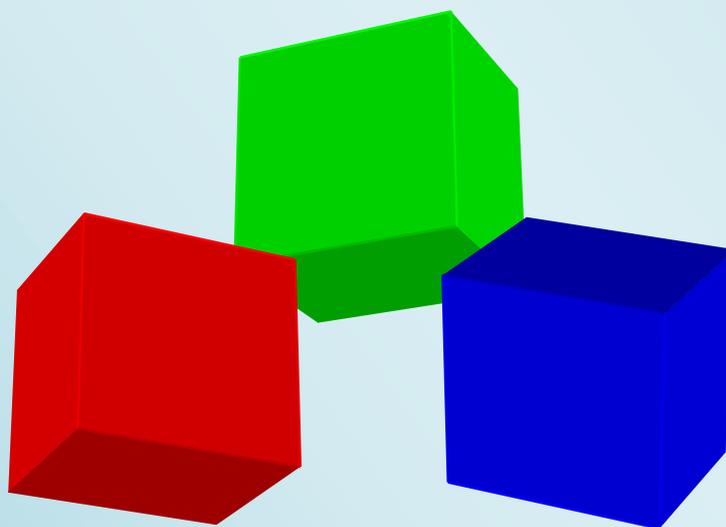
ISSN 2170 - 0737

EISSN:2600-7029

Volume 10, Numéro 1

Juin 2023

Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur



Préface

La « Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur RSSI » de l'Université de Laghouat présente des travaux de recherche tant appliquée que théorique issus principalement des domaines des Mathématique et de l'Informatique, des Sciences de la Matière, des Sciences Technologiques, des Sciences de la Vie et de la Terre. La revue est ouverte aux chercheurs, aux enseignants chercheurs et aux étudiants en formation doctorale. La revue est dotée d'un comité de lecture qui a la charge de gérer les papiers. Des lecteurs experts nationaux et internationaux sont sollicités pour donner leur avis sur la pertinence des contributions et conseiller les auteurs afin de garantir la qualité scientifique de la revue. La revue RSSI est effectivement une fenêtre nouvelle du savoir scientifique et technologique de l'université de Laghouat en particulier et de la communauté universitaire algérienne en général. Il s'agit d'une revue du savoir scientifique qui se propose de créer un espace visant à promouvoir la recherche scientifique. Cette initiative vient consolider le tissu des revues scientifiques algériennes qui commence à se dessiner à travers le territoire national après la création de la plateforme de production en ligne des revues scientifiques Algériennes « ASJP ». Actuellement, on assiste à une nouvelle dynamique de la recherche scientifique, à travers une nouvelle vision, une nouvelle politique de la tutelle que ce soit en matière de programmes, de financement et de ressources humaines. Le foisonnement des potentialités humaines de recherche durant cette dernière décennie, issus notamment de la formation par la recherche, la création de laboratoires de recherche, la dotation en financement important poussent les universités à réfléchir sur des politiques locales de développement de la recherche scientifique qui s'intègre dans la vision nationale. L'indicateur de la recherche scientifique se traduit par la production d'articles scientifiques et techniques tant en quantité qu'en qualité. De nos jours, de nouveaux indices de mesures de la productivité scientifique sont mis au point, tels que le facteur d'impact ou l'indice de Hirsh. La mesure par ces indices est prise en compte lors de l'évaluation des chercheurs ou du classement mondial des universités. Il faut dire que ce classement est tributaire de la visibilité des établissements universitaires et de la justesse de l'information. Malgré la croissance manifeste de la production scientifique en Algérie durant ces dernières années, la disparité de l'information scientifique rend la visibilité de cette production quasiment opaque. Par conséquent, cette production contribue de peu dans la visibilité de l'université algérienne et donc dans l'évaluation de cette dernière sur l'échelle mondiale. Nonobstant cela, les indices de performances de nos établissements universitaires, établis par des organismes mondialement reconnus, sont prometteurs. Une organisation des efforts, une visibilité améliorée constituent donc le cheval de bataille de chaque établissement. Ainsi, on ne saurait alors affirmer que l'initiative de création du présent organe de publication constitue une de trop. Au contraire, en étant un organe de publication satellitaire autour des revues savantes mondialement reconnues, une telle revue sera d'une grande utilité non seulement pour la carrière scientifique de nos jeunes chercheurs, mais aussi pour l'amélioration de la visibilité de l'établissement. Le pari est d'essayer de donner à cette revue une bonne réputation parmi la communauté universitaire algérienne, que ce soit dans sa forme ou dans la qualité des articles publiés.

L'éditeur-en-chef

Dr. Abdelhalim Zoukel

Pour publier dans la « Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur »

La «Revue des Sciences et Sciences de l'Ingénieur » de l'Université de Laghouat présente des travaux de recherche tant appliquée que théorique issus principalement des domaines des :

Mathématique et Informatique

Sciences de la Matière

Sciences Technologiques

Sciences de la Vie et de la Terre

La revue est ouverte aux chercheurs, aux enseignants chercheurs et aux étudiants en formation doctorale.

La revue est dotée d'un comité de rédaction qui a la charge de gérer les papiers. Des lecteurs experts nationaux et internationaux sont sollicités pour donner leur avis sur la pertinence des contributions et conseiller les auteurs afin de garantir la qualité scientifique de la revue.

Guide aux auteurs

1. Les auteurs doivent soumettre leurs articles électroniquement via la plateforme des revues scientifiques algériennes ASJP.
2. Pour faciliter le processus éditorial, les auteurs sont invités à suggérer un ou plusieurs noms de rapporteurs.
3. L'article doit être rédigé en Anglais, ou en Français ou en Arabe.
4. La liste des auteurs et co-auteurs doit rester inchangée de la soumission de l'article à sa publication.
5. Pour soumettre son travail dans cette revue, l'auteur devra rédiger son article suivant le modèle (format) donné dans la dernière page de cette revue
6. L'article ne doit avoir fait l'objet d'aucune publication antérieure ni être simultanément soumis à une autre revue. Le contenu original présente des résultats nouveaux sur un plan théorique, méthodologique ou applicatif. Des articles de synthèses, d'état de l'art ou de transferts sont particulièrement encouragés.
7. Un article qui ne suit pas les règles de publication de la revue pourra être rejeté directement (mauvaise qualité de publication, article hors du champ éditorial de la revue ou contenant des erreurs grossières).
8. Les articles acceptés pour être évalués sont soumis à des rapporteurs (deux minimum).
9. Seuls les articles ayant reçu un avis favorable des rapporteurs seront acceptés pour publication.
10. Après acceptation, l'auteur devra fournir son texte au format Tex, Latex de préférence. Word et RTF sont également acceptés. Les figures devront être au format EPS ou TIFF, et les polices bien incorporées. L'auteur devra également veiller à ce que la résolution des figures soit suffisante (300 dpi).

Pour plus d'informations, l'auteur doit se référer à la page web de la revue sur la plateforme ASJP <https://www.asjp.cerist.dz/en/PresentationRevue/303>

Sommaire

<u>Contribution à la Surveillance d'un système automatisé de production par des Réseaux de Petri Hybrides</u>	01
Anis M'halla	
<u>Effect of some physical and geometrical parametres on photonic band gap (PBGs) materiels</u>	10
M.aboutaleb Ghezal, Hamza Lidjici, Abdelhalim Zoukel	
<u>Evaluation of the Raw Water Treatment Process in the Agro-Alimentary Industry through Physico-Chemical Analysis</u>	15
FISLI Hassina, CHELAGHMIA Mohamed Lyamine, BOUSSAID Faiza3, HARRAZ Fayza	
<u>Modélisation Mathématique et Simulation Numérique des Performances de Refroidissement de Différentes Unités de Réfrigération à Compression de Vapeur : Application de Nouveaux Fluides Frigorigènes</u>	21
Youcef Maalem, Hakim Madani, Mohammed Mehemmai	
<u>Monts des Ksour, Atlas saharien, Algérie Synthèse géodynamique, lithostratigraphique et sédimentologique des séries Mésozoïque et Cénozoïque, magmatisme et tectonique.</u>	40
Abdel kamal BENMANSOUR	
<u>Simulation numérique d'une nouvelle structure de cellule solaire à base de deux couches absorbantes CIGS et CZTS</u>	51
Naceur SELMANE , Fakhereddine KHEMLOUL	



Contribution à la Surveillance d'un système automatisé de production par des Réseaux de Petri Hybrides

* Anis M'halla¹

¹Laboratory of Automation- Electrical Systems Environment (LAESE)- National Engineering School of Monastir (ENIM)- MONASTIR-TUNISIA.

Received : 2021-08-18

Accepted : 2022-05-31

Résumé : La conception et l'implémentation d'un modèle de surveillance d'une retordeuse, constituent les principales contributions de ce papier. Dans ce contexte, les travaux présentés s'attachent à développer une stratégie de surveillance, à base des réseaux de Petri Hybrides, de la qualité des fils et de la forme géométrique de la bobine obtenue lors de l'opération de retordage. Afin d'améliorer la productivité et la fiabilité de la retordeuse des algorithmes de surveillance ont été développés.

Mots-clés : Qualité, surveillance, Réseaux de Petri hybrides, retordeuse.

Abstract: The design and implementation of a monitoring model for a twister machine are the main contributions of this paper. In this context, the presented work focuses on developing a monitoring strategy based on Hybrid Petri Nets for assessing the quality of the yarns and the geometric shape of the coil obtained during the twisting operation. Surveillance algorithms have been developed to enhance the productivity and reliability of the twister machine.

Keywords: Quality, monitoring, Hybrid Petri Nets, twister machine.

1. INTRODUCTION

Des nos jours, l'implémentation des systèmes automatisés suppose la mise en place des outils de surveillance et de diagnostic. La surveillance permet de garantir et de préserver la sûreté de fonctionnement des équipements et du personnel. L'étude proposée dans ce papier consiste à développer des algorithmes de surveillance de la qualité des bobines obtenue lors d'une opération de retordage. Ce processus de surveillance, à base des Réseaux de Petri interprétée à signal Hybrides (RdPISH) est intégré dans un système d'aide à la décision pour la maintenance industrielle.

Les réseaux de Petri (RdP) sont souvent plus appropriés pour des travaux de modélisation [1], [2] puisqu'ils possèdent une représentation plus compacte et plus intuitive que les automates. Plusieurs méthodes de modélisation ont été développées pour la surveillance de systèmes hybrides. Des modèles, initialement continus, ont été étendus par l'intégration d'aspects événementiels. Les RdP hybrides étendent des modèles à événements discrets en intégrant des aspects continus. Gaudel et al. [3] proposent d'effectuer la surveillance de santé sous incertitudes pour des systèmes hybrides en utilisant une méthode basée sur des modèles. La surveillance de santé s'effectue grâce à des méthodes de diagnostic et de pronostic et nécessite un modèle de comportement et un modèle de dégradation du système. Le formalisme des Réseaux de Petri Hybrides Particulaires (RdPHP) est défini dans un contexte de surveillance de santé pour générer des diagnostiqueurs des systèmes hybrides.

Un formalisme de Réseau de Petri Interprété est proposé par Kučera et al. [4] afin de traiter les incertitudes relatives aux observations continues et discrètes. L'objectif principal est de concevoir un outil de modélisation et de contrôle des systèmes hybrides en utilisant Arduino et des microcontrôleurs. Pour accomplir ces tâches, un nouvel outil appelé PN2ARDUINO basé sur les réseaux de Petri Interprétés est proposé. La communication avec le microcontrôleur est basée sur le protocole Firmata modifié. Dans ce contexte un algorithme de contrôle est implémenté sur des microcontrôleurs qui supportent ce type de protocole. Quentin et al. [5] présentent une nouvelle méthodologie de surveillance des systèmes hybrides sous incertitudes. Des diagnostiqueurs sont générés à partir des Réseaux de Petri à Particules Hybrides (RdPPH) afin de surveiller à la fois le comportement et la dégradation de ces systèmes. L'avantage des RdPPH est la prise en compte de l'incertitude. Le diagnostiqueur basé sur les RdPPH traite l'occurrence des événements discrets inobservables (tels que les défauts) et estime l'état continu du système par un filtrage particulière. La méthodologie basée sur le RdPPH est appliquée à un prototype de rover planétaire K11 développé par le centre de recherche de la NASA. Un modèle hybride du K11 est proposé et les résultats expérimentaux montrent

que l'approche est robuste aux données et aux contraintes temporelles du système.

Fendri et al. [6] propose un algorithme d'ordonnancement du flux d'énergie pour un système PHotovoltaïque/Batterie (PV/B) afin de garantir une alimentation continue des charges. Le formalisme THPN (Timed Hybrid Petri Net) est utilisé pour modéliser le fonctionnement du système. L'objectif est de maximiser l'utilisation de la production PV, limiter le temps d'accès à la batterie et la protéger contre les surcharges et les charges profondes.

Certains travaux [7-10], étendent ainsi l'approche diagnostiqueur aux Systèmes à Événements Discrets (SED) modélisés par des RdP. Cependant, aucune de ces approches ne considère les aspects continus ou même les incertitudes sur la connaissance et les observations du système.

Ce papier présente en détail une démarche à suivre pour la mise en œuvre d'un modèle de surveillance. Le manuscrit est subdivisé en deux sections : la première s'intéresse à l'étude du principe de fonctionnement de la retordeuse ainsi que la problématique de surveillance et la solution proposée. La deuxième partie est consacrée à la présentation des algorithmes de surveillance de la machine. Ces algorithmes, suppose l'existence d'un modèle du système surveillé. Ce dernier doit intégrer la fonction de détection directe qui consiste à observer l'apparition des symptômes de défauts signalés par les capteurs.

2. La machine retordeuse

Photonic crystals (PhC) are periodic dielectric material with the capability to control and manipulate light propagation. Fig.1 shows the most important characteristics of optical crystals. The host structure of PhC, 2D triangular lattices, consisting of rods in air with radius $r = 0.24\mu\text{m}$, period $a = 0.4\mu\text{m}$ and size of photonic crystal is 21×21 . In this work, we fixed the value of the period (a) because we noticed during changing it that it does not affect PBG and we played on the radius starting from its lowest value, which is the point of disappearance PBG to the largest value, which is the the point of the impossibility of designing the shape to overlap it, through which we obtained the largest PBG i took it as a reference and use dit in the next design.

2.1 Présentation

La retordeuse est une machine chargée de réaliser le bobinage. Sa mission est d'exercer une force de torsion sur les multi-filaments assemblés afin d'obtenir un fil solide et résistant et de l'enrouler sur une bobine de réception initialement vide, figure 1.

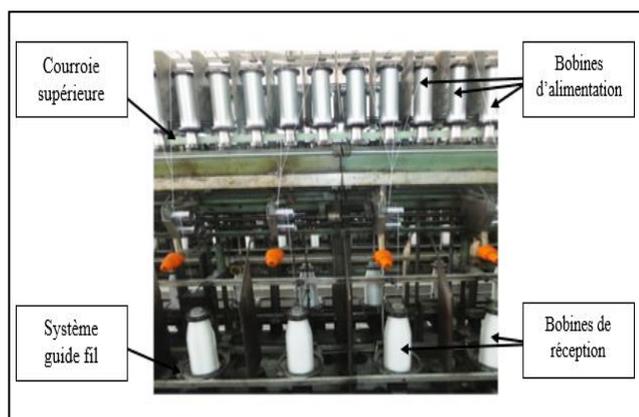


Fig. 1. Machine retordeuse.

La machine retordeuse, est constituée essentiellement, figure 2, de :

- deux capteurs de vitesse (vitesses des deux broches supérieure et inférieure),
- deux capteurs de fin de course (butées de fin de course),
- des capteurs informationnels sur la course (montée ou descente) du curseur. Ces capteurs sont :
 - S410 : capteur niveau haut,
 - S411 : capteur niveau bas,
 - S413 : capteur de niveau conique,
 - S432 : capteur de niveau conique supérieur

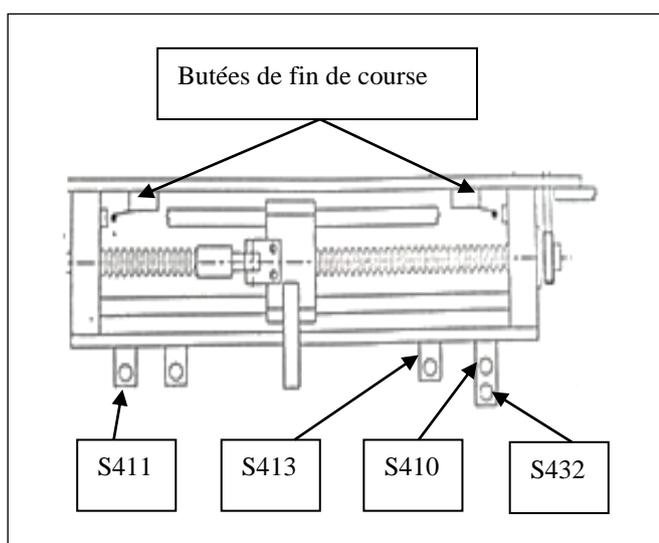


Fig.2 . Butées et capteurs fins de course.

2.2 Types de bobines

La retordeuse est équipée d'un sélecteur permettant de sélectionner la forme géométrique de la bobine. Ce sélecteur permet le choix entre trois types de bobines :

- Bobine à joues ou à course constante

Suite à ce choix, seulement les capteurs de niveau haut S410 (resp. S411) sont mis en service. Pour ce type de bobine, le mouvement du curseur est uniforme afin de garantir une répartition uniforme du fil, figure 3.

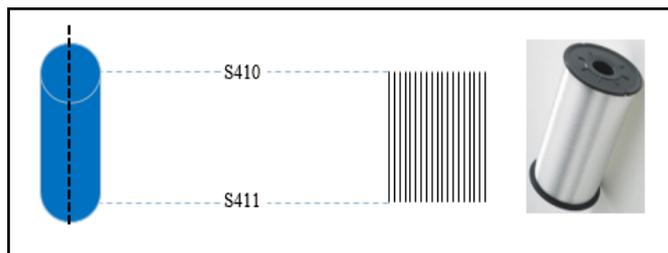


Fig. 3. Bobine à joue.

- Bobine à forme conique simple

Cette forme est obtenue en sensibilisant les capteurs de niveau haut (respectivement niveau bas) S410 (respectivement S411) et de niveau intermédiaire S413. Ce dernier permet d'obtenir la forme conique à la zone supérieure de la bobine, figure 4.

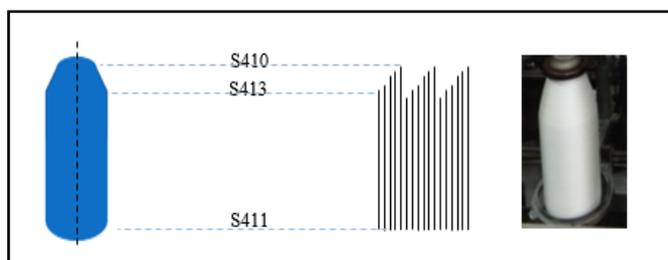


Fig. 4. Bobine à forme conique simple.

- Bobine à forme conique supérieure

Pour obtenir cette forme, le sélecteur doit être positionné à «3».

2.3 Défauts de bobines

Le but principal de ce papier est de surveiller la qualité des fils et la forme géométrique de la bobine. La figure 5, illustre la différence entre une forme conique conforme et non conforme.

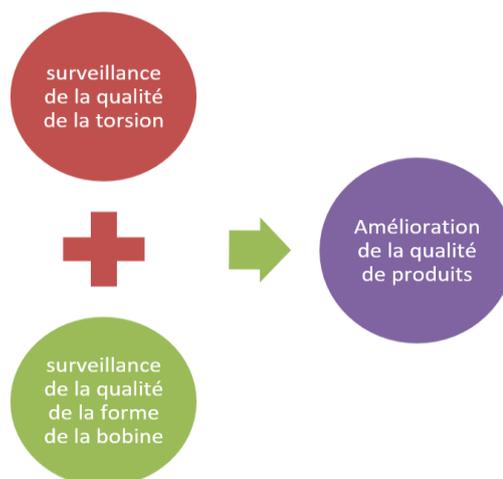


Fig .6. Principe de la surveillance



Fig .5. Formes coniques conformes et non conformes

Face aux défauts constatés, il est impératif de mettre en place une politique surveillance afin d'améliorer la qualité des produits. Dans ce cadre, notre contribution consiste à développer et implanter des algorithmes de surveillance de la qualité de produits en agissant sur la qualité des fils et la forme géométrique des bobines.

3. Surveillance de la retordeuse

3.1 Principe

Afin de surveiller la qualité des produits, des algorithmes de surveillance ont été développés. Ces algorithmes ont pour objectif l'amélioration de la torsion des fils et la forme géométrique de la bobine. Cette solution vise à améliorer la productivité, la disponibilité et la fiabilité de la machine, figure 6.

3.2 Les réseaux de Petri Interprétés à Signal Hybride

[9]

Les algorithmes de surveillance de la qualité des fils de la machine retordeuse sont élaborés à base des Réseaux de Petri Interprétés à Signal Hybride (RdPISH)

Définition formelle du RdPISH

Un RdPI est un 10-uplet $(P, T, F, m_o, V, I, O, \varphi, \Omega, D)$ ou :

- (P, T, F, m_o) est un Réseau de Petri

ordinaire, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, et $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, deux ensembles finis disjoints de places et de transitions ; $F = \{f_1, f_2, \dots, f_k\}$ est l'ensemble des arcs orientés reliant les places aux transitions (les transitions aux places), et m_o représente un marquage initial, avec $|P|, |T|, |F| > 0$

- V l'ensemble non vide des variables locales, $|V| > 0$

- I l'ensemble non vide des variables d'entrées $|I| > 0$

- O l'ensemble non vide des variables des sorties $|O| > 0$ et $V \cap I = V \cap O = I \cap O = \emptyset$

- φ est la fonction associée à la transition $t_i \in T$ avec une condition de déclenchement

$\varphi(t_i) =$ une fonction booléenne des variables (I, V)

- Ω est la fonction opération associée à la place $p_i \in P$, $\Omega(p_i) =$ une fonction opérationnelle sur les variables (V, O)

- D la variable attribué à chaque $d \in V \cup I \cup O$ de type numérique selon la norme IE61131, $D(d) : V \cup I \cup O \{BOOL, INT, REAL, TIME\}$

3.3 Algorithmes de surveillance

3.3.1 Abréviations

Le tableau 1, regroupe la liste des abréviations utilisées dans les algorithmes de surveillance de la retordeuse.

Tableau 1: Abréviations

ALG :Algorithme	DMR V1 : démarrage du variateur de vitesse du moteur 1
M : Moteur	DMR V2 : démarrage du variateur de vitesse du moteur 2
V : Vitesse du moteur	DMR V3 : démarrage du variateur de vitesse du moteur 3
Vm : Vitesse moyenne	DMR V=1 : commande de marche
Rv : Rapport de vitesse	DMR V=0 : commande d'arrêt
m : mesure	Sens R M3 : commande du sens de rotation du moteur 3
i : compteur	Sens R M3=1 : commande du sens de rotation vers le haut
BM :Bouton de Marche	Sens R M3=0 : commande du sens de rotation vers le bas
BA : Bouton d'Arrêt	M3 H : moteur 3 vers le haut
AUR :Arrêt d'urgence	M3 B : moteur 3 vers le bas
BSH : Butée de fin de course haut	VD10 : variable de temps à l'entrée du temporisateur
BSB : Butée de fin de course Bas	ALv : alarme variateur
capH : capteur haut (supérieur)	AL_défaut_torsion : alarme indiquant un défaut de torsion des fils
capIt : capteur intermédiaire	AL_défaut_forme_bobine :alarme indiquant un défaut de la forme géométrique de la bobine
capB : capteur bas (inférieur)	C0 : Condition de la vitesse de la montée
sens H : le sens haut est établi	C1 : Condition de la vitesse de la descente
sens B : le sens bas est établi	

3.3.2 Algorithme de surveillance de la machine

retordeuse

A/ Présentation

La figure 7 présente la structure de l'algorithme de surveillance principal de la machine retordeuse. Cet algorithme fait appel à quatre sous-algorithmes présentés dans la section suivante.

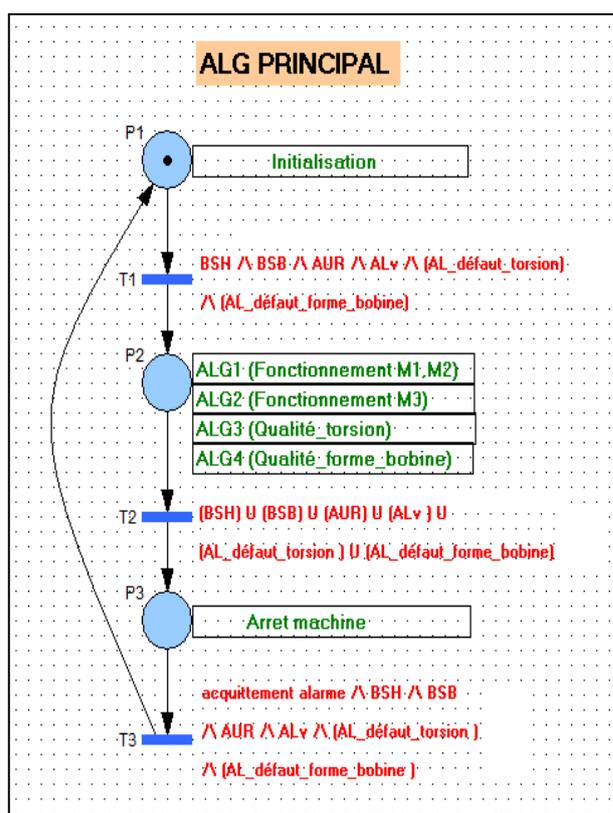


Fig. 7. Algorithme principal de surveillance de la retordeuse

B/ Principe de fonctionnement

Le franchissement de la transition T1 est réalisé si les conditions initiales sont satisfaites (butées de fin de courses, bouton d'urgence et les alarmes sont désactivés). La deuxième place « P2 » fait appel aux algorithmes de fonctionnement des trois moteurs (ALG1 et ALG2) ainsi que les algorithmes de surveillance (ALG3 et ALG4). Le franchissement de la deuxième transition « T2 » est conditionné par l'activation des butées de fin de course. Dans ce cas une alarme est générée et un arrêt impératif de la machine (place P3) est revendiqué. L'acquiescement de l'alarme permet de reprendre la production.

C/ Algorithme de surveillance de la qualité de torsion des fils (ALG3)

C-1/ Structure de l'algorithme

La figure 8, presente l'algorithme de surveillance de la qualité de torsion des fils.

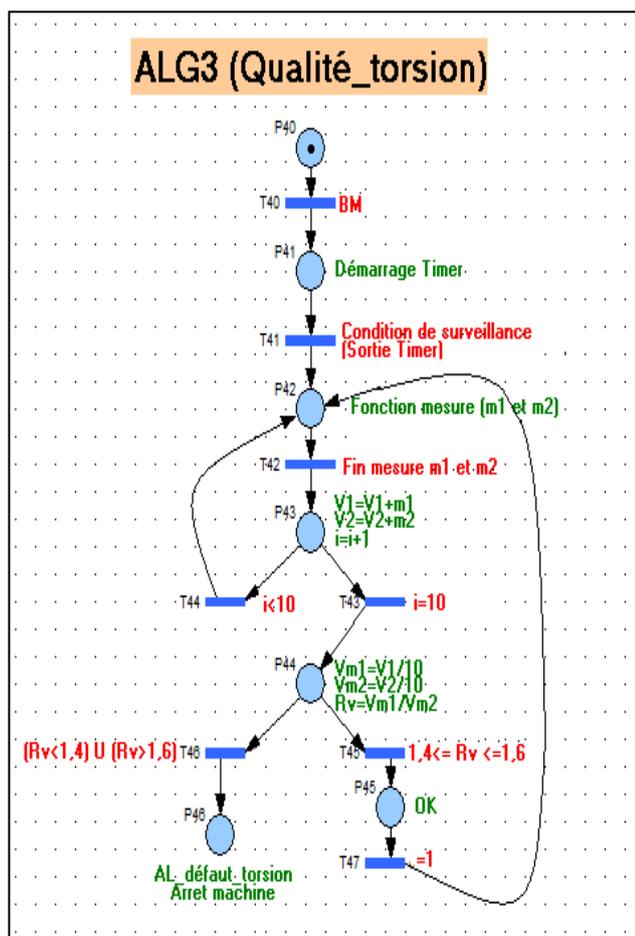


Fig .8. Algorithme de surveillance de la qualité de torsion des fils

C-2/ Description de l’algorithme ALG3

L’appui sur le bouton de marche, provoque le démarrage des moteurs M1 et M2. La fonction mesure consiste à la lecture des vitesses V1 et V2 (grâce à deux compteurs rapides) associés respectivement aux moteurs M1 et M2. L’objectif est de lire les vitesses moyennes Vm1 et Vm2. Ces vitesses sont obtenues après l’écoulement de dix impulsions successives.

Une bonne qualité de torsion est exprimée par un rapport de vitesse Rv ($Rv = Vm1/Vm2$). La plage de variation du rapport de vitesse est fixée par le constructeur de la machine retordeuse. Pour la retordeuse sujet de notre étude, si le rapport de vitesse $Rv \in [1,4 \dots 1,6]$, dans ce cas, les fils sont qualifiés de qualité. Dans le cas échant ($Rv < 1,4$ ou $Rv > 1,6$), un arrêt immédiat de la machine est imposé et une alarme est déclenché informant l’opérateur de la mauvaise qualité de torsion (place P46), figure 8.

D/ Algorithmes de surveillance de la qualité de la forme géométrique de la bobine (ALG4)

La surveillance de la forme géométrique de la bobine, est structurée sur le suivi de la variation de la vitesse du moteur du guide fil M3, figure 9 :

- **Phase 1 :** Changement de la commande (du bas vers le haut ou inversement)

Dans cette phase, il est indispensable de surveiller le temps de montée et de la descente lors de la variation de la vitesse V3. Afin d’éviter les défauts d’accumulation, le temps de changement des broches est estimé à 500 ms. Le dépassement de ce temps génère un défaut de qualité. Dans ce cas une alarme est déclenchée et un arrêt immédiat de la machine est revendiqué.

- **Phase 2 :** Surveillance de la variation de la vitesse V3 au cours de la montée (respectivement la descente).

Dans notre étude, la vitesse du moteur guide fil M3 est estimée à 148 tours/minute. Afin d’éliminer les défauts d’accumulations des fils, cette vitesse doit être respectée avec une marge d’erreur de $\pm 7,4$ tours/ minute pour la montée (resp. la descente) :

Lors de la montée, la vitesse est positive, dans ce cas la condition suivante doit être immédiatement respectée

C0 :
 $140.6 \leq V3 \leq 155.4.$

Si $V3 < 140.6$ ou $V3 > 155.4$, une alarme se déclenche et la machine est arrêtée.

Lors de la descente (vitesse négative), dans ce cas la condition C1 doit être respectée

C1:
 $-155.4 \leq V3 \leq -140.6.$

3.3.3 Implémentation des algorithmes de surveillance

Cette section s’intéresse à l’implémentation des algorithmes de surveillance de la qualité de des fils ainsi que la forme de la bobine obtenue lors de l’opération de retordage.

Notre contribution est d’implanter ces algorithmes de surveillance, développé dans la section précédente, sur un automate programmable S7-1200. Les entrées et les sorties utilisées sont de type T.O.R (à l’exception la vitesse V3 : entrée analogique).

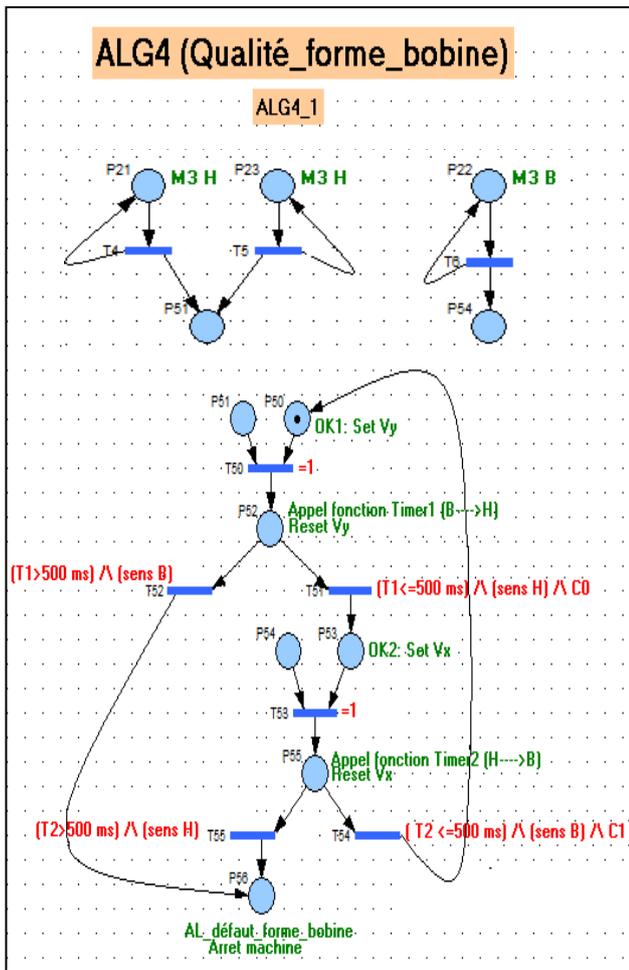


Fig.9. Algorithme de surveillance de la forme géométrique de la bobine phase 1.

A/ Qualité de la torsion des fils

Les causes principales engendrant des défauts de qualité de torsion des fils sont les suivantes :

Surcharge des vitesses V1 ou V2

Les causes de la diminution des vitesses sont principalement des causes mécaniques telles que l'augmentation du coefficient de frottement au niveau des roulements de broches ou la défaillance de la courroie de transmission.

Défaut du capteur de vitesse généré par un mauvais contact ou par la défaillance d'un capteur.

La première phase consiste à tester le bon fonctionnement puis un test des divers cas, illustrant le mauvais fonctionnement.

La figure 10, montre la variation des deux vitesses des broches inférieure (courbe en rouge) et supérieure (courbe en bleu). Les deux vitesses des broches V1 et V2 sont

constantes. La vitesse de rotation de la broche supérieure (resp. inférieure) est estimée à 6000 tours/minute (resp. 4000 tours/minute), figure 10.

La figure 11, illustre la marge de variation du rapport de vitesses (courbe en bleu) : les deux seuils de vitesses sont représentés par des courbes de couleur noire. Le dépassement de ces seuils provoque une génération d'une alarme (courbe en rouge).

■ Bon fonctionnement

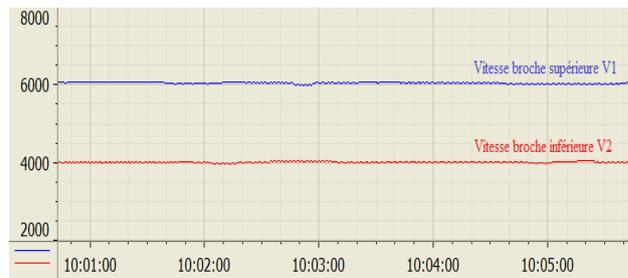


Fig.10. Vitesse des moteurs M1 et M2 (cas de bon fonctionnement)

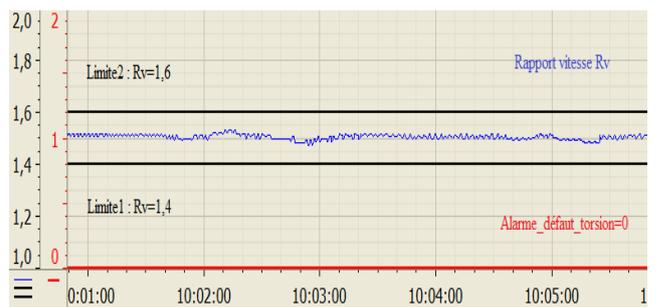


Fig.11. Rapport de vitesse (marge du bon fonctionnement)

■ Mauvais fonctionnement

Surcharge de la vitesse (figure 12 et 13)

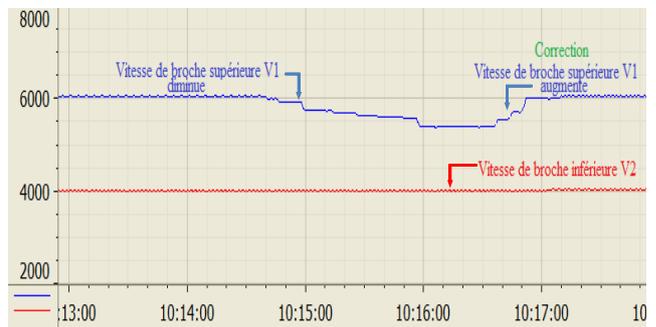


Fig.12. Variation de la vitesse de la broche supérieure V1

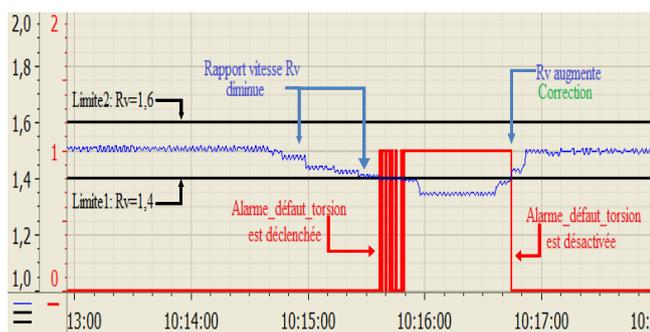


Fig .13. Déclenchement de l'alarme à cause d'un défaut de torsion

Interprétation des courbes

Une légère diminution de la vitesse de la broche supérieure V1, figure 12 provoque une diminution du rapport de vitesse, figure 13. Si le rapport de vitesse coïncide avec la limite inférieurs ($Rv=1,4$), une alarme est déclenchée.

Une variation de la vitesse V1, provoque un dépassement du seuil inférieure du rapport de vitesse. Dans ce cas, une alarme est générée indiquant un défaut de torsion des fils, figure 13

■ **Défaillance capteur de broche**

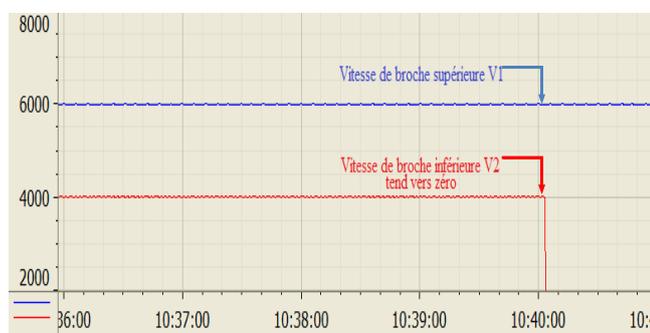


Fig.14. Capteur de broche inférieure défaillant

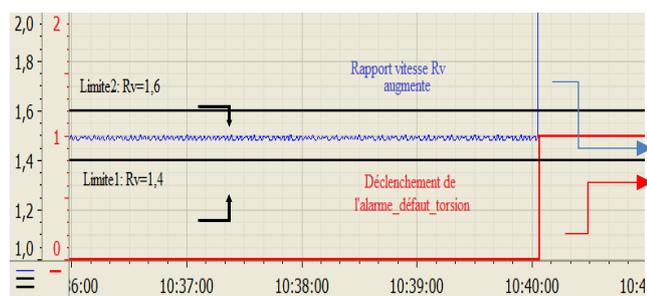


Fig .15. Défaut torsion suite à un défaut de capteur

Interprétation des courbes

L'occurrence de la défaillance du capteur de la broche inférieure est provoquée par un mauvais contact à l'entrée de l'automate (variation de la vitesse V2 de la broche inférieure). De ce fait, la vitesse V2 tend vers zéro, figure 14. Ainsi, le rapport de vitesses Rv augmente et tend vers l'infinie, figure 15. Ceci provoque le déclenchement d'une alarme indiquant un défaut de la qualité de torsion, figure 15.

■ **Défaut système guide fil**

Un dépassement du temps requis pour le changement des broches se traduit par un défaut du système guide fil, figure 16. Lors de changement de la commande, le temps requis pour l'inversement du sens des broches est de 780 ms (dépassement du temps requis de 500 ms). Ce retard est traduit par la génération d'une alarme défaut de forme, figure 17.

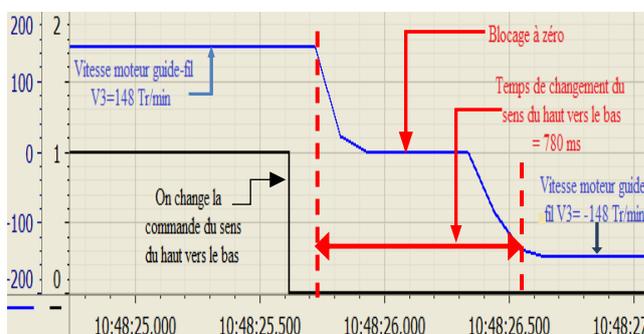


Fig.16 .Défaut système guide fil

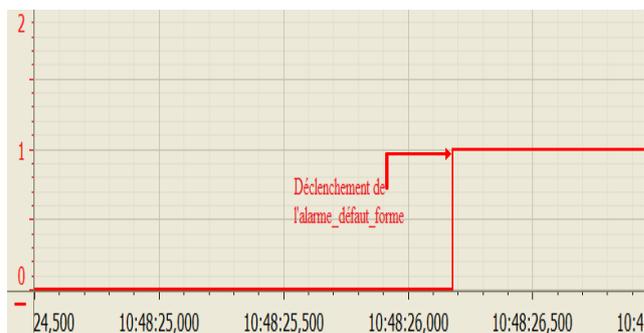


Fig .17. Dépassement de la limite du temps de descente et déclenchement de l'alarme défaut de la forme géométrique

4. Conclusion

Ce papier a présenté une démarche d'amélioration de la qualité de produits d'une machine retordeuse. Notre contribution consiste à développer une stratégie de surveillance de la qualité des fils et la qualité de la forme géométrique de la bobine à base des RdP interprétés.

La première section a présenté la machine retordeuse et de ses constituants. Le développement des algorithmes de

fonctionnement et de surveillance et la programmation sur automate constituent les principales contributions de ce papier.

En perspectives, il serait intéressant de développer une réflexion spécifique concernant la l'implémentation des algorithmes de maintenance sur la machine retordeuse. Les actions de maintenance peuvent être curatives ou préventives.

References

- [1] Liu, F., Heiner, M., & Gilbert, D. (2019). Coloured Petri nets for multilevel, multiscale and multidimensional modelling of biological systems. *Briefings in bioinformatics*, 20(3), 877-886.
- [2] Taleb-Berrouane, M., Khan, F., & Amyotte, P. (2020). Bayesian Stochastic Petri Nets (BSPN)-A new modelling tool for dynamic safety and reliability analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 193, 106587.
- [3] Gaudel, Q., Ribot, P., & Chanthery, E. (2015, November). Vers une architecture de surveillance de santé d'un système hybride sous incertitudes. In *Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR 2015)*.
- [4] Kučera, E., Haffner, O., Drahoš, P., Cigánek, J., Leskovský, R., & Štefanovič, J. (2020). New software tool for modeling and control of discrete-event and hybrid systems using timed interpreted petri nets. *Applied Sciences*, 10(15), 5027.
- [5] Quentin G., Chanthery, E., Ribot, P., & Daigle, M. J. (2018). Diagnosis of hybrid systems using Hybrid Particle Petri nets: theory and application on a planetary rover. In *Fault Diagnosis of Hybrid Dynamic and Complex Systems* (pp. 209-241). Springer, Cham.
- [6] Fendri, D., & Chaabene, M. (2019). Hybrid Petri Net scheduling model of household appliances for optimal renewable energy dispatching. *Sustainable cities and society*, 45, 151-158.
- [7] Yuan, C., Liao, Y., Kong, L., & Xiao, H. (2021). Fault diagnosis method of distribution network based on time sequence hierarchical fuzzy petri nets. *Electric Power Systems Research*, 191, 106870.
- [8] Chouchane, A., Declerck, P., Khedher, A., & Kamoun, A. (2020). Diagnostic based on estimation using linear programming for partially observable Petri nets with indistinguishable events. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*, 7(2), 192-205.
- [9] Zeng, Y., Duan, R., Feng, T., Huang, S., & He, J. (2021). A fault diagnostic system based on Petri nets and gray relational analysis for train-ground wireless communication systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 235(6), 1102-1117.
- [10] Wang, C., Gou, J., Tian, Y., Jin, H., Yu, C., Liu, Y., ... & Xia, Y. (2021). Reliability and availability evaluation of subsea high integrity pressure protection system using stochastic Petri net. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 1748006X211049900.



**Revue des Sciences et Sciences de
l'ingénieur**
Journal of sciences and engineering sciences

ISSN 2170-0737 EISSN: 2600-7029



Effect of some physical and geometrical parameters on photonic band gap (PBGs) materials

*M.aboutaleb Ghezal^{1,3}, Hamza Lidjici², Abdelhalim Zoukel³

¹*laboratory study and development of semiconductor and dielectric materials, Electronics department, university of amar telidji-Laghouat, Algeria.*

²*Laboratoire des matériaux pour applications et valorisation des énergies renouvelables, Electronics department, university of amar telidji-Laghouat, Algeria.*

³*Laboratory of Physico-Chemistry of Materials, Laghouat University, Algeria.*

Received : 2022-12-11

Accepted : 2023-03-12

Abstract: In this study, we have examined the impact of specific geometric (period, radius) and physical (refractive index) parameters on the properties of forbidden bands. Our focus was on two-dimensional photonic crystals composed of triangular and square structures made of Si, Ge, and GaAs rods in an air medium. The results demonstrate that increasing the refractive index of the materials relative to the substrate, as well as adjusting the geometric parameters, leads to a wider band gap. Furthermore, the open bands shift towards higher wavelengths. Simulation results obtained using Band Solve and Full Wave methods revealed that variations in the forbidden bands follow a Gaussian curve, with a maximum band occurring around 1.55 μm for $r=0.24 \mu\text{m}$ and $a=0.4 \mu\text{m}$. Additionally, a linear decrease in the width of the band gap was observed with changes in the physical parameters.

Keywords: Photonic crystal (PhC); Photonic band gap (PBG); transverse electric (TE); refractive index (RI); form factor (FF).

Résumé : Dans cette étude, nous avons étudié l'influence simulée de certains paramètres géométriques (période, rayon) et physiques (indice de réfraction) sur les caractéristiques des bandes interdites. Les cristaux photoniques bidimensionnels étudiés dans ce travail sont des structures triangulaires et carrées composées de tiges de Si, Ge et GaAs immergées dans l'air. Il a été observé que l'augmentation de l'indice de réfraction des matériaux par rapport à celui du substrat, ainsi que les paramètres géométriques, augmentent la largeur de la bande interdite. De plus, les bandes ouvertes se déplacent vers des longueurs d'onde plus élevées. Les résultats des simulations des paramètres géométriques à l'aide des méthodes Band Solve et Full Wave ont également montré que les variations des bandes interdites suivent une courbe gaussienne, avec une bande maximale autour de 1,55 μm pour $r = 0,24 \mu\text{m}$ et $a = 0,4 \mu\text{m}$. De plus, une diminution linéaire de la largeur de la bande interdite a été observée avec les variations des paramètres physiques.

Mots-clés : Cristal photonique (PhC) ; Bande interdite photonique (PBG) ; transverse électrique (TE) ; indice de réfraction (RI) ; facteur de forme (FF).

* Corresponding author: ghezal.aboutaleb@gmail.com

1. INTRODUCTION

In recent ten years, The concept of Photonics Crystals have been developed rapidly and widely applied [1,2] Photonic Band Gap materials or photonic crystals are structures whose dielectric constant is periodically modulated. These materials have frequency bands for which the propagation of electromagnetic waves is prohibited. Like electrons in semiconductors, photons are distributed in transmission bands separated by interdited bands gap. This analogy allows it possible to envisage the use of photonic crystals as basic materials for the production of components for integrated optics. This artificial periodic structure has special photoelectric properties due to the existence of PBG [3,4]. It widely used in the design of solar cells because of their unique optical properties such as the photonic band gap and the "slow photon" effect[5], waveguides [6,7], reflectors [8], filters [9] and other devices. These dielectric structures can control the flow of light [10]. According to the spatial dimension, the research direction mainly includes one-dimensional photonic crystal [11], two-dimensional photonic crystal [12] and three-dimensional photonic crystal [13]. The results obtained on PhC devices based on semiconductors are very promising for applications in photonic crystals and their integrated circuits. The performance of the devices is mainly based on the focusing of the light thanks to the photonic band gap effects.[14]. likewise, the aim of the photonic crystal study is to improve the width of the photonic band gap. Whenever the band-gap of the PhC is bigger, the structure has high performance. The symmetry of the structure is essential to control the photonic band gap (PBG) [15].The properties of the structures are simulated using the plane wave expansion (PWE) method integrated in the algorithm (RSoft Photonic).[16]

In this work, a comparative study was carried out for different materials such as Si, Ge, and GaAs in order to study the effect of physical and geometrical properties. So, we will manipulate on the fundamental and important factors taking into consideration their main relationship with the variation of the length of the range parameters in order to find adequate values to obtain high quality photonic structures, The photonic crystal is the image of the semi-conducteur in the optical field, the similarity between the mis the band gap, which is the thing that caused a huge technological revolution and great use, the aim of this work was to develop the width of this gap in order to expand and improve its use

2. STRUCTURE DESIGN

Photonic crystals (PhC) are periodic dielectric material with the capability to control and manipulate light propagation. Fig.1 shows the most important characteristics of optical crystals. The host structure of PhC, 2D triangular lattices, consisting of rods in air with radius $r = 0.24\mu\text{m}$, period $a = 0.4\mu\text{m}$ and size of photonic crystal is 21×21 . In this

work, we fixed the value of the period (a) because we noticed during changing it that it does not affect PBG and we played on the radius starting from its lowest value, which is the point of disappearance PBG to the largest value, which is the the point of the impossibility of designing the shape to overlap it, through which we obtained the largest PBG i took it as a reference and use dit in the next design.

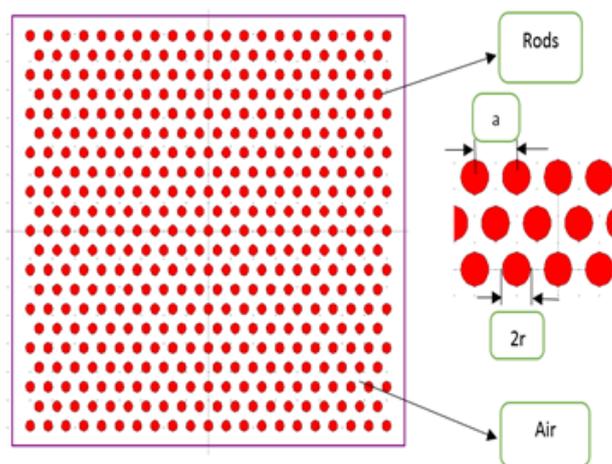


Fig. 1. Design of 2D triangular photonic crystal.

In fig.2, we present the dispersion curves and band-gap for TE polarisations for the 2D rods in air having a large band-gap in the wavelength range of (1160.83 nm to 1847.83nm). It has been calculated along the Γ -M-K- Γ edge for the brillouin zone which is calculated by the PWE method of Band-Solve software.

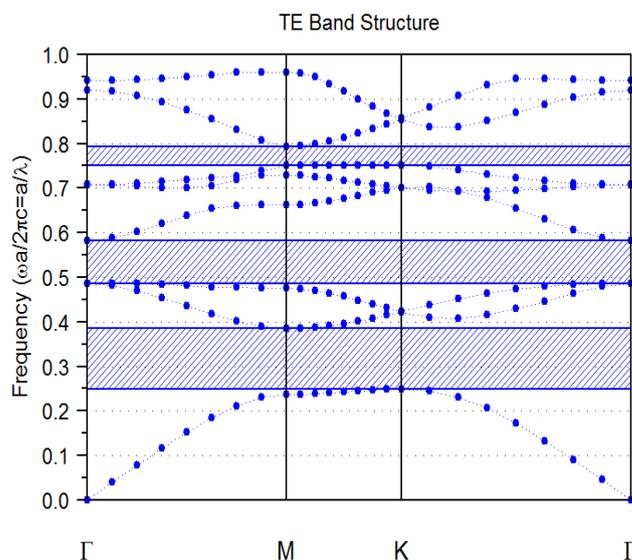


Fig. 2. The dispersion curves and band-gap for TE polarisations.

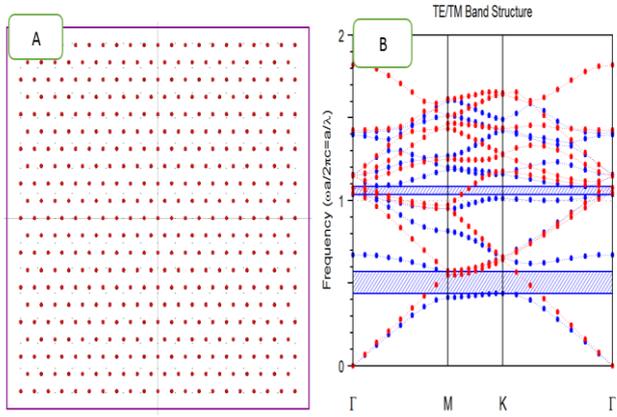


Fig.3. (A) is the design of PhC and (B) is the dispersion curves and band-gap for TE polarisations with radius $r = 0.09 \mu\text{m}$, period $a = 0.4 \mu\text{m}$.

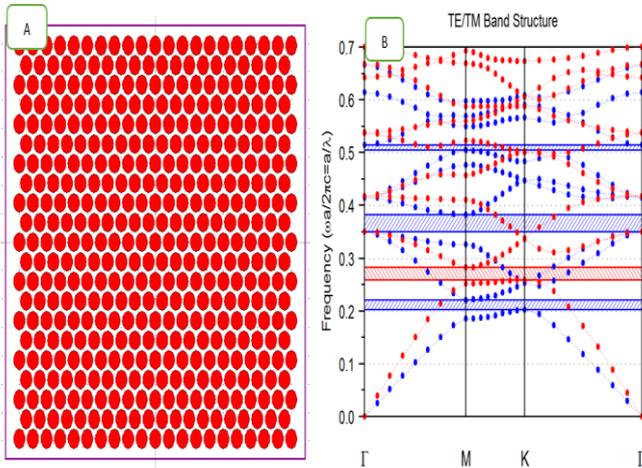


Fig. 4. (A) is the design of PhC and (B) is the dispersion curves and band-gap for TE polarisations with radius $r = 0.42 \mu\text{m}$, period $a = 0.4 \mu\text{m}$.

In fig.3 (A) and fig.4 (A), we present the structure of PhC with different radius $r = 0.09$ and $r = 0.42$ respectively. It can be observed from fig.3 (B) and fig.4 (B) that the width band-gap varied with the variation of the form factor.

3. NUMERICAL SIMULATION AND ANALYSIS

In fig.5 below, a comparative study was made on three materials with different refractive index extended in the area (disconnected structure) such as silicon ($n_{\text{Si}} = 3.42$), germanium ($n_{\text{Ge}} = 4$), gallium arsenide ($n_{\text{GaAS}} = 3.3$); and various topologies such as triangular and square forms. We can notice from the obtained results of fig.5 that a Gaussian variation in the width band-gap as a function of the variation in the form factor (It is a percentage that represents the value of the radius dividing the period r/a), the change in the geometrical characteristics has a clear effect on the extent and amount of light guidance, which in turn has a direct effect on the length of the gap and its borders in all results.

Mohamed elfateh hathat et al [17] they reached a gap value 975.6 to 1600.66nm represents width 625.6nm, merzouk ammari et al [18] 1435.3 to 1778 nm represents width 324.7 nm, F.Mehdizadeh et al [19] 1310 to 1774 nm represents width 464 nm.

And we, in turn, got it the best acquired form factor was $FF = 0.24$ which was given by triangular germanium with the band-gap of 700 nm.

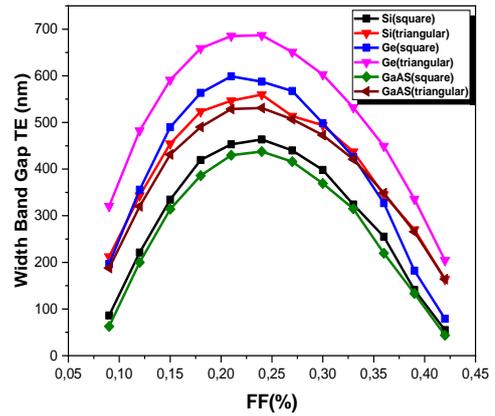


Fig. 5. The variation of the width band-gap for several materials as a function of form factor.

According to fig.6, a decreasing linear variation of the width PBG with the rise of the refractive index was observed for all materials. It can be seen that a high value of the width PBG was given by the triangular germanium. We can say that the triangular germanium is a suitable element for various applications such as photonic crystals, it is the result of reducing the difference in the refractive index between this middle reduction change the angle and direction of light reflection, which in turn affects and changes the boundaries and length of the gap.

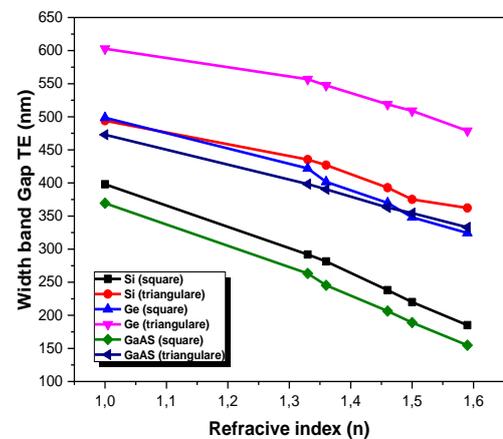


Fig. 6. The variation of the width band-gap as a function of refractive index.

Fig.7 presents the variation of the average PBG with the change of the refractive index. The acquired results summarized that the Si extended in the air ($n=1$) has a average PBG around of the telecommunication frequency in the order of 1550 nm The referece wavelength.

The table below shows the most important parameters used in this work.

materials	Perid a (nm) fixed	Radius r (nm) chang	Type structure	Dimension	polaristion	reference wavelength
Ge,Si,GaAS	0.4	0.036 to 0.168	2D (suar, triangular)	21*21	TE	1550 nm

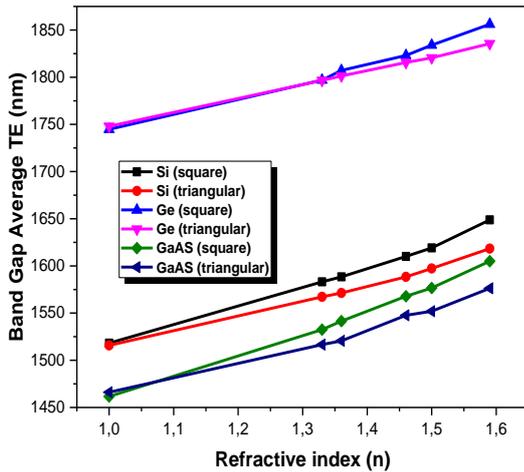


Fig. 7. The average band-gap as a function of refractive index.

From the results obtained previously from fig.7, we took the triangular silicium ($Si = 3.42$) as a structural support. Fig 8 shows the variation of width band-gap as a function of the form factor for several refractive index ($n = 1, n = 1.33, n = 1.36, n = 1.46, n = 1, 5, n=1.59$). An inversely proportional relationship was observed for the decrease in width PBG with an increase in the n index.

In this fig.9 we fixed the optimal values obtained above the disconnected structure, and we compared it with a different designe called in the field PhC the connected structure (holes in slab), we notice through it that it does not contain a gap for a small FF less than 18, and that it has a larger gap for an FF greater than 33, and it also distinguishes it from the TM polarization, unlike the first design.

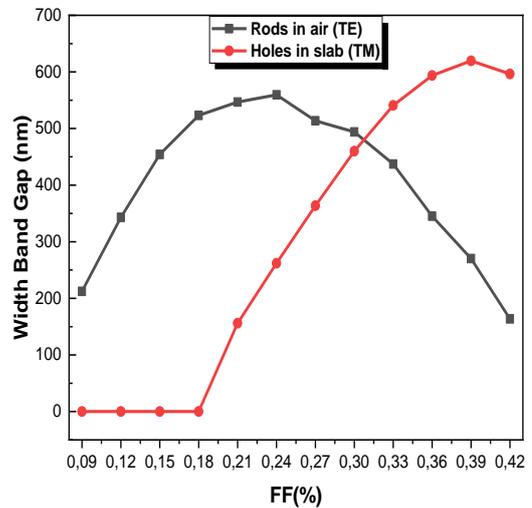


Fig. 9. The variation of the width band-gap of the Si triangular a function of form factor for two different designs rods In air and holes in slab.

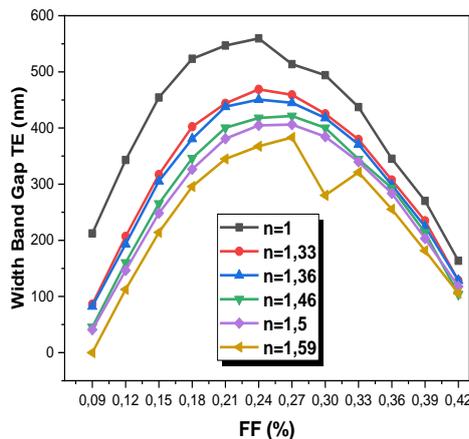


Fig. 8. The variation of the width band-gap of the Si triangular for different refractive index as a function of form factor.

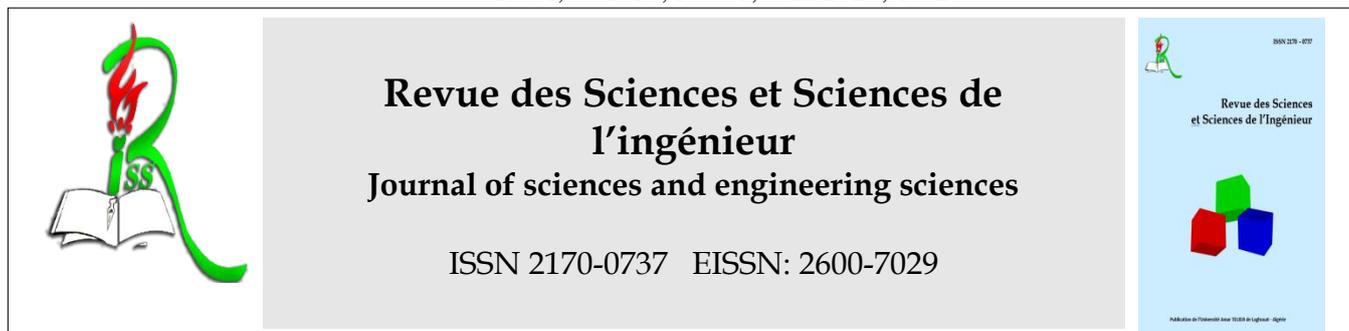
4. Conclusion

In our study, a comparative study made for different materials in order to find adequate values to achieve high quality photonic structures. We studied the influence of geometric (FF) and physical (RI) parameters for different materials (Si, Ge and GaAS). The widest band-gap was observed for a form factor (FF) of 0.24 for triangular Ge.

The obtained results for the different models (square and triangular) of a 2D photonic crystal show a band-gap around the telecommunication frequency of $1.55\mu\text{m}$ for the Si extended in the air. It is necessary to adjust the parameters to have good results and to choose the constituents of the crystal. It is also important to choose the topology of the PhC in particular the type and the form.

REFERENCES

- [1] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys Rev Lett* 1987; 58(20):2059.
- [2]. John S. Strong. localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. *Phys Rev Lett* 1987; 58(23):2486.
- [3]. Yunlong Wang, Siyue Chen, Pingping Wen, Song Liu, Shuangying Zhong. Omnidirectional absorption properties of a terahertz one-dimensional ternary magnetized plasma photonic crystal based on a tunable structure. *Results in Physics* 18 (2020) 103298.
- [4]. Yablonovitch E, Gmitter T, Leung K-M. Photonic band structure The face-centered cubic case employing nonspherical atoms. *Phys Rev Lett* 1991; 67(17):2295.
- [5]. Wei Liu, Hailing Ma, Annika Walsh. Advance in photonic crystal solar cells. *renewable and sustainable energy reviews*. 116, 2019, 109436.
- [6]. Goban A, Hung C, Hood JD, Yu S, Muniz JA, Painter O, Kimble HJ. Superradiance for atoms trapped along photonic crystal waveguide. *Phys Rev Lett* 2015; 115(6):063601.
- [7]. Young AB, Thijssen ACT, Beggs DM, Androvitsaneas P, Kuipers L, Rarity J, Hughes SH, Oulton R. Polarization engineering in photonic crystal waveguides for spinphoton entanglers. *Phys Rev Lett* 2015; 115(15):153901.
- [8]. Kumar A, Kumar N, Thapa KB. Tunable broadband reflector and narrowband filter of a dielectric and magnetized cold plasma photonic crystal. *Eur Phys J Plus* 2018; 133(7):250.
- [9]. Awasthi SK, Panda R, Shiveshwari L. Multichannel tunable filter properties of 1d magnetized ternary plasma photonic crystal in the presence of evanescent wave. *Phys Plasmas* 2017; 24(7):072111.
- [10]. Arafa AH, Sahar EA, Hussein EA. Tunability of two dimensional n-doped semiconductor photonic crystals based on the Faraday effect. *Opt Express* 2015; 23:15038–46.
- [11]. Vinogradov AP, Dorofeenko AV, Erokhin SG, Inoue M, Lisyansky AA, Merzlikin AM, Granovsky AB. Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces. *Phys Rev B* 2006; 74(4):045128.
- [12]. Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, Foteinopolou S, Soukoulis CM. Subwavelength resolution in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens. *Phys Rev Lett* 2003; 91(20):207401.
- [13]. Chen C, Hou C, Li C, Jau H, Wang C, Hong C, Guo D, Wang C, Chiang S, Bunning TJ, et al. Large three-dimensional photonic crystals based on monocrystalline liquid crystal blue phases. *Nature Commun* 2017; 8(1):727.
- [14]. Jean-Michel Lourtioz. Photonic crystals and metamaterials. New concepts for nanophotonics and nano-electronics. *C. R. Physique* 9 (2008) 4–15.
- [15]. Daohan Ge, JinPeng Li, Chao Ma, Minchang Wang, Liqiang Zhang, Shining Zhu. Effect of windmill-like-shaped defect on TM photonic band gaps of twodimensional square-lattice photonic crystals. *Results in Physics* 16 (2020) 102879.
- [16]. H.T. Zhang, D.S. Wang, M.L. Gong, D.Z. Zhao. application of group theory to plane wave expansion method for photonic crystals. *Optics communications*. 237. 2004. 179-187.
- [17]. M.f. hathat, M. Boulesbaa, S. Gamouh, design of new Y splitter based on photonic crystal for optical communication. August 03, 2020. *IEEE xplore*.
- [18]. M. ammari, A. benmarkhi, M. bouchema, four channel optical demultiplexer based on L2 photonic crystal microcavity. *optica, applicate*, DOI:10.37190/oa22041 1, vol. LII, no, 4, 2022.
- [19]. F. Mehdizadeh, M. Soroosh, H. Alipour, proposal for 4-to-2 optical encoder based on photonic crystals, *IET optoelectronics*, 10.1049/iet-opt.2016.0022.



Evaluation of the Raw Water Treatment Process in the Agro-Alimentary Industry through Physico-Chemical Analysis

FISLI Hassina^{1,*}, CHELAGHMIA Mohamed Lyamine², BOUSSAID Faiza³, HARRAZ Fayza³

¹Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculty of Mathematics, Computer Sciences and Material Sciences, Department of Material Sciences, Laboratory of Applied Chemistry, Algeria

²Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculty of Technical Sciences, Department of Process Engineering, Laboratory of Industrial Analysis and Materials Engineering, Algeria

³Université 8 Mai 1945 Guelma, Faculty of Mathematics, Computer Sciences and Material Sciences, Department of Material Sciences, Algeria

Received : 2021-09-16

Accepted : 2022-01-11

Abstract: In the agro-alimentary industry, the water treatment process plays a crucial role in ensuring the quality of water used in food processing. To assess the effectiveness of this process, we conducted physico-chemical analysis on water samples from an Algerian cannery. Our objective was to develop a decision support tool for evaluating the treatment process and aiding in decision-making. The analyses included pH, electrical conductivity, turbidity, and major elements, comparing the results with recommended standards. Overall, the water quality met the standards, indicating that the current treatment process effectively eliminates drawbacks.

Keywords: Performance Evaluation; Water treatment process; Agroalimentary use; Physicochemical analysis.

Résumé: Dans l'industrie agroalimentaire, le processus de traitement de l'eau joue un rôle crucial pour garantir la qualité de l'eau utilisée dans la transformation des aliments. Afin d'évaluer l'efficacité de ce processus, nous avons réalisé des analyses physico-chimiques sur des échantillons d'eau provenant d'une conserverie algérienne. Notre objectif était de développer un outil d'aide à la décision pour évaluer le processus de traitement et faciliter la prise de décision. Les analyses ont inclus le pH, la conductivité électrique, la turbidité et les principaux éléments, en comparant les résultats aux normes recommandées. Dans l'ensemble, la qualité de l'eau était conforme aux normes, ce qui indique que le processus de traitement actuel élimine efficacement les défauts.

Mots-clés : Évaluation des performances ; Processus de traitement de l'eau ; Utilisation agroalimentaire ; Analyse physico-chimique.

* Corresponding author: fisli.hassina@univ-guelma.dz

1. INTRODUCTION

Water is a fundamental constituent of our environment. Its usefulness may vary with the different human needs (food, watering the land, industrial process, etc.). Pure water does not exist in nature. During its different circulations, on the surface of the earth, underground and in the air, it becomes loaded with different materials which may be soluble or insoluble (suspended matter). Indeed, raw, untreated water always contains many substances of natural origin or from human activity. The physicochemical analysis makes known the uses for which a given water is suitable, household needs (cooking or washing water, etc.), industrial needs (cooling or manufacturing water, etc.), it detects water at risk of exert a chemical action on the pipes and facilitates the development of treatments which will eliminate the drawbacks revealed [1-5].

The treatment processes performance in raw water treatment is of great importance and must be evaluated to ensure the successful performance of the processes; it is why many factors such as variability in source water quality or units operational and technical conditions can be applied [6]. There is a need to consider the technical condition assessment comprehensively both in structural and technical terms and in operational and technological terms while, it is required to take in consideration the quantity and the quality of the treated water [7]. The water treatment process applied can be evaluated by testing the quality of the produced water. The identification of water quality parameters varies due to the water sources used [8,9]. In general, physicochemical parameters are considered to be the key parameters for classifying the quality of raw and treated water in any water treatment process, while in other studies the biological parameters of treated water have been included [10].

Water is a staple of most large food processing companies. In a cannery for example, raw water has to be provided at not only an adequate amount, but also of good quality for production of canned food and for supplying boilers. To deal with changes in the nature of raw water within the process water treatment and supply, commonly used treatment technologies have to be evaluated and optimized [11].

At the Amor Ben Amor Cannery, the waste water from Oued Bouati used in the cannery undergoes

several treatments before use to rid it of various pollutants. In the cannery, water is mainly used for cleaning the equipment and premises and the hygiene of cannery staff, washing the raw material (tomato, pepper and apricot), dilution of semi-finished products, boiler feed and cooling cans. This study is a part of the evaluation of the treatment process on the physicochemical quality of water in food industries, focusing on the case of the Amor Ben Amor cannery located in the wilaya of Guelma, Eastern Algeria.

Our objective was to assess the raw water treatment process and to perform physicochemical analyzes of treated and untreated water at the cannery, to evaluate the performance for purification process of water treatment and the quality of raw and treated water, since, to the best of our knowledge, no previous works have been made to cover this important issue related to the public health and the environment. Also to explore the limits of the conventional possibilities used to provide a clean water in agoralimentary industry in Algeria as an example of a developing country.

2. MATERIAL AND METHODS

This experimental study focused on the checks carried out at the cannery and the characterization of the physicochemical quality of the water samples.

2.1 *General conditions and physicochemical parameters determined*

The analyses were carried out on samples taken from raw, softened and osmosed waters, At a daily sampling rate throughout the study period, raw water from the Amor Ben Amor cannery is directly pumped from the Bouati Oued and stored in accumulation basins. The treated softened and osmosed waters refer to the raw water that has undergone all the treatment processes.

Sample containers were polyethylene bottles provided with hermetic-locking caps. Bottles and caps were cleaned, rinsed with desionized water, drained, wrapped in polyethylene bags and stored until required.

Prior to sample collection, sampling device and containers were rinsed twice with the water to be sampled.

The parameters measured are: electrical conductivity (EC), turbidity, pH, total hardness (TH), alkalinity (TA and TAC), chlorides, iron (Fe^{2+}), manganese (Mn^{2+}) and free chlorine.

Prior to collection, the vials were accurately labeled and accompanied by detailed information including the site name, date, time, and collection order, ensuring clarity and preventing any confusion.

2.2 Physicochemical analysis of the water

The physicochemical parameters were determined following the standard protocols [12,13].

3. RESULTS

3.1 Raw water treatment process in the cannery

The treatment of raw water after it has been collected depends on its quality and its constituents, criteria which vary over time. At the cannery, the main source of water used is the water from Bouati Oued. It undergoes several treatments before use. In the following is given a brief description [14] of the raw water treatment process in the cannery:

a) Screening and sieving (Self-cleaning Filter):

remove insoluble waste such as branches, plastics, etc., from the water. In fact, since this waste cannot be eliminated by a physicochemical treatment, it must therefore be eliminated mechanically. To do this, the wastewater passes through several screens whose meshes are increasingly tight. These are equipped with automatic cleaning systems to prevent clogging, and to prevent pump malfunction.

b) Clari-flocculation and settling system:

At this stage, the flocculation and settling treatment takes place in a specific basin, by injecting three chemicals, which are coagulant, soda and bleach. These products cause the particles still present (dust, soil particles, etc.) to agglomerate into flakes. These agglomerate and settle at the bottom of the basin by settling, 90 % of suspended solids are thus eliminated. The quantity of water entering the basin is regulated using a flow meter.

c) Sand filtration:

consists of passing water through a thick layer of fine sand to remove the last flakes. Boiler water just needs sand filtration, but for water used in product manufacturing, it requires ultrafiltration, iron removal and demagnetization.

d) Ultrafiltration system:

The membrane wall acts as a filter for all particles larger than 10-20 nm: bacteria, viruses and germs.

e) Iron removal and demanganisation:

The purpose of removing iron and manganese is to ensure that the water used is of satisfactory quality. Iron removal and demanganization consist in removing Fe and Mn by filtration after an oxidation phase, which allows the formation of insoluble Fe and Mn oxides.

f) Osmosis system:

The water undergoes very strong pressure and passes through a porous membrane, which retains all the particles in suspension and only allows the water molecules to pass. The reverse osmosis unit reduces the mineral salt content by 98%.

g) Softening:

The softener works on the principle of capturing calcium ions (Ca^{2+}) and magnesium ions (Mg^{2+}) responsible for the presence of scale in the installations. The water, which passes through the resin tank, will be freed of calcium and magnesium ions, which are replaced by sodium ions (Na^+).

h) Carbon filter:

Fine filtration is done by activated carbon, for further removal of matters affecting taste and odor and micropollutants still present in the water.

i) UV system:

The water is subjected to UV sterilization, which will oxidize dissolved pollution and eliminate all dangerous microorganisms. It also improves the color and flavor of the water.

The raw water treatment process at the cannery is summarized in Fig. 1.

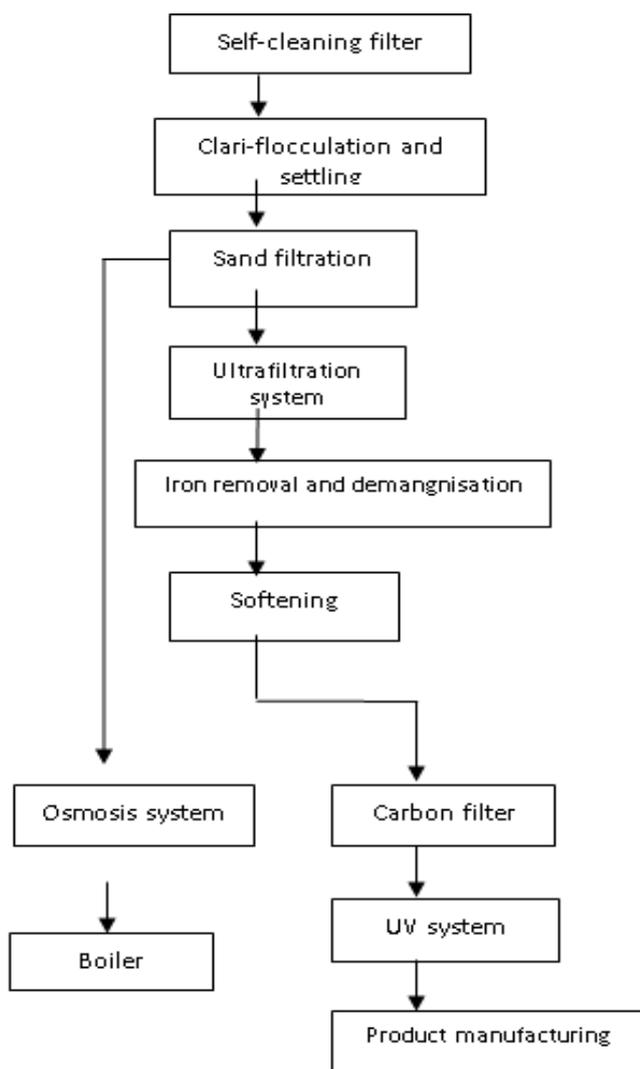


Fig.1. Raw water treatment process at the cannery

3.1 Physicochemical analysis

The analysis of physicochemical characteristics has a very important role in water quality control, hence the need for it to be carried out both during and after treatment, on the samples taken at different

stages of the processing: raw, softened and osmosed waters.

The physicochemical characteristics of the water before and after treatment are grouped together in Table 1.

1. DISCUSSION

In the following is presented the discussion of the results of the physicochemical analysis carried out on the waters of the cannery between April 25 and March 25, 2019.

To learn more about the quality of the water in the cannery through the different treatment steps, as well as the efficiency of the softening and osmosing processes, the results obtained are compared with the Algerian standards for industrial and drinking water parameters [15].

The evaluation of the efficiency of the raw water treatment process at the cannery was made after determining a number of physicochemical parameters characterizing these waters. We analyzed the water by performing measurements of a range of representative physicochemical parameters chosen according to the desired goal. From an industrial point of view, correct water quality is essential for the reliability of operation and the preservation of the life of steam generators. The quality of the water also influences the quality of the steam to be produced and depends on the ultimate use made of it (turbines, superheated steam, process fluid, etc.). The characteristics monitored during this study are the pH to limit corrosion and the dissolved salts to limit deposits, because acid water causes tuberculation and corrosion, whereas alkaline water produces incrustation and sediment deposits [14].

Table 1. Physicochemical characteristics of water before and after treatment.

Parameter	Raw Water (RW)			Softened Water (SW) (Potable Water)				Osmosed Water (OW) (Industrial Water)			
	Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Std *	Avg.	Max.	Min.	Std*
pH	7.78	7.95	7.67	7	7	7	6.5-8.5	12.40	12.58	12	10.5-12.5
E.C. ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	1091.25	1122	1060	1101.8	1178	997	2800	4701.25	5000	4495	6000
Turbidity (UTN)	12.28	22.9	4.47	0.70	1.16	0.18	0-5	-	-	-	-

Hardness (TH) °f	4.28	5.40	3.56	4.49	5.36	3.84	0 - 6	-	-	-	-
Alkalinity (TA and TAC) °f	0/23.68	0/25.2	0/22	0/23.24	0/25.6	0/22.4	0/20	54.56/65.4	57.9/68.8	49.6/60	60-80/80-120
Cl ⁻ (mg.l ⁻¹)	105.64	119.28	90.88	123.42	130.64	114.44	250	622.8	658.4	599.6	1000
Fe ²⁺	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-	-
Mn ²⁺	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-	-
Free Chlorine	-	-	-	0	0	0	-	-	-	-	-

* Algerian standards for industrial and drinking water parameters [15]

The recorded pH values vary between 7, for softened water and between 12 and 12.58 for reverse osmosis water (Table 1, Fig. 1). These results are within the drinkability standards for softened water, which require a pH between 6.5 and 8.5, and boiler water, which requires a pH between 10.5 and 12.5 [15].

The conductivity is representative of the concentration of dissolved salts. The conductivity measurement of the circulating water is used to adjust the boiler purge flow rate. The conductivity results of the water analyzed vary between 997 and 1178 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for softened water and between 4495 and 5000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for reverse osmosis water (Table 1). These values remain below the standard, which is 2800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for drinking water and 6000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ for industrial boiler water [15].

Turbidity is directly related to matters dissolved or suspended in water. The recorded values vary from 0.18 to 1.16 NTU (Table 1). They are adapted to the standard (0 to 5 UTN) [15].

The results of the determination of TH show values ranging between 3.84 and 5.36 ° f (Table 1). The hardness of the softened water is within the norm, TH from 0 to 6 ° f [15].

The values obtained for the TA of the softened water are zero. The TAC concentrations vary from 22.4 to 25.6 ° f or from 224 to 256 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ of CaCO_3 (Table 1). These values are admissible although slightly above standard (200 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) [15]. In reverse osmosis water, the TAs are higher but they do not exceed the standards (60-80 ° f) [15]. Boiler water TAC results meet standards (80-120 ° f) [15].

The chloride contents obtained for softened water are lower than the maximum concentration (250 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) [15] required. They vary from 114.44 to 130.64 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Likewise for boiler water, where the

chloride content varies between 599.6 and 658.4 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Table 1) for a standard not exceeding 1000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ [15].

In addition to these results, one notices the absence of iron, manganese and free chlorine during the investigation.

Although the results obtained at first glance give water treated in the standards, the comparison between the values of the various physicochemical parameters analyzed for raw water and softened water (Table 1) respectively: conductivity (1091.25 and 1101,8 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), TH (4.28 and 4.49 ° f), TA and TAC (0/23.68 and 0/23.24 ° f) and chlorides (105.64 and 123.42 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) shows that the treatment process is faulty at the level of softening, which may be due to the resins which may be saturated and which therefore have to be regenerated.

5. CONCLUSION

The water treatment process applicable to achieve the desired quality of industrial water in a cannery from Algeria was evaluated by comparing the physicochemical quality of raw and treated water at the cannery. In depending on our investigation made for a short-term observation, it was found that although the analyzed parameters of the treated water are within the standards, which indicate that the treatment process at the cannery is generally efficient and that it can be used together with the physicochemical analysis to take corrective measures and actions in the event of non-compliance. Although these results, it is strongly recommended to periodically check the operating condition of the existing treatment facilities and to regenerate the resins

REFERENCES

- [1]. Slavik, I. and Uhl. W. (2009). Analysing water quality changes due to reservoir management and climate change for optimization of drinking water treatment. *Wat. Sci. Tech.* 9(1): 99-105
- [2]. Gadgil, A. (1998). Drinking water in developing countries. *Annu. Rev. Energy Environ.* 23: 253-86
- [3]. Tebbutt, T.H.Y. (1997). Principles of water quality control, Butterworth-Heinemann
- [4]. Reza, R. ; Singh, G. (2010). Assessment of ground water quality status by using water quality index method in Orissa, India, *World App. Sci. J.* 9(12): 1392-1397
- [5]. Hamdy, S.M.A. (2016). Examination and Analysis of Water from Household Water Filter System Kifllo. *Eng. amp. Tech. J.* 34(3 B): 418-424
- [6]. Zhang, K.; Achari, G.; Sadiq, R.; Langford, C.H.; Dore, M.H. (2012). An integrated performance assessment framework for water treatment plants, *Wat. Res.*, 46(6): 1673-1683
- [7]. Kučera, T.; Tuhovčák, L.; Biela, R. (2016). Methodology for the Estimation of the Technical Condition in the Case of Water Treatment Plants. *Procedia Eng.* 162: 71-76
- [8]. Eassa, A.M.; Mahmood, A.A. (2012). An Assessment of the treated water quality for some drinking water supplies at Basrah, *J. Basrah Res. Sci.* 38(3): 574-579
- [9]. Alobaidy, A.; Maulood, B.; Kadhem, A. (2010). Evaluating raw and treated water quality of Tigris River within Baghdad by index analysis. *J. Wat. Res. Prot.* 2: 629-635
- [10]. Varadhajan, R.B. (2009). Importance of Biological Parameters of Water Quality to Reform Water Quality Index in Practice, in Editor (Eds.): 'Book Importance of Biological Parameters of Water Quality to Reform Water Quality Index in Practice edn., pp. 199-204
- [11]. Vega, M.; Ra.Pardo, E.; Barrado, L.; Debañ. (1998). Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Wat. Res.* 32(12) 3581-3592
- [12]. APHA, (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC
- [13]. a- Rodier, J. (1984) Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 7ème édition, Edit. Dunod, Paris, France, pp. 8-101-112
b- Rodier, J. (1986). L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8ème édition, Edit. Dunod, Paris, France, pp. 1365
c- Rodier, J.; Bazin, C.; Boutin, J.P.; Chambon, P.; Champsaur H.; Rodi, L. (1996). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 8ème édition, Dunod, Paris, France, pp. 879 -1260
d- Rodier. J. (1997).. L'analyse De L'eau (Eaux Naturelles, Eaux Résiduaires Et Eaux De Mer), 8ème Edition, Dunod, Paris, France, pp. 66
e- Rodier, J.; Legube, B.; Merlet, N. (2005). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Ed. Dunod, Paris, France, pp. 1384
f- Rodier, J.; Legube, B.; Merlet, N.; Coll,. (2009). L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. 9ème édition, Dunod, Paris, France, pp. 50, 107, 118
- [14]. a- Crini, G.; Lichtfouse, E. (2019). Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. *Env. Chem. Let.* 17: 145-155
b- Crini, G.; Badot P.M. (eds). (2007). Traitement et épuration des eaux industrielles polluées. PUFC, Besançon
c- Crini, G.; Badot P.M. (eds). (2010). Sorption processes and pollution. PUFC, Besançon
- [15]. La norme Algérienne N°17683 « Réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles, municipales et industrielles - Spécifications physico-chimiques et biologiques



Modélisation Mathématique et Simulation Numérique des Performances de Refroidissement de Différentes Unités de Réfrigération à Compression de Vapeur : Application de Nouveaux Fluides Frigorigènes

Youcef Maalem^{1*}, Hakim Madani¹, Mohammed Mehemmai¹

¹LESEI Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology, University of Batna 2, 05000 Batna, Algeria

Received : 2022-10-05

Accepted : 2023-01-08

Abstract: Research on working fluids of the HFO family (Hydro-Fluoro-Olefins) has become a subject of interest today because this type of fluid has good environmental properties. In this work, a simulation was performed to evaluate and compare the cooling performance (COP) of three HFO fluids (R1234yf, R1234ze (E) and R1216)) in four vapor compression refrigeration units (basic cycle, enhanced cycle with intermediate exchanger, improved cycle with ejector and improved cycle with intermediate exchanger and ejector) from a code developed in MATLAB engineering language. The study of the performance of these fluids was carried out for evaporation temperatures between (268.15 to 283.15 K) and condensation temperatures ranging from (313.15 to 328.15 K). The results obtained showed in particular that the improved cycle with intermediate exchanger and ejector produced an increment of COP compared to the other cycles and the COP obtained with the working fluid R1234ze (E) offers the maximum values compared to the other fluids in all cycles studied.

Key-words : Refrigeration units ; Modeling ; New refrigerants ; GWP ; COP.

Résumé: Les recherches sur les fluides de travail de la famille HFO (Hydro-Fluoro-Oléfines) sont devenues aujourd'hui un sujet d'intérêt pour la raison que ce type des fluides présente des bonnes propriétés environnementales. Dans ce travail, une simulation a été effectuée pour évaluer et comparer les performances de refroidissement (COP) de trois fluides HFO (R1234yf, R1234ze (E) et R1216)) dans quatre unités frigorifiques à compression de vapeur (cycle de base, cycle amélioré avec échangeur intermédiaire, cycle amélioré avec éjecteur et cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur) à partir d'un code développé en langage d'ingénierie MATLAB. L'étude des performances de ces fluides a été effectuée pour des températures d'évaporation comprises entre (268.15 à 283.15 K) et des températures de condensation allant de (313.15 à 328.15 K). Les résultats obtenus ont montré en particulier que le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur a produit un incrément de COP par rapport aux autres cycles et que le COP obtenu avec le fluide de travail R1234ze (E) offre les valeurs maximales par rapport aux autres fluides dans tous les cycles étudiés.

Mots-clés : Unités de réfrigération ; Modélisation ; Nouveaux réfrigérants ; PRG ; COP.

* Corresponding author: maalemyoucef1993@gmail.com

1. Introduction

Le refroidissement et le chauffage représentent une importante proportion de la demande globale en énergie pour l'humanité, où ils sont devenus aujourd'hui des besoins essentiels dans notre vie quotidienne à cause des différents services qu'elle fournit qui comprend plusieurs domaines (processus industriels dans la pétrochimie, industries domestiques, agroalimentaires, pharmaceutiques, etc.) [1]. Par les nombreuses techniques qui génèrent ces deux formes d'énergies et leurs multiples applications (froid, climatisation, chauffage, etc.), ils assurent des meilleures conditions de vie et de confort grâce aux échanges thermiques mis en œuvre par les opérations thermodynamiques (phénomènes endothermiques ou phénomènes exothermiques) des fluides de travail des différentes catégories de molécules nommés les fluides frigorigènes (ou fréons) qu'ils subissent dans les machines cycliques utilisés dans les domaines industrielles, commerciales et domestiques [2], cependant ces fluides de travail jouent un facteur important de la pollution de l'atmosphère.

À titre d'exemple, dans le domaine du génie climatique, les cycles thermodynamiques des systèmes énergétiques comme les unités de réfrigération, conditionnement d'air et les pompes à chaleur nécessitent, en effet, pour leur fonctionnement, l'utilisation des fluides de travail synthétiques (Fig.1), qui ont généralement des impacts néfastes pour l'environnement (Destruction de la couche d'ozone et Changement climatique) [3].



Fig. 1. Fluides frigorigènes usuels

En effet, à cause de l'impact négatif des gaz chlorés comme les CFC (Chloro-Fluoro-Carbure) et les HCFC (Hydro-Chloro-Fluoro-Carbure) sur l'environnement du fait de leur capacité de destruction de la couche d'ozone stratosphérique qui protège la planète terrestre contre les rayons ultraviolets (UV) du soleil (Fig.2) en raison de la présence du chlore (Cl) dans leurs molécules qui réagissent chimiquement avec les molécules d'ozone (O₃) [4], des conditions strictes sur l'utilisation de ce type des fluides chlorés ont été instaurées grâce à la coopération des pays industrialisés au cours des vingt dernières années, dans le cadre du protocole international de Montréal (Protection de la couche d'ozone), le secteur d'activité du froid et du génie climatique a réussi à pratiquement éliminer les CFC (R11, R12, R113, etc.) et à commencer à réduire l'utilisation et la production des HCFC (R22, R123, R142b, etc.) sur le marché des fluides frigorigènes à l'échelle mondiale.

Comme substituts aux substances chlorés CFC et HCFC, les HFC (Hydro-Fluoro-Carbure) ont été proposés par les chimistes et les producteurs de frigorigènes comme des

alternatives pour les gaz chlorés, ce qui a permis de réduire significativement la concentration de chlore dans l'atmosphère [5-6].

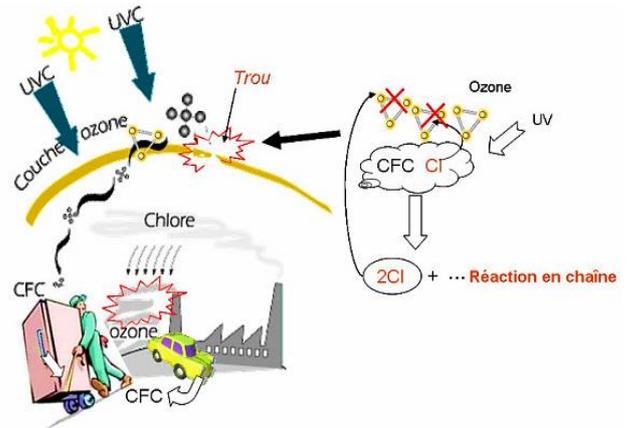


Fig. 2. Représentation du phénomène de destruction de la couche d'ozone

Vis-à-vis à la couche d'ozone, les HCFC ont un effet de pouvoir d'appauvrissement de la couche d'ozone (PAO ou ODP) moins réduit que les CFC où il n'atteint que 2 à 5 % de celui des derniers, mais ils ont été pris par des mesures d'interdiction et ont été remplacés par les gaz fluorés HFC (R134a, R152a, R125, etc.) car ils sont inoffensifs pour la couche d'ozone en raison que ces fluides ne contiennent plus de chlore dans leur composition chimique, cependant cette génération des HFC a engendré une autre complication environnementale qui est la contribution au réchauffement planétaire (Fig.3), où ils contribuent à l'échauffement de la planète en renforçant l'effet de serre comme le fluide de travail majoritairement du 1,1,1,2-tétrafluoroéthane de formule brute C₂H₂F₄, connu sous le nom de HFC-R134a. Il contribue grandement à l'effet de serre avec un potentiel de réchauffement global (PRG ou GWP) égal à 1430 [7], ce qui a conduit la communauté scientifique et les organisations internationales de protection du climat de classer ce fluide dans la catégorie des 7 gaz à effet de serre (GES) dont les émissions doivent être limitées (HFC, CO₂, N₂O, NF₃, CH₄, SF₆ et PFC).

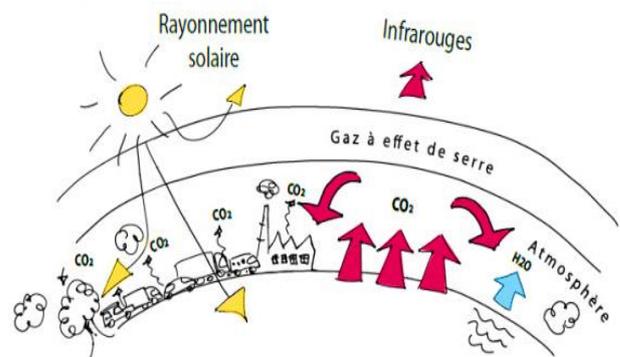


Fig. 3. Représentation du phénomène de réchauffement planétaire

À ce titre, les HFC ont également fait l'objet des réglementations suite au protocole international de Kyoto et

le règlement européen F-Gaz pour l'élimination progressive de son utilisation d'ici 2030 dû que ces fluides ayant un PRG supérieur à 150 [8], ce qui a constitué un enjeu important pour les acteurs du froid pour la recherche et l'exploitation de nouvelles solutions en matière de fluides frigorigènes moins polluants comme produits de remplacement immédiat ou à long terme pour ces fluides nuisibles à l'environnement afin de minimiser ces problèmes environnementaux mondiaux avec l'augmentation des besoins en froid dans les différentes industries et notamment l'industrie de production de froid durant ces dernières années.

Dans ce contexte général, des efforts approfondis de développement par nombreux scientifiques et écologistes ont été entrepris pour développer un certain nombre de nouveaux composés chimiques écologiques futurs qui répondent aux contraintes environnementales énoncées lors de protocoles de Kyoto et le règlement européen F-Gaz [9]. Parmi celles-ci qui suscitent un vif intérêt, on trouve les fluides de la famille prometteuse HFO (Hydro-Fluoro-Oléfines) en raison de leurs excellentes propriétés environnementales (très faible PRG et PAO nul (Fig.4)) qui laissent présager un impact favorable à long terme au climat que la génération précédente de HFC usuellement utilisée dans les machines cycliques. De plus, ces gaz ont été mis au point pour être compatibles avec tous les équipements frigorifiques [10].

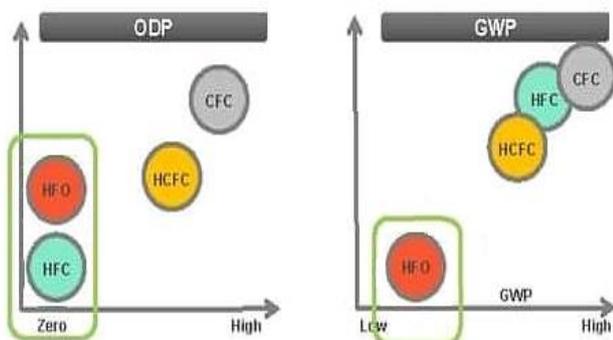


Fig. 4. Les différents fluides en fonction de leur impact environnemental

Actuellement les gaz de type HFO (R1234yf, R1234ze, R1233zd, etc.) sont considérés comme la nouvelle génération de fluides frigorigènes (4^{ème} génération), où ils sont destinés pour remplacer les anciens réfrigérants comme les fréons (R134a et R32) dans divers domaines de l'ingénierie frigorifique (applications frigorifiques, pompe à chaleur, conditionnement d'air, climatisation automobile, etc.) et pour cela des travaux de recherche considérables ont été réalisés dans la littérature scientifique pour l'application et l'évaluation des performances énergétiques des gaz HFO tel que le R1234yf (2,3,3,3-tetrafluoropropène) dans le système cyclique conventionnel à compression de vapeur par plusieurs chercheurs comme : Mota et al [11], Koyama et al [12], Zilio et al [13], Molés et al [14] et Koyama et al [15].

D'un autre côté, dans le cadre du développement durable (Fig.5) des groupes frigorifiques courantes à compression mécanique (groupes fonctionnent selon le cycle de réfrigération à compression de vapeur inventé par l'Américain Jacob Perkins) suite à leur utilisation pour les besoins de chauffage et de froid, les efforts des chercheurs ont été concentrés sur le développement des technologies innovantes dans la conception du circuit frigorifique à partir des modifications structurelles des systèmes classiques qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique des installations frigorifiques pour la génération du froid à cause des grandes pertes exergétiques (irréversibilités) qu'ils se trouvent dans ce type des installations qui sont liées généralement au processus de détente isenthalpique et de compression et qui en résultent un effet frigorifique relativement faible. De ce fait, plusieurs solutions ont été proposées par les constructeurs du domaine du génie climatique et énergétique pour changer l'architecture du cycle classique par l'incorporation des organes énergétiques (comme l'introduction d'un échangeur intermédiaire, l'utilisation de la turbine, l'utilisation d'un éjecteur, la combinaison entre ces modifications, etc.) afin d'améliorer ses performances de réfrigération. Parmi les propositions qui ont été effectuées en forte voie de développement, la technologie des machines à compression mécanique dans laquelle la détente du fluide frigorigène est assurée par un éjecteur (appareil constitué de deux tuyères coaxiales liées entre elles par un collecteur d'aspiration (Fig.6)) au lieu des détendeurs traditionnels (tubes capillaires, détendeurs thermostatiques, vannes de détente, etc.) a suscité un vif intérêt par rapport aux autres technologies en raison : de bonne performance de refroidissement (COP) que présentent les cycles frigorifiques avec éjecteur par rapport au cycle frigorifique de base (Cycle traditionnel) usuellement déployés, de faible consommation d'énergie (travail mécanique) pour entraîner le compresseur [16] et les multiples avantages qui présente le cœur (l'éjecteur de détente) de ce type des machines cycliques à éjecteur comme la conception simple qui comportant peu d'éléments, la flexibilité d'emploi, le faible poids, la grande sécurité, la possibilité d'absorber n'importe quel fluide de travail dans n'importe quelle condition, appareil sans pièces mobiles, et donc moins d'entretien, grande variété de matériaux pour le concevoir, aucune alimentation externe nécessaire, etc.

En effet, cette technologie prometteuse connaît un développement croissant depuis quelques années du fait de ses qualités énergétiques et économiques [17]. Plus récemment, ces machines cycliques équipées d'éjecteur font l'objet de travaux de recherche par de nombreux énergéticiens, ces travaux ont porté sur des prévisions de performances énergétiques (théoriques et expérimentales) et des tests de performance de composants utilisant des composés frigorigènes de différentes molécules (composés fluorés, naturels, etc.).

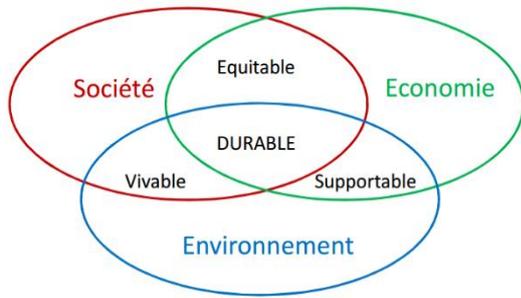


Fig. 5. Développement durable

Afin de réduire les pertes exergetiques dans le système conventionnel, Kornhauser [18] a proposé d'introduire un éjecteur diphasique dans la machine frigorifique à compression à la place du détendeur thermostatique pour changer le processus isenthalpique en un processus isentropique, où il a fait une analyse théorique des performances d'un cycle de réfrigération sans et avec éjecteur qui fonctionnant avec le gaz R12, il constate une amélioration de COP de plus de 21% par rapport à celui d'un cycle conventionnel pour une température de l'évaporateur de 15°C et une température du refroidisseur de 30°C. Nehdi et al [19] ont effectué une comparaison de plusieurs fluides frigorigènes synthétiques (R115, R123, R23, R141b, etc.) dans le cycle de base et le cycle de réfrigération à détente par éjecteur diphasique, ils ont constaté que le R141b donne des performances maximales, où le COP a été amélioré jusqu'à 20 %. Dans une autre étude, Sarkar [20] a fait une étude théorique sur les performances des réfrigérants naturels (isobutane (R600a), ammoniac (R717) et propane (R290)) dans une machine cyclique à éjecteur, les résultats ont montré qu'une amélioration maximale des performances du système frigorifique a été obtenue dans le cas du l'isobutane (R600a), tandis que l'amélioration minimale des performances a été atteinte pour l'ammoniac (R717).

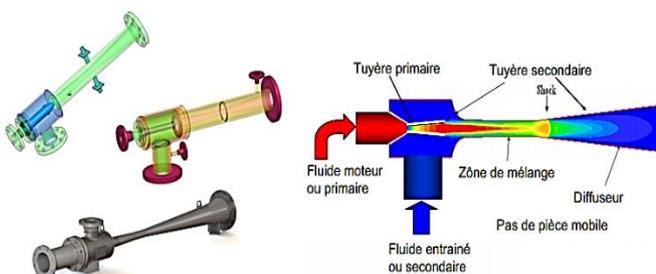


Fig. 6. Technologie des éjecteurs

Dans l'étude de Disawas et Wongwises [21], les auteurs ont expérimenté et analysé une installation de réfrigération conventionnelle par rapport à un système de réfrigération à éjecteur avec les fréons traditionnels, la seule différence entre les deux systèmes était l'inclusion d'un éjecteur, il a été constaté que la présence de l'éjecteur dans le cycle a déclenché une augmentation de COP et en même temps, une diminution du rapport de pression du compresseur. Une comparaison théorique des performances du cycle de réfrigération à éjecteur avec le cycle conventionnelle utilisant le R134a et le R1234yf comme fluides frigorigènes a

été réalisée par Li et al [22], une amélioration du COP de 5,9 % entre les deux cycles a été notée. Zhao et al [23] ont étudié les performances du cycle de réfrigération à éjecteur avec le mélange zéotrope (R134a/R143a), les résultats simulés ont révélé que le COP obtient une valeur maximale de 4,18 avec une fraction massique de 0,9 et donne une valeur minimale de 3,66 avec une fraction massique de 0,5. Boumaraf et al [24] ont proposé et analysé une modification de système de réfrigération avec éjecteur pour surmonter les contraintes liées au fonctionnement permanent du séparateur et de l'éjecteur dans le cycle de réfrigération à éjecteur de base. Ils ont étudié les fluides de travail (R134a et R1234yf) comme réfrigérants et ont conclu que le COP du nouveau système frigorifique est plus élevée pour le R1234yf, en particulier à des hautes températures de condensation. L'étude de Deng et al [25] ont montré que le COP de refroidissement maximal du cycle trans-critique avec éjecteur fonctionnant au CO₂ (R744) est supérieur que d'un cycle de réfrigération conventionnelle de compression de vapeur de 22 % et la capacité de refroidissement de ce cycle est supérieure de 11.5 % comparé au même cycle.

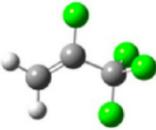
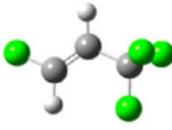
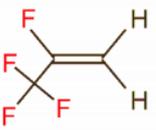
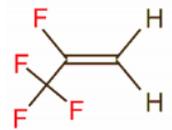
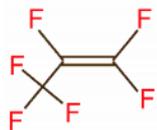
À partir de l'analyse bibliographiée sur l'état de l'art concernant les avancées technologiques réalisées sur l'application et l'évaluation des fluides Hydro-Fluoro-Oléfines (HFO) dans l'équipement frigorifique à compression, elle nous amène à conclure que l'utilisation et l'évaluation des performances de refroidissement des différents fluides de travail du type HFO n'ont pas reçu un intérêt considérable dans les différents systèmes frigorifiques à compression de vapeur dans les études précédentes, où la plupart des publications ont été focalisées sur l'évaluation des performances dans la machine frigorifique conventionnelle avec un seul fluide qui est le R1234yf, contrairement aux autres équipements frigorifiques. Par contre, il n'y a pas des études qui ont été menées jusqu'à présent sur l'utilisation des gaz HFO (comme le R1234ze(E), R1216, R1234yf, etc.) en tant que fluide frigorigène dans les installations de réfrigération innovantes. De plus, Il y'a disette des travaux traitant les études comparatives entre les efficacités frigorifiques de ces installations qui fonctionnent avec les gaz HFO dans les ouvrages cités dans la littérature scientifique a l'heure actuelle, ce qui pose un champ d'intérêt de recherche pour orienter et consacré nos recherches sur toute ces thématiques mentionner et pour cela dans le présent travail, nous essayerons d'apporter plus d'éclaircissement et de lumière à ces axes de recherche.

Le travail présenté dans cette étude est relatif à l'étude et l'évaluation des performances énergétiques des machines de réfrigération à compression innovantes, l'inscrit donc dans le cadre de la recherche des fluides de travail et des cycles thermodynamiques performants pour la production du froid. On s'intéresse plus spécialement dans le présent travail à l'étude des performances de refroidissement de quatre configurations de réfrigération à compression de vapeur (cycle de base, cycle amélioré avec échangeur intermédiaire, cycle amélioré avec éjecteur et cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur) avec l'utilisation de trois candidats de fluides de la future génération de

frigorigènes respectueux de l'environnement (fluides répondant à la limite imposée du PRG < 150). Il s'agit des fluides novateurs : R1234yf, R1234ze(E) et R1216. Le Tableau 1 regroupe les propriétés thermo-physiques et environnementales des fluides étudiés. Notre étude a été en particulier focalisée sur les cycles améliorés avec échangeur intermédiaire et éjecteur, à savoir le fluide et le cycle le plus

performant. Pour atteindre ces objectifs, un simulateur de simulation thermodynamique des cycles de fonctionnement des quatre configurations de réfrigération mentionnées ci-dessus a été mis au point. Par ailleurs, les effets des niveaux des températures du condenseur et l'évaporateur sur les performances de refroidissement de ces configurations ont aussi été examinés.

Tableau 1 .Caractéristiques des réfrigérants HFO étudiés [7 ; 26-27]

Identifiant du réfrigérant	R1234yf	R1234ze(E)	R1216
Structure du molécule			
Structure chimique			
Formule chimique	CF ₃ -CF=CH ₂	Trans-CF ₃ -CH=CHF	CF ₃ -CF=CF ₂
N° CAS	754-12-1	29118-24-9	116-15-4
Masse moléculaire (kg/kmol)	114.04	114.04	150.03
Point d'ébullition (K)	243.67	254.18	242.81
Température critique (K)	367.85	382.51	358.9
Pression critique (MPa)	3.3823	3.6349	3.136
Code de sécurité ASHRAE	A2L	A2L	A2L
PRG/GWP	4	6	1
PAO/ODP	0	0	0

2. Cycles thermodynamiques étudiés

Les unités frigorifiques à compression de vapeur permettent, moyennant un apport énergétique (W), d'extraire de la chaleur aux milieux à refroidir (source froide). Elles rejettent cette chaleur accompagnée de l'équivalent thermique de l'énergie reçue, à température plus élevée, dans le milieu ambiant (sources chaude). Dans ce type des unités de production de froid, le fréon avait subi le phénomène d'ébullition et de condensation dans un circuit frigorifique fermé. Dans ce présent travail, quatre

unités frigorifiques de type à compression de vapeur qui sont : cycle frigorifique conventionnelle à compression de vapeur et les cycles frigorifiques améliorés avec échangeur intermédiaire et éjecteur ont été choisis pour la simulation des performances de refroidissement des fluides de travail Hydro-Fluoro-Oléfines (HFO). Les schémas de principe et les diagrammes (p-h) correspondant de ces unités frigorifiques sont représentés respectivement sur la figure 7.

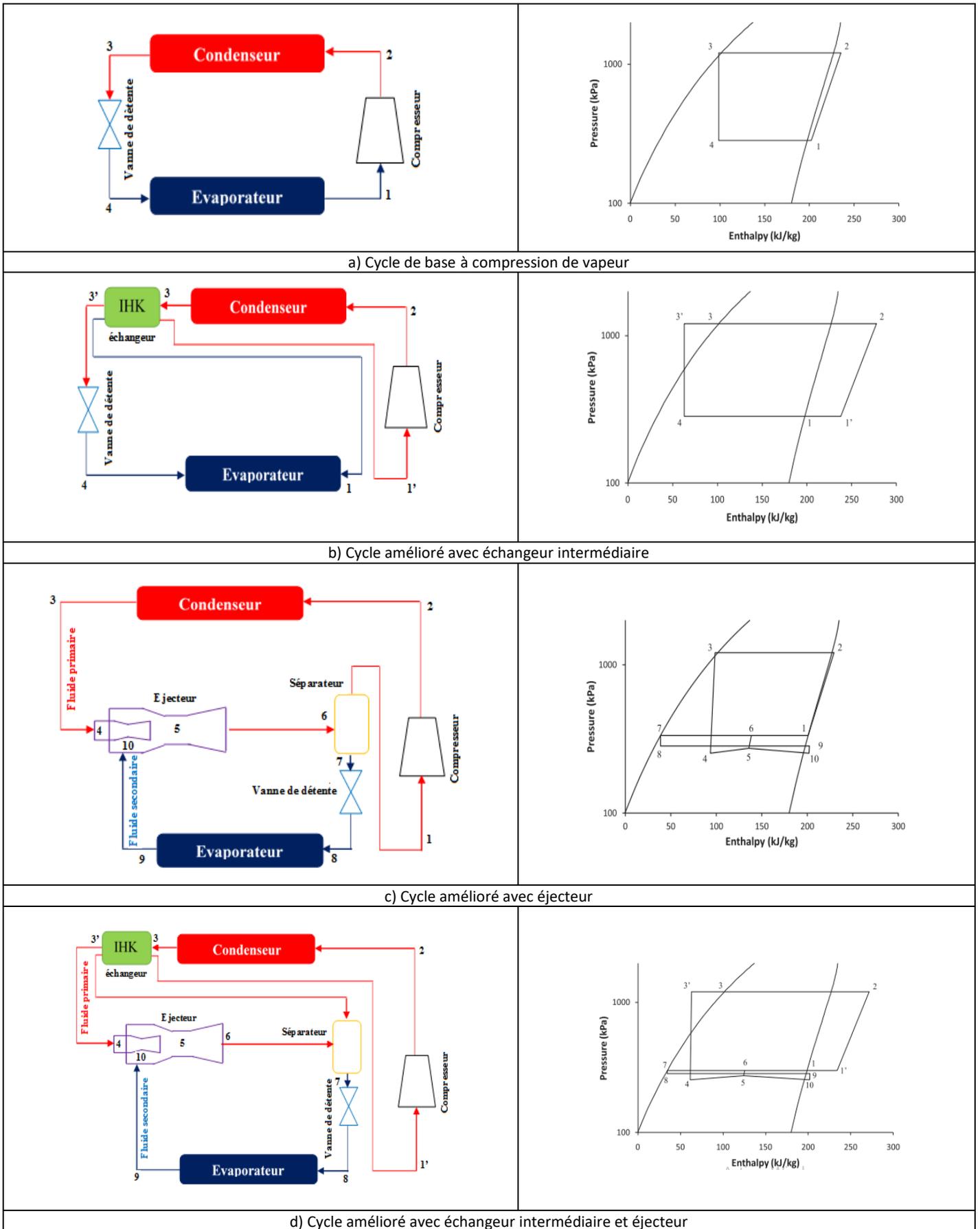


Fig.7. Unités de réfrigération étudiée

Les points numérotés dans les cycles thermodynamiques représentent les points caractéristiques des changements d'état du fluide frigorigène dans chaque circuit frigorifique.

3. Modélisation thermodynamique

Dans cette section, nous allons décrire l'approche thermodynamique basée sur la modélisation des unités frigorifiques citées ci-dessus dans le but de simuler leur fonctionnement en utilisant les fluides mentionnés comme fluides frigorigènes en plus tard.

3.1 Hypothèses de calcul

Pour évaluer les performances de refroidissement des différentes unités de réfrigération à compression de vapeur représentées dans la figure 7, nous avons fait les hypothèses de calcul suivantes :

- Le flux à travers l'appareil de l'éjecteur est considéré comme homogène, permanent et unidimensionnel ;
- L'énergie cinétique du fluide à l'entrée et à la sortie de l'appareil de l'éjecteur est négligeable ;
- Le fluide primaire et le fluide secondaire qui reçoit l'éjecteur à l'entrée atteignent la même pression à l'entrée de la section de la zone de mélange de l'appareil de l'éjecteur ;
- Les pertes lors des processus dans l'éjecteur sont prises en compte à l'aide de rendements isentropiques ;
- Les rendements isentropiques des différents composants de l'éjecteur restent constantes ;
- Les réfrigérants sortant de l'évaporateur et du condenseur sont considérés à l'état saturé ;
- Les pertes de charge dans les échangeurs de chaleur, dans le séparateur liquide-vapeur et dans les différentes canalisations sont négligées ;
- Les pertes thermiques dans les échangeurs de chaleur sont négligées ;
- Les évolutions thermodynamiques dans les échangeurs de chaleur sont isobares ;
- Aucun transfert de chaleur vers l'environnement, sauf dans le condenseur ;
- Les flux de liquide et de vapeur séparés dans le séparateur liquide-vapeur sont à l'état saturé ;
- Le liquide et la vapeur du mélange de séparation dans le séparateur liquide-vapeur est isobare ;
- Les variations de l'énergie cinétique et potentielle sont négligeables dans l'évaporateur, le compresseur, le condenseur, la vanne de détente et l'échangeur intermédiaire ;

- Le compresseur fonctionnent avec une valeur de rendement isentropique appropriée ;
- Le flux à travers la vanne de détente est isenthalpique.

Avec les hypothèses de base mentionnées ci-dessus, les modèles thermodynamiques et énergétiques des unités de réfrigération sont établis.

3.2 Analyse thermodynamique

Le calcul de la performance énergétique des systèmes de production de froid, nécessite le calcul des enthalpies des fluides de travail des différents états des cycles frigorifiques (Fig.7), qui interviennent dans la relation finale de l'efficacité frigorifique des cycles de réfrigération étudiées et pour cela nous allons dans un premier temps, développés une méthodologie générale pour la détermination des variables thermodynamiques (P, h, S, etc.) des différents organes des cycles thermodynamiques afin de mettre en évidence les performances de refroidissement pour chaque installation frigorifique en utilisant les fluides de travail sélectionnés.

3.2.1 Condenseur

À la sortie du condenseur, nous avons :

$$P_c = f(T_c, x = 0) \quad (1)$$

$$h_c = f(T_c, x = 0) \quad (2)$$

$$s_c = f(T_c, x = 0) \quad (3)$$

3.2.2 Évaporateur

À la sortie de l'évaporateur, nous avons :

$$P_e = f(T_e, x = 1) \quad (4)$$

$$h_e = f(T_e, x = 1) \quad (5)$$

$$s_e = f(T_e, x = 1) \quad (6)$$

3.2.3 Compresseur

Au refoulement du compresseur, nous avons :

$$h_{comp, is, sortie} = f(p_{comp, is, sortie} \cdot s_{comp, sortie}) \quad (7)$$

$$h_{comp, sortie} = h_{comp, entrée} + \frac{h_{comp, is, sortie} - h_{comp, entrée}}{\eta_{comp}} \quad (8)$$

Le rendement isentropique de compression est obtenu en utilisant l'expression suivante [28] :

$$\eta_{comp} = 0.874 - 0.0135 \left(\frac{P_c}{P_e} \right) \quad (9)$$

3.2.4 Vanne de détente

À la sortie de la vanne de détente, nous avons :

$$h_{vd,entr\acute{e}e} = h_{vd,sortie} \quad (10)$$

3.2.5 Échangeur intermédiaire

Au niveau de l'échangeur intermédiaire, nous avons :

$$\varepsilon = \frac{T_{froid,sortie} - T_{froid,entr\acute{e}e}}{T_{chaud,entr\acute{e}e} - T_{froid,entr\acute{e}e}} \quad (11)$$

$$T_{froid,sortie} = T_e + \Delta T_{sc} \quad (12)$$

$$T_{chaud,entr\acute{e}e} = T_c - \Delta T_{sr} \quad (13)$$

3.2.6 Éjecteur

L'éjecteur est le cœur des systèmes de réfrigération à éjecteur (cycle amélioré avec éjecteur et cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur) sur lequel les performances de refroidissement des systèmes frigorifiques dépendent, où il sert principalement de diminuer les pertes thermodynamiques par la conversion de l'énergie cinétique du mélange des jets primaires et secondaires en énergie de pression dans le diffuseur de l'éjecteur, ce qui entraîne une augmentation de la pression en aspiration du compresseur. Donc plus d'attention est accordée à la modélisation et la prédiction de la performance (rapport d'entraînement) de ce dispositif qui est définie par le rapport des débits massiques des deux fluides (haute pression et basse pression) qui reçoit l'éjecteur à l'entrée (Fig.8).

Le rapport d'entraînement (μ) de l'éjecteur est donné par l'équation suivante :

$$\mu = \frac{m_s}{m_p} \quad (14)$$

Où (m_s) et (m_p) sont respectivement, les débits massiques du fluide à basse pression (appelé fluide secondaire ou aspiré) et le fluide à haute pression (appelé fluide moteur ou primaire).

La figure 8 représente une vue schématique des différentes parties de l'éjecteur étudié.

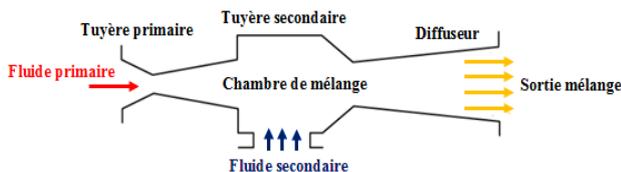


Fig. 8. Vue schématique des différentes parties de l'éjecteur

L'éjecteur se compose d'une tuyère primaire (tuyère convergente-divergente), d'une tuyère secondaire, d'une chambre de mélange et d'un diffuseur à la sortie.

- **Tuyère primaire** : zone de détente du flux moteur (fluide primaire) ;
- **Tuyère secondaire** : zone de détente du flux entraîné (fluide secondaire) ;
- **Chambre de mélange** : zone de mélange des deux fluides (fluide primaire et fluide secondaire) qui reçoit l'éjecteur à l'entrée ;
- **Diffuseur** : zone de compression de mélange.

Il existe deux types de modèle monodimensionnel d'éjecteurs pour la simulation numérique, le modèle à "section de mélange constante" et le modèle à "pression de mélange constante", ces modèles sont les plus communément utilisés dans la littérature scientifique parce qu'ils sont plus faciles à valider.

La plupart des ouvrages cités dans la littérature scientifique [16-17] mentionnent que le modèle à pression de mélange constante fournit une meilleure performance qu'un mélange à section constante. Alors, pour prédire les performances de l'éjecteur dans ce travail nous utilisons le modèle à pression de mélange constante.

À partir des conditions initiales des conditions de fonctionnement, du rapport d'entraînement (μ) et des valeurs fixées des rendements isentropiques des différents composants de l'éjecteur, les variables de l'écoulement du modèle de fonctionnement de l'éjecteur choisie sont déterminées dans la partie suivante :

3.2.6.1 Tuyère primaire

La tuyère primaire (tuyère motrice) permet de fluide moteur de la conversion de son enthalpie en énergie cinétique pour entraîner le fluide aspiré (fluide secondaire).

Les modèles thermodynamiques qui caractérisent l'état de sortie du fluide primaire dans cette tuyère motrice sont données par les équations suivantes :

$$P_p = P_e + \Delta P \quad (15)$$

$$h_{p,is} = f(P_p, S_c) \quad (16)$$

$$h_p = h_c - \eta_p (h_c, h_{p,is}) \quad (17)$$

$$v_p = 2\sqrt{(h_c - h_p)} \quad (18)$$

3.2.6.2 Tuyère secondaire

La tuyère secondaire port du vapeur qui vienne de l'évaporateur pour être entraîné et aspirer par le fluide moteur.

Les modèles thermodynamiques qui caractérisent l'état de sortie du fluide secondaire sont données par les équations mathématiques suivantes :

$$P_s = P_e + \Delta P \quad (19)$$

$$h_{s,is} = f(P_s, S_e) \quad (20)$$

$$h_s = h_e - \eta_s (h_e, h_{s,is}) \quad (21)$$

$$v_s = 2\sqrt{(h_e - h_s)} \quad (22)$$

3.2.6.3 Chambre de mélange

Après la décompression du fluide moteur dans la tuyère motrice et l'aspiration du fluide secondaire par le fluide primaire, les deux fluides se mélangent dans la chambre de mélange.

Les modèles thermodynamiques qui caractérisent l'état de sortie du mélange dans cette chambre sont données par les modèles suivantes :

$$P_m = P_p = P_s \quad (23)$$

$$v_m = \sqrt{\eta_m} \left(\frac{1}{1+\mu} v_p + \frac{\mu}{1+\mu} v_s \right) \quad (24)$$

$$h_m = \frac{1}{1+\mu} \left(h_p + \frac{v_p^2}{2} \right) + \frac{\mu}{1+\mu} \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} \right) - \frac{v_m^2}{2} \quad (25)$$

$$s_m = f(P_m, h_m) \quad (26)$$

3.2.6.4 Diffuseur

Dans la zone de diffuseur de l'éjecteur, le fluide mélangé convertissant son énergie cinétique en énergie de pression. Les modèles mathématiques du fluide mélangé qui se comprime à travers le diffuseur de l'éjecteur est donné par :

$$h_{diff} = h_m + \frac{v_m^2}{2} \quad (27)$$

$$h_{diff,is} = h_{diff} + \eta_{diff} (h_{diff} - h_m) \quad (28)$$

$$P_{diff} = f(h_{diff,is}, S_{diff}) \quad (29)$$

$$x_{diff} = f(h_{diff}, P_{diff}) \quad (30)$$

Le titre du fluide frigorigène au refoulement de l'éjecteur doit soumettre à une égalité avec l'équation (31) si non on suppose une autre valeur de rapport d'entraînement (μ_0) et on répète le calcul (de l'équation 14 à l'équation 31) :

Le titre de vapeur à la sortie de l'éjecteur :

$$x_{diff} = \frac{1}{1+\mu} \quad (31)$$

3.2.7 Séparateur liquide-vapeur

À la sortie du séparateur liquide-vapeur, nous avons :

$$h_{Sép,V,sortie} = f(P_{diff}, x=1) \quad (32)$$

$$h_{Sép,L,sortie} = f(P_{diff}, x=0) \quad (33)$$

3.3 Bilan énergétique

En dressant un bilan énergétique dans cette partie pour les deux principaux composants (le compresseur et l'évaporateur) des cycles de réfrigération à partir du premier principe de la thermodynamique afin d'évaluer les performances de refroidissement, on obtient :

3.3.1 Modèles de compresseur

Le travail consommé par le compresseur dans le cycle de base et le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire est donné par l'expression suivante :

$$w_{comp} = (h_{comp,sortie} - h_{comp,entrée}) \quad (34)$$

Le travail consommé par le compresseur dans le cycle amélioré avec éjecteur et le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur s'exprime sous la forme :

$$w_{comp} = \frac{(h_{comp,sortie} - h_{comp,entrée})}{1+\mu} \quad (35)$$

3.3.2 Modèles de l'évaporateur

La chaleur retirée de l'évaporateur dans le cycle de base et le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire est donné par :

$$q_{évap} = (h_{évap,sortie} - h_{évap,entrée}) \quad (36)$$

La chaleur retirée de l'évaporateur dans le cycle amélioré avec éjecteur et le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur est donnée par l'équation suivante :

$$q_{évap} = \frac{\mu(h_{évap,sortie} - h_{évap,entrée})}{1+\mu} \quad (37)$$

Pour caractériser et évaluer d'un point de vue énergétique, l'efficacité frigorifique de chaque système de production de froid, nous utilisons le coefficient de performance (COP) qui est définie comme le rapport entre la quantité de froid produite dans le milieu réfrigéré (la chaleur extraite de la source froide) et l'énergie mécanique (travail consommé) fournie au système frigorifique.

Le coefficient de performance des différents systèmes frigorifiques utilisés dans cette étude (cycle frigorifique conventionnel et les cycles améliorés avec échangeur intermédiaire et éjecteur) est exprimé comme suit :

$$COP = \frac{q_{\text{évap}}}{w_{\text{comp}}} \quad (38)$$

À partir des équations établies précédemment, un simulateur de simulation numérique pour la génération de courbes des performances incluant une base de données nommée REFPROP V9.0 (outil de calcul de propriétés thermodynamiques des fluides de travail important dans l'industrie) à été construit et élaboré en langage d'ingénierie MATLAB pour la simulation numérique et la comparaison des performances de refroidissement des cycles thermodynamiques étudiés en utilisant les nouveaux fluides synthétiques (HFO) de la quatrième génération pour différentes conditions de fonctionnement. Les variables impliquées dans le simulateur de simulation des réfrigérants HFO sont extraites par le biais de REFPROP V9.0 qui nous permet de calculer les propriétés thermophysiques (enthalpie, entropie, pression, température, etc.) des réfrigérants HFO dans tous points caractéristiques des cycles frigorifiques à partir des équations de thermodynamiques et de propriété de transport les plus précises connues à ce jour.

Les conditions de fonctionnement adoptées pour la simulation des unités de réfrigération sont données par le Tableau 2.

Tableau 2. Conditions de fonctionnement pour la simulation des unités de réfrigérations étudiées

Paramètres de fonctionnement	Valeurs
La température d'évaporation (Te)	268.15 K
La température de la condensation (Tc)	313.15 K
Le degré de surchauffe (ΔT_{sc})	5 K
Le degré de sous-refroidissement (ΔT_{sr})	2 K
Le rendement isentropique de la tuyère primaire (η_p)	85 %
Le rendement isentropique de la tuyère secondaire (η_s)	85 %
Le rendement isentropique de la chambre de mélange (η_m)	95 %
Le rendement isentropique du diffuseur (η_{diff})	85 %
L'efficacité thermique de l'échangeur interne (ϵ)	80 %

La procédure adoptée pour le calcul des performances de différentes installations frigorifiques est illustrée par l'organigramme de la figure 9.

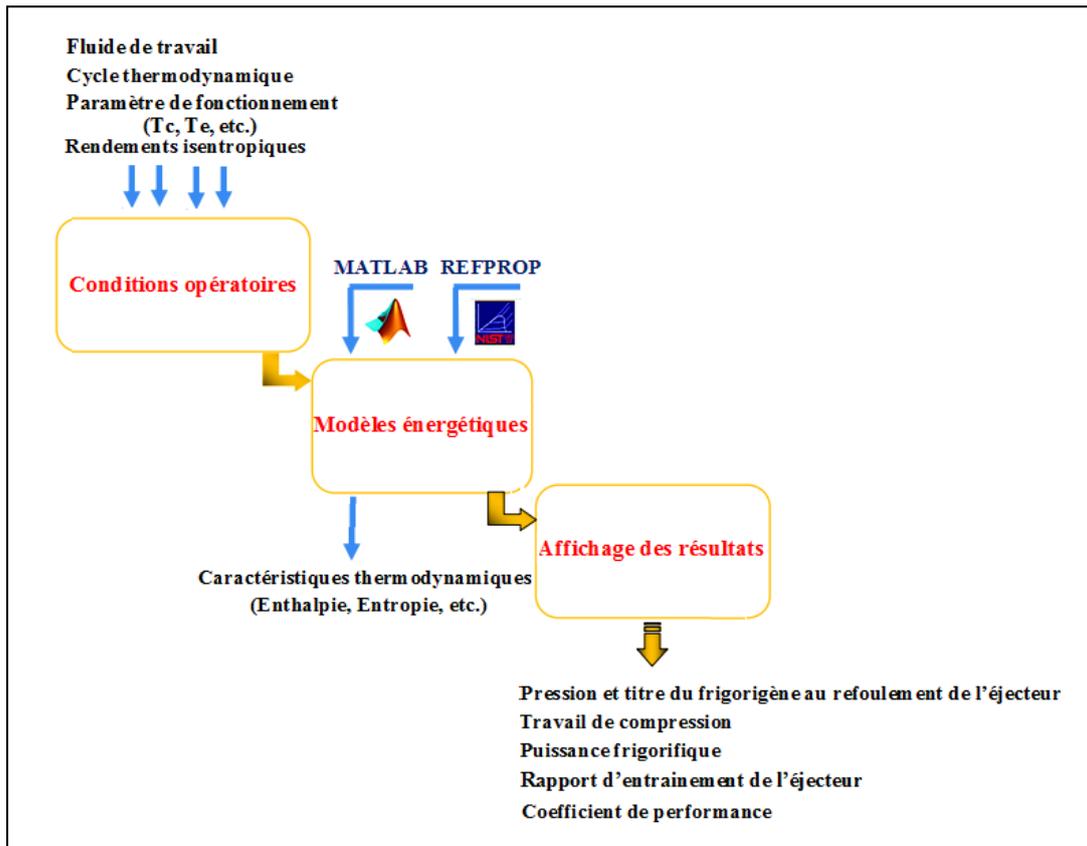


Fig. 9. Schéma illustrant l'échange de données entre les blocs de simulation

3.4 Processus de calcul des performances

La méthodologie de calcul des performances commence par la déclaration des constantes (l'efficacité thermique de l'échangeur interne, rendement isentropiques des différents éléments de l'éjecteur, température de surchauffe à l'évaporateur et la température de sous-refroidissement au condenseur) et l'estimation initiale des données de températures imposées (températures de condensation et d'évaporation) et rapport d'entraînement de l'éjecteur. Avec ces données et à travers les relations thermodynamiques décrit dans les sections précédentes (modèles comprend 38 équations qui intègre tous les composants des cycles et qui font intervenir plusieurs variables implémenté dans l'outil de calcul numérique MATLAB), il est possible de calculer les variables thermodynamiques et énergétiques des unités frigorifiques. Pour calculer les propriétés thermodynamique des fluides de travail ainsi que le COP on suit les étapes suivantes :

- **Étape 1** : Nous choisissons un cycle opératoire ;
- **Étape 2** : Nous sélectionnons les fluides de travail ;
- **Étape 3** : Une fois le cycle et les fluides sont choisie, nous introduisant les conditions opératoires (déclaration des constantes, initialisation des données de températures imposées et rapport d'entraînement (μ_0) si le cycle opératoire choisie est constitué d'un éjecteur) ;
- **Étape 4** : Nous spécifions et déclarons les variables thermodynamiques et énergétiques du cycle frigorifique choisie ;
- **Étape 5** : À partir des 38 relations établies ci-dessus, nous choisissons et nous utilisons les formules mathématiques adéquat pour les composants du cycle opératoire choisie afin d'obtenir les variables thermodynamiques dans l'étape suivante ;
- **Étape 6** : Nous calculons les valeurs de toutes les variables du cycle opératoire choisie (variables d'état+ rendement isentropique (η_{comp}) du compresseur) par l'intermédiaire de REFPROP V9.0 qui a été couplé avec l'algorithme de résolution dans MATLAB ;
- **Étape 7** : Si le cycle opératoire choisie est constitué d'un éjecteur, le calcul de la pression (P_{diff}) et le titre de vapeur (x_{diff}) à la sortie du diffuseur ainsi que le rapport d'entraînement de l'éjecteur (μ) se fait dans une boucle par le système d'équations (14-31) dans MATLAB à l'aide de REFPROP V9.0 qui nous permet de déterminer les valeurs de toutes les variables des caractéristiques de l'écoulement le long de l'éjecteur à partir d'un processus du calcul itératif jusqu'à la convergence du calcul, où le titre de vapeur doit soumettre à cette condition ($(x_{diff} - x'_{diff}) \leq 0.001$) si non, nous retournons à l'étape 3 et on suppose une autre valeur de rapport d'entraînement (μ_0) et on répète le calcul (de l'équation 14 à l'équation 31) ;

- **Étape 8** : À partir des résultats de l'enthalpie spécifique obtenus dans l'étape 6 pour les entrées et sorties du compresseur et l'évaporateur, nous calculons les valeurs de travail de compression du compresseur (w_{comp}) et la production frigorifique ($q_{évap}$) par les formules mathématiques (de l'équation 34 à l'équation 37) adéquat du cycle opératoire choisie, ensuite nous retournons à l'étape 3 et on répète le calcul pour des autres valeurs de températures imposées ;
- **Étape 9** : Finalement, et d'après le calcul développé, nous calculons le COP du cycle choisie par l'équation 38 pour tous les températures imposées et nous présenterons les résultats de (COP et μ si le cycle choisie est constitué d'un éjecteur) sous forme de visualisation graphique.

4. Présentation des résultats

Cette section est consacré à la présentation des résultats de simulation numérique des performances de refroidissement des fluides de travail (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) qui fonctionnent aux mêmes conditions de températures des sources chaudes et froides dans les quatre unités frigorifiques à compression de vapeur, ainsi que leurs discussions et interprétations.

4.1 Validation du modèle de simulation

Avant de démarrer la simulation pour tester et d'étudier les performances de refroidissement des réfrigérants HFO dans les unités frigorifiques concernées dans cette étude, il est indispensable de vérifier et valider l'exactitude des résultats numériques du modèle de simulation développé avec les études existant dans la littérature scientifique. Pour la vérification, nous exposons l'évolution de COP en fonction de la température du condenseur, la validation du modèle numérique a été faite en comparant les résultats des calculs avec les travaux disponibles dans la littérature ouverte de Sarkar [20] et Li et al [22] en gardent la même configuration de production de froid (cycle amélioré avec éjecteur), les même conditions de fonctionnement ($T_e=5^\circ\text{C}$, $T_c=35$ à 55°C , $\eta_p=\eta_s=\eta_{diff}=0.85$ et $\eta_m=0.95$) et le même fluide de travail isobutane (R600a).

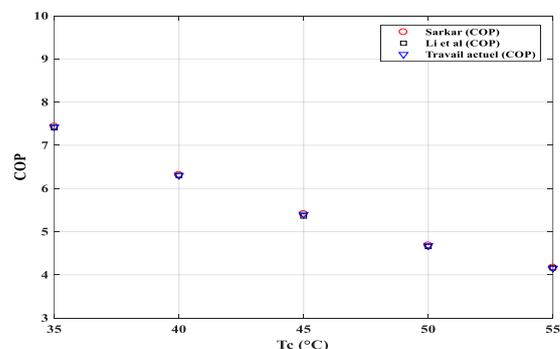


Fig. 10. Comparaison entre le modèle actuel et les données de la littérature de Sarkar [20] et Li et al [22]

On remarque sur la figure 10, qu'il y a une bonne approche entre nos résultats obtenus par le modèle de simulation développé et ceux exposés par Sarkar et Li et al ; ce qui confirme leur validité, cela permet l'utilisation de ce modèle dans la description des performances des cycles frigorifiques à compression de vapeur dans des conditions différentes et avec d'autres fluides.

Après avoir mis au point et validé notre modèle de simulation grâce aux données disponibles dans la littérature scientifique, dans ce qui suit, nous allons effectuer une étude énergétique et comparative sur les configurations de réfrigération discutées précédemment, où on va s'intéresser à la variation du coefficient de performance des trois fluides (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) en fonction de la température du condenseur (T_c) et la température de l'évaporateur (T_e) qui influent directement sur le COP des machines frigorifiques.

4.2 Variation du COP en fonction de la température du condenseur

On fait l'étude pour les performances des trois fluides choisie (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) en fonction de la variation de la température du condenseur ($T_c = [313.15 ; 318.15 ; 323.15 ; 328.15]$ K) en gardant la température de l'évaporateur ($T_e = 268.15$ K).

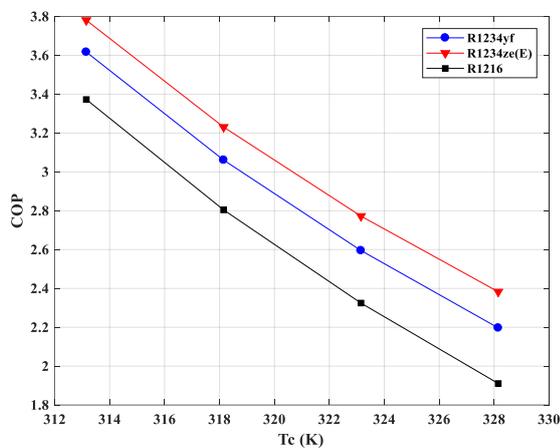


Fig. 11. L'effet de la température du condenseur sur le COP du cycle de base

La figure 11 représente la variation de la performance de refroidissement des fluides frigorigènes écologiques : R1234yf, R1234ze (E) et R1216 dans le cycle de réfrigération conventionnelle (cycle opératoire de base) en fonction des températures du condenseur (T_c) qui allant de 313.15 à 328.15 K, et une température d'évaporation (T_e) constante de 268.15 K.

À partir des courbes de variation des performances de refroidissement (COP) des fluides frigorigènes écologiques, on peut constater que les valeurs du coefficient de

performance (COP) baisse pour chaque fluide frigorigène lorsque la température du condenseur augmente (cela influe directement sur le refroidissement). Cette variable est directement liée à la variation d'enthalpie du condenseur.

On note que les valeurs maximales des performances de refroidissement (COP) du cycle frigorifique conventionnel ont été obtenue dans le cas du fluide R1234ze(E) (un fluide qui présente un potentiel de réchauffement global (PRG) égal à 6), tandis que les valeurs minimales des performances de refroidissement ont été atteinte respectivement pour les fluides de travail R1216 (PAO=0, PRG= 1) et le plus étudié actuellement (R1234yf (PAO=0, PRG=4)) pour tout l'intervalle de température de condensation (T_c) étudié.

Le COP des fluides frigorigènes : R1234ze (E), R1216 et R1234yf diminue de (3.7807 à 2.3829), (3.3728 à 1.9106) et de (3.6170 à 2.1968) respectivement, lorsque la température de condensation passe (de 313.15 à 328.15 K).

On peut expliquer ces résultats par le fait que l'augmentation de la température de condensation (T_c) implique une augmentation de l'enthalpie à la sortie du condenseur (h_3), tandis que l'enthalpie à la sortie de l'évaporateur (h_1) de cycle opératoire reste constante, ce qui provoque une diminution de la production frigorifique et par suite, une diminution de coefficient de performance de la machine frigorifique conventionnel.

En revanche, R1234ze(E) à un COP plus élevé en raison de sa valeur de chaleur latente d'évaporation la plus élevée ($L_v(\text{R1234ze(E)}) = 193.1 \text{ kJ/kg} > L_v(\text{R1234yf}) = 172.3 \text{ kJ/kg} > L_v(\text{R1216}) = 159 \text{ kJ/kg}$) et son point critique, ce qui permet à ce fluide d'avoir un COP plus élevé par rapport aux autres fluides (R1234yf et R1216) .

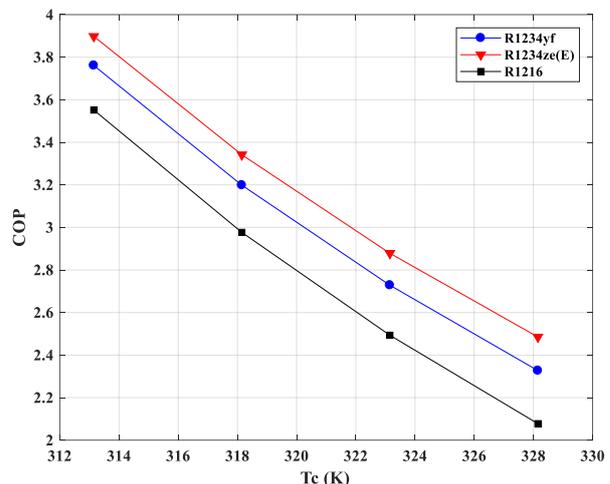


Fig. 12. L'effet de la température du condenseur sur le COP du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire

La figure 12 illustre l'effet de la température de condensation sur la performance de refroidissement des trois fluides choisis (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) dans le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire.

À partir des courbes de variation du coefficient de performance des fluides de travail dans ce cycle opératoire, on peut constater qu'une augmentation de la température de condensation conduit aussi à une forte diminution des performances (COP) du cycle opératoire de base amélioré avec échangeur intermédiaire pour tous les fluides étudiés (R1234yf, R1234ze (E) et R1216).

On note que le fluide de travail R1234ze(E) donne le meilleur coefficient de performance par rapport aux autres fluides, tandis que le COP de fluide de travail R1216 reste le plus bas. Du point de vue de performance énergétique, nous remarquons que le système frigorifique qui fonctionne suivant le cycle frigorifique amélioré avec échangeur intermédiaire a amélioré considérablement le coefficient de performance (COP) par rapport au système de réfrigération conventionnel qui fonctionne suivant le cycle opératoire de base, où il a été observé que le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire offre des valeurs élevées de coefficient de performance (COP) par rapport au cycle opératoire de base pour toutes les températures de condensation (T_c) étudiées ($T_c = [313.15 ; 318.15 ; 323.15 ; 328.15]$ K).

Ceci s'explique en raison de type du cycle opératoire de système de réfrigération étudié, où l'incorporation de l'échangeur intermédiaire dans le cycle opératoire classique de la machine frigorifique à compression de vapeur sert à refroidir le fluide frigorigène sortant du condenseur avant qu'il passe à la détente, ce qui permet de diminuer la valeur du titre de vapeur et par conséquent l'effet frigorifique augmente dans le nouveau opératoire cycle (cycle amélioré avec échangeur intermédiaire) et en même temps sert à surchauffer le fluide frigorigène sortant de l'évaporateur avant qu'il entre dans le compresseur pour le protéger.

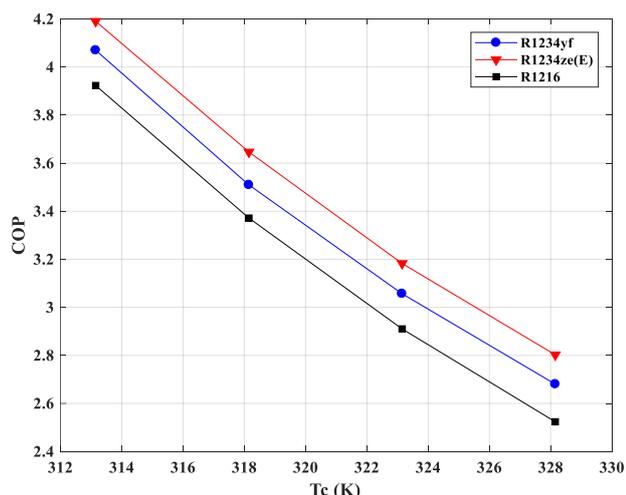


Fig. 13. L'effet de la température du condenseur sur le COP du cycle amélioré avec éjecteur

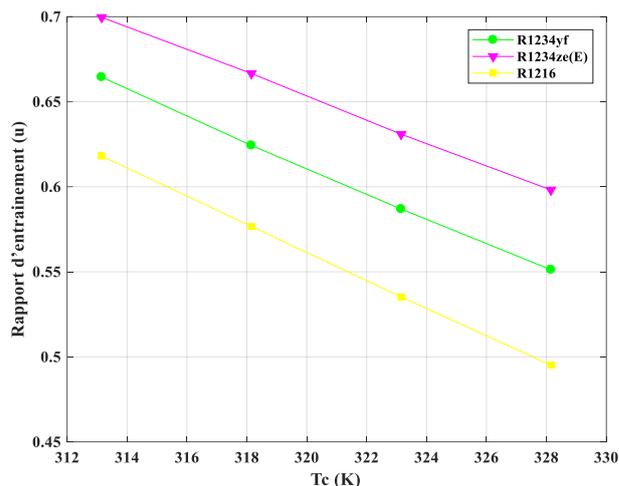


Fig.14. L'effet de la température du condenseur sur le rapport d'entraînement (μ) du cycle amélioré avec éjecteur

Sur les figures 13 et 14 on a fait une comparaison entre les valeurs de variations du coefficient de performance (COP) d'une part, et du rapport d'entraînement (μ) d'autre part pour les trois fluides de travail (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) en fonction des différentes températures du condenseur dans le cycle amélioré avec éjecteur.

On remarque dans ces figures (Figs.13-14), que l'accroissement de la température de la source chaude (condenseur) engendre une diminution de COP et μ pour chaque fluide de travail.

En effet, l'augmentation de la température du condenseur dans ce type de cycle opératoire engendre une augmentation du débit de fluide moteur (fluide primaire) issue du condenseur qui entre dans la tuyère motrice (tuyère primaire) de l'éjecteur et une diminution du débit du fluide aspiré (fluide secondaire) issue de l'évaporateur, ce qui conduit à une chute du rapport d'entraînement (μ) de l'éjecteur (équation (14)) et par conséquent une décroissance du coefficient de performance.

Le rapport d'entraînement est fonction de travail consommé par le compresseur (équation (35)), donc il affecte directement sur le coefficient de performance du cycle opératoire de base amélioré avec éjecteur.

Selon la figure 14, on observe que la comparaison des fluides frigorigènes étudiés a montré que le rapport d'entraînement (μ) de fluide de travail R1234ze (E) est le plus élevé.

Du point de vue de performance énergétique, on remarque que le cycle amélioré avec éjecteur présente des valeurs supérieures du coefficient de performance (COP) à celles qui sont trouvées dans le cycle opératoire de base et le cycle frigorifique amélioré avec échangeur intermédiaire pour toute la plage de températures de condensation étudiées, ce qui conduit à dire que le remplacement du détendeur classique (vanne de détente) par l'éjecteur permet d'améliorer les performances de refroidissement du cycle opératoire de la machine frigorifique conventionnel à compression de vapeur (cycle opératoire de base).

En ce qui concerne les performances de refroidissement (COP) des fluides de travail (R1234yf, R1234ze(E) et R1216), on note la même chose pour ce cycle opératoire, où les résultats de la comparaison obtenus a indiqués que parmi les trois fluides frigorigènes étudiés (R1234yf, R1234ze(E) et R1216), le fluide de travail R1234ze(E) a présenté les meilleures performances de refroidissement par rapport aux R1216 et R1234yf, ceci s'explique par le fait que ce fluide possède le meilleur rapport d'entraînement (Fig.14), où note que les valeurs de COP et μ du fluide performant R1234ze(E) diminuent de (4.1901 à 2.8024) et de (0.6996 à 0.5981) respectivement, tandis que les valeurs de (COP) et rapport d'entraînement (μ) des fluides de travail R1234yf et R1216 diminuent de (4.0697 à 2.6803 et de 0.6645 à 0.5513) pour R1234yf et (3.9229 à 2.5236 et de 0.6181 à 0.4952) pour R1216.

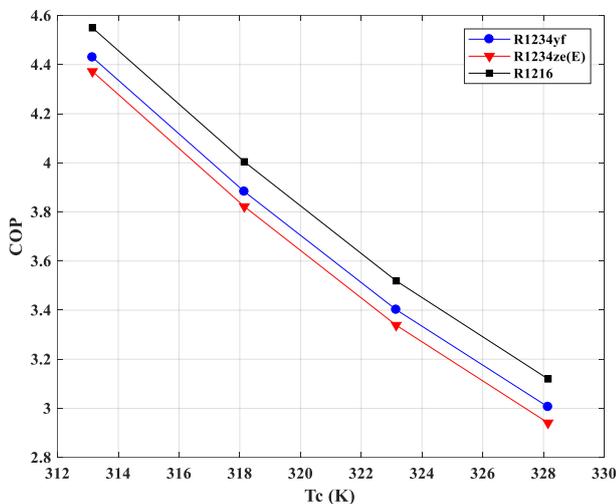


Fig. 15. L'effet de la température du condenseur sur le COP du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur

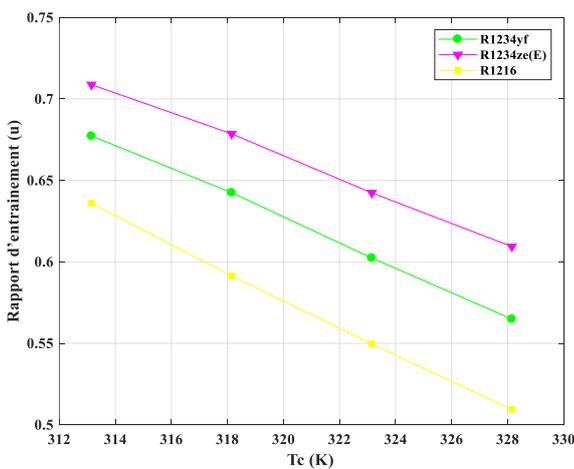


Fig.16.L'effet de la température du condenseur sur le rapport d'entraînement (μ) du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur

Les figures 15 et 16 montrent les résultats de l'influence de la température du condenseur (T_c) sur le COP et le μ des fréons écologiques (R1234yf, R1234ze(E) et R1216) dans le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur.

À partir de ces résultats, on peut noter comme le cycle amélioré avec éjecteur, le coefficient de performance (COP) et le rapport d'entraînement (μ) de cette configuration diminuent aussi avec l'augmentation de la température du condenseur (T_c).

En effet, l'utilisation de l'échangeur intermédiaire dans le cycle de réfrigération à éjecteur sert à refroidir le fluide primaire (fluide moteur) sortant du condenseur avant qu'il passe à la détente dans la tuyère motrice (tuyère primaire) de l'éjecteur et en même temps il sert à surchauffer la vapeur sortante du séparateur (liquide-vapeur) avant qu'elle entre dans le compresseur pour le protéger et pour cela, quand la température de l'évaporateur devient plus froide (d'où la pression de mélange baisse), la valeur de l'enthalpie du fluide secondaire baisse d'où, le débit du fluide moteur augmente pour compenser le déficit cause par l'abaissement de la valeur de l'enthalpie du fluide secondaire afin de maintenir la valeur de l'enthalpie du mélange des fluides primaires et secondaires, ceci est constaté par la diminution du rapport d'entraînement sur la figure 16 qui provoque une diminution du coefficient de performance du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur.

D'après les résultats obtenus dans ce type de cycle opératoire, on peut constater que l'introduction d'un échangeur intermédiaire dans la configuration du cycle amélioré avec éjecteur a produit un incrément de coefficient de performance et rapport d'entraînement pour tous les fluides frigorigènes étudiés.

On peut voir aussi que le meilleur coefficient de performance (COP) et rapport d'entraînement (μ) du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur est obtenu dans le cas où le cycle frigorifique fonctionnant avec le fluide de travail R1234ze(E) dans toutes les gammes de températures étudié, D'autre part, contrairement aux trois autres cycles opératoires (cycle de base, cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et cycle amélioré avec éjecteur) étudiés précédemment, ce cycle opératoire offre des valeurs élevés de coefficient de performance, ce qui veut dire que ce dernier est le plus performant par rapport aux trois autres cycles.

4.3 Variation du COP en fonction de la température d'évaporation

On fait l'étude pour les performances des trois fluides choisis (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) en fonction de la variation de la température de l'évaporateur ($T_e = [268.15 ; 273.15 ; 278.15 ; 283.15]$ K) en gardent la température du condenseur ($T_c = 313.15$ K).

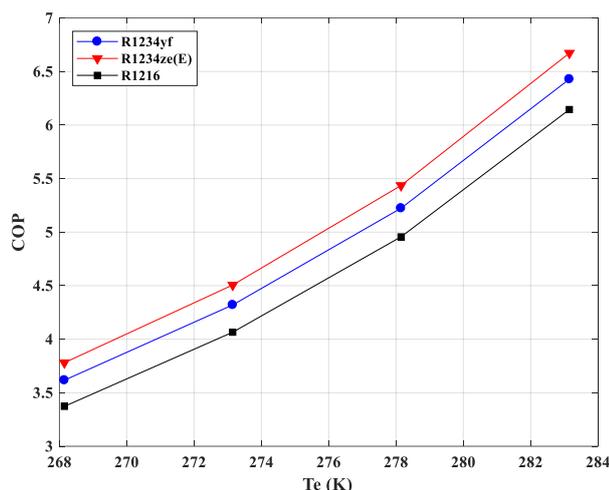


Fig. 17. L'effet de la température d'évaporation sur le COP du cycle de base

La figure 17 présente les courbes de l'évolution de la variation du coefficient de performance (COP) pour les trois réfrigérants étudiés dans le cycle de base en fonction des températures d'évaporation (T_e) qui allant de 268.15 à 283.15 K, et une température de condensation (T_c) constante de 313.15 K.

Contrairement à l'effet de la température du condenseur (T_c), qui a montré que le coefficient de performance est très sensible aux variations des températures du condenseur, on remarque dans la figure 17 que la production frigorifique varie d'une façon proportionnelle par rapport à la température d'évaporation (T_e) dans cette étude, où l'augmentation de la température d'évaporation provoque une forte augmentation des performances de refroidissement (COP) pour chaque fluide de travail. Cette variable est directement liée à la variation d'enthalpie de l'évaporateur. Ceci est intéressant et avantageux pour le choix des conditions opératoires des cycles de réfrigération puisque un meilleur coefficient de performance est obtenu avec l'augmentation de la température d'évaporation de l'évaporateur. On observe aussi que le fréon R1234ze(E) offre un coefficient de performance élevé que les deux autres fluides (R1234yf et R1216) pour tout le domaine de température d'évaporation étudié, ceci peut être expliqué en raison des valeurs élevées de la température critique du fréon ($T_c(\text{R234ze(E)})=382.51 \text{ K}$) qui conduit à son tour à des températures d'évaporation élevées et donc à des performances plus élevées.

Selon la figure 17, le COP des fluides frigorigènes : R1234ze(E), R1234yf et R1216 augmente de (3.7807 à 6.6718), (3.6170 à 6.4284) et (3.3728 à 6.1448) respectivement pendant que (T_e) passe de (268.15 à 283.15 K).

On peut expliquer ces résultats par le fait que l'augmentation de la température d'évaporation implique une augmentation de l'enthalpie à la sortie de l'évaporateur (h_1), tandis que l'enthalpie à la sortie du condenseur (h_3) de cycle frigorifique reste constante, ce qui provoque une

augmentation de la production frigorifique, ce qui augmente par suite le coefficient de performance de la machine frigorifique conventionnel.

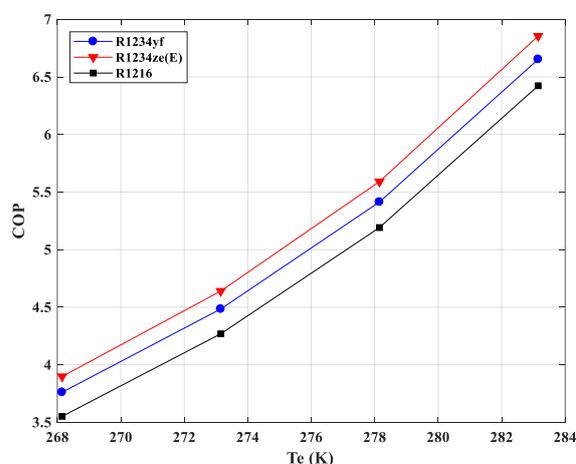


Fig. 18. L'effet de la température d'évaporation sur le COP du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire

Pour une température fixe du condenseur ($T_c=313.15 \text{ K}$), on suit l'évolution du COP en fonction de la température d'évaporation pour les trois fluides étudiés dans le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire sur la figure 18. Les résultats obtenus montrent que pour les mêmes températures de fonctionnement du cycle ($T_e= [268.15 ; 273.15 ; 278.15 ; 283.15] \text{ K}$ et $T_c = 313.15 \text{ K}$), le fluide R1234ze(E) donne le meilleur coefficient de performance. Du point de vue de performance énergétique, les mêmes remarques s'appliquent pour l'effet de la température d'évaporation, c'est-à-dire, le coefficient de performance obtenu pour les réfrigérants écologiques (R1234yf, R1234ze(E) et R1216) est plus élevé qu'à celui du cycle de base.

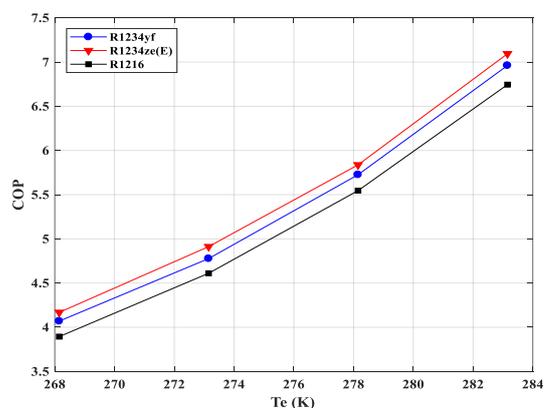


Fig. 19. L'effet de la température d'évaporation sur le COP du cycle amélioré avec éjecteur

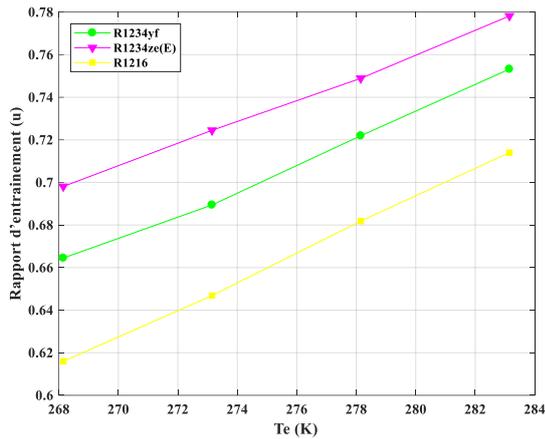


Fig. 20. L'effet de la température d'évaporation sur le rapport d'entraînement (μ) du cycle amélioré avec éjecteur

Sur les figures 19 et 20, on a fait une comparaison entre les valeurs des variations de coefficient de performance (COP) d'une part, et rapport d'entraînement (μ) d'autre part pour les trois fluides de travail (R1234yf, R1234ze (E) et R1216) en fonction de la température d'évaporation (T_e) dans le cycle amélioré avec éjecteur.

On remarque dans ces figures que l'accroissement de la température de l'évaporateur (T_e) entraîne une augmentation de coefficient de performance (COP) et rapport d'entraînement (μ) pour chaque fluide de travail.

En effet, l'augmentation de la température au niveau de l'évaporateur dans ce type de cycle provoque une augmentation de débit du fluide aspiré (fluide secondaire) issue de l'évaporateur et une diminution du débit du fluide moteur (fluide primaire) issue du condenseur qui entre dans la tuyère motrice (tuyère primaire), ce qui conduit à une augmentation du rapport d'entraînement (μ) de l'éjecteur et l'accroissement par voie de conséquence du coefficient de performance (COP) de la machine frigorifique à compression de vapeur qui fonctionne suivant le cycle amélioré avec éjecteur.

D'après les résultats des figures 19 et 20, on note que le réfrigérant écologique R1234ze(E) possède un excellent rapport d'entraînement (μ) de l'éjecteur, ce qu'il lui permet d'avoir un coefficient de performance (COP) plus élevé que les deux autres fluides de travail (R1234yf et R1216).

En parallèle, nous pouvons remarquer que les valeurs de coefficient de performance (COP) et rapport d'entraînement (μ) des fluides de travail (R1234ze (E), R1234yf et R1216) augmentent respectivement de (4.1681 à 7.0936 et de 0.6981 à 0.7782) pour le fluide de travail R1234ze (E), (4.0697 à 6.9609 et de 0.6645 à 0.7532) pour le fluide de travail R1234yf et (3.8940 à 6.7444 et de 0.6160 à 0.7140) pour le fluide de travail R1216.

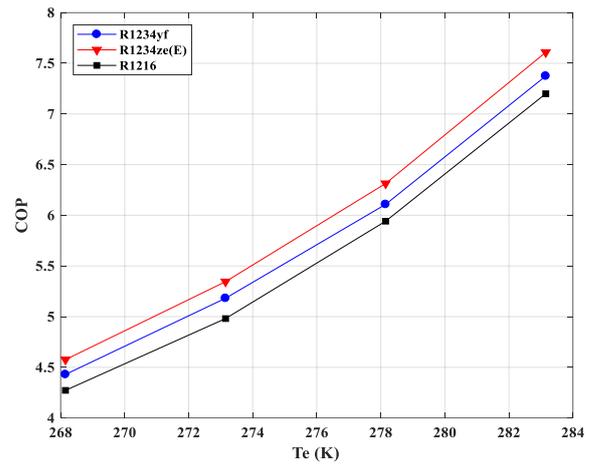


Fig. 21. L'effet de la température d'évaporation sur le COP du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur

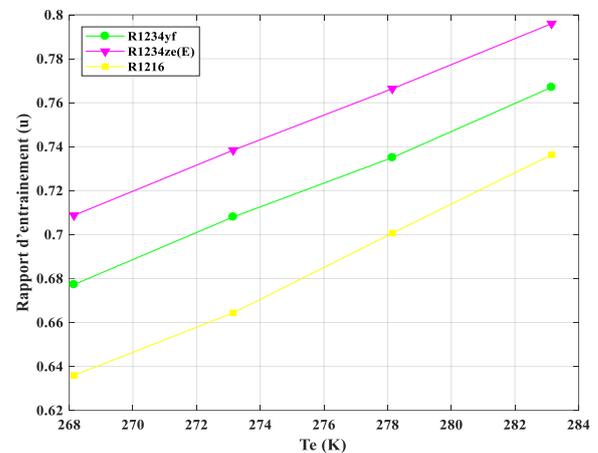


Fig.22. L'effet de la température d'évaporation sur le rapport d'entraînement (μ) du cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur

D'après les courbes ci-dessus des figures 21 et 22 qui représentent la variation du coefficient de performance (COP) et le rapport d'entraînement (μ) en fonction de la température de l'évaporateur (T_e) dans le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur, il est bien clair que les deux paramètres (coefficient de performance (COP) et rapport d'entraînement (μ)) augmentent aussi avec l'augmentation de la température de la source froide (l'évaporateur) et le fluide de travail R1234ze(E) est le réfrigérant ayant les meilleures performances.

D'un autre côté, on note une amélioration importante du coefficient de performance (COP) et du rapport d'entraînement (μ) du système frigorifique.

On peut expliquer ces résultats par le fait que l'augmentation de la température de l'évaporateur (T_e) implique une augmentation de la valeur de l'enthalpie du fluide secondaire aspiré par l'éjecteur d'où, le débit du fluide aspiré (m_s) augmente, tandis que la valeur de l'enthalpie du fluide

primaire (fluide moteur) baisse d'où, le débit du fluide primaire (m_p) diminue ce qui provoque une augmentation de rapport d'entraînement (μ) et l'accroissement par voie de conséquence du coefficient de performance (COP) de la machine frigorifique amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur.

5. Conclusion

Le sujet de recherche qui a été traité dans ce travail a permis d'approfondir les connaissances sur les problèmes environnementaux des fluides frigorigènes fluorés à partir d'une revue bibliographique, ainsi que les principales réglementations en vigueur dans le domaine du froid qui ils ont conduit à l'évolution technologiques actuels des fluides de travail et les installations de réfrigération à compression de vapeur. De plus, il nous a permis de mieux identifier les problèmes intrinsèques aux ce domaine qui ils ne sont pas étudier jusqu'à maintenant.

Les buts généraux assignés de cette étude étaient d'une part l'évaluation des performances de refroidissement de trois fluides de travail respectueux de l'environnement (R1234yf, R1234ze(E) et R1216) de type hydrofluorooléfines (HFO) dans quatre configurations de réfrigération à compression de vapeur (cycle de base, cycle amélioré avec échangeur intermédiaire, cycle amélioré avec éjecteur et cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur) et d'autre part l'étude comparative entre les efficacités frigorifiques de ces configurations sur les mêmes conditions et paramètres de fonctionnement, que ce soit entre les fluides ou entre les cycles opératoires.

L'étude des performances de refroidissement des fluides de travail dans les configurations de réfrigération considérés dans cette étude a été effectuée dans les conditions des températures d'évaporation et de condensation qui comprises respectivement entre (268.15 à 283.15 K) et (313.15 à 328.15 K) par le biais d'un simulateur de simulation numérique qui nous donne également des informations intéressantes sur les performances et des frigorigènes testés et permet de chiffrer l'avantage des machines innovantes sur une machine plus classique.

À l'issue du travail effectué, les conclusions suivantes peuvent être établies :

- Les cycles frigorifiques fonctionnant avec le fluide de travail R1234ze(E) ont obtenu un coefficient de performance élevée que les autres fluides frigorigènes (R1234yf et R1216) ;
- Les configurations de réfrigération à éjecteur permettent d'avoir des meilleures valeurs du coefficient de performance (COP) que ceux du cycle frigorifique conventionnel à compression de vapeur et le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire ;
- Le cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur est le cycle opératoire qui donne la performance la plus élevée devant tous les cycles opératoires étudiés

(cycle de base, cycle amélioré avec échangeur intermédiaire, cycle amélioré avec éjecteur) ;

- Les cycles opératoires de réfrigération à éjecteur (cycle amélioré avec éjecteur et cycle amélioré avec échangeur intermédiaire et éjecteur) fonctionnants avec le fluide de travail R1234ze(E) ont obtenu un rapport d'entraînement (μ) élevé que les autres fluides (R1234yf et R1216) ;
- Le coefficient de performance et le rapport d'entraînement de l'éjecteur augmentent avec l'augmentation de la température de l'évaporateur (T_e), pourtant, une augmentation de la température du condenseur (T_c) conduit à une diminution progressive du coefficient de performance et le rapport d'entraînement de l'éjecteur ;
- Les meilleures performances de refroidissement des cycles de réfrigération à éjecteur sont atteintes lorsque le rapport d'entraînement de l'éjecteur est important ;
- Pour atteindre des valeurs élevées du rapport d'entraînement, il vaut mieux augmenter la température (T_e) au niveau de l'évaporateur ;
- L'intégration de l'échangeur intermédiaire et l'éjecteur dans le cycle opératoire de réfrigération conventionnelle (cycle de base) ont donné une augmentation significative de COP ;
- Les températures des sources chaudes (températures de condensation) et froides (températures d'évaporation) jouent le rôle majeur dans la variation du coefficient de performance et le rapport d'entraînement ;
- Le fluide de travail écologique R1234ze(E) peut être un bon candidat pour les équipements frigorifiques à compression de vapeur du fait de ces bonnes performances de refroidissement (COP élevée en raison de sa valeur élevée de chaleur latente d'évaporation (L_v (R1234ze(E)=193.1 kJ/kg)) et son point critique) d'une part et leurs excellentes propriétés environnementales (sans impact sur l'environnement, PAO=0 et PRG=6) d'autre part ;
- Enfin, les résultats de cette étude sont encourageants et favorisent le développement de ces cycles opératoires par l'utilisation des fluides de travail de type HFO.

Comme recommandations et perspectives futures basées sur ce travail, nous espérons poursuivre l'étude entamée sur d'autres fluides de nouvelle génération du types hydrofluorooléfines (HFO : R1225zc, R1243zf, etc.) ou hydrochlorofluorooléfines (HCFO : R1233xf, R1233zd(E), etc.) et de testé et d'étudiés leurs performances de refroidissement (COP) dans les systèmes de réfrigération innovantes à compression de vapeur avec le fluide le plus étudié actuellement R1234yf (PAO=0 et PRG=4) et de voir l'amélioration qui peut d'apportée sur le refroidissement par ces fluides. En outre, considérer d'autres configurations de réfrigération de type à compression de vapeur et de nouveaux fréons écologique.

Nomenclature

Liste des symboles

P	Pression, (kPa)
T	Température, (°C ou K)
h	Enthalpie spécifique, (kJ kg ⁻¹)
s	Entropie spécifique, (kJ kg ⁻¹ K ⁻¹)
q	Quantité de chaleur échangée, (kJ kg ⁻¹)
w	Travail mécanique, (kJ kg ⁻¹)
x	Titre de vapeur
v	Vitesse du fluide frigorigène, (m s ⁻¹)

Lettres grecques

μ	Rapport d'entraînement de l'éjecteur
η	Rendement isentropique
ε	Efficacité de l'échangeur intermédiaire
Δ	Variation ou écart

Indices et exposants

p	Relatif au fluide (ou tuyère) primaire
s	Relatif au fluide (ou tuyère) secondaire
c	Relatif au condenseur
comp	Relatif au compresseur
m	Relatif à la chambre de mélange
diff	Relatif au diffuseur
e	Relatif à l'évaporateur
vd	Relatif à la vanne de détente
Sèp	Relatif au séparateur (liquide-vapeur)
L	Liquide
V	Vapeur
entrée	Entrée
sortie	Sortie
sc	Surchauffe
sr	Sous-refroidissement
froid	Fluide froid
chaud	Fluide chaud
is	Processus isentropique
1,, 10	Emplacements dans les cycles opératoires

Abréviations

COP	Coefficient de performance
PRG	Potential de réchauffement global
PAO	Potential de destruction de la couche d'ozone
GWP	Global warming potential
ODP	Ozone depletion potential
CFC	Chloro-Fluoro-Carbures
HCFC	Hydro-Chloro-Fluoro-Carbures
HFC	Hydro-Fluoro-Carbures
HFO	Hydro-Fluoro-Oléfines
GES	Gaz à Effet de Serre
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
REFPROP	Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Data base

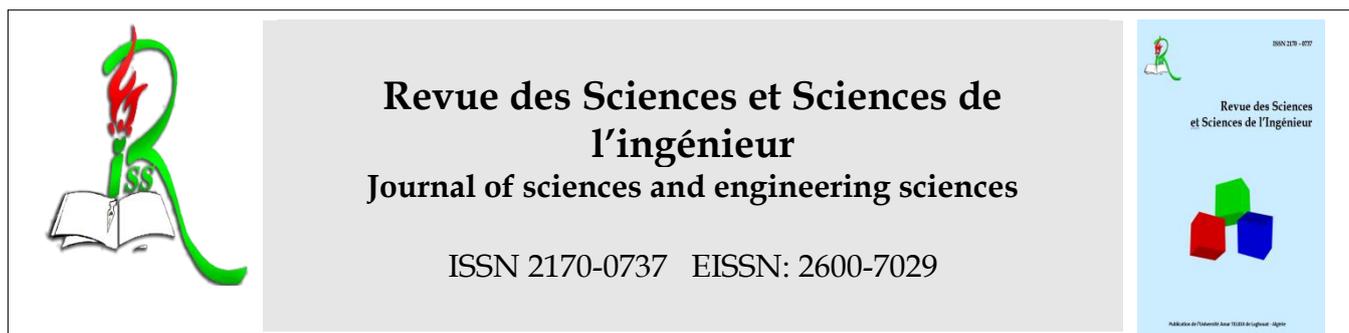
Désignation chimique des réfrigérants

R1234yf	2,3,3,3-tétrafluoro-1-propène
R1234ze(E)	Trans-1,3,3,3-tétrafluoro-1-propène
R1216	Either 1,1,2,3,3,3-hexafluoro-1-propène

Références

- [1] C. Park, H.Lee, Y.Hwang, R. Radermacher. *Recent advances in vapor compression cycle technologies*. International Journal of Refrigeration 2015 ; 60 : 118-134.
- [2] M.O. M Linden, C.J. Seeton, Andy Pearson. *New refrigerants and system configurations for vapor-compression refrigeration*. Science 2020 ; 370 :791-796.
- [3] H. Madani, A. Valtz, F. Zhang, J. El Abbadi, C. Houriez, P. Paricaud, C. Coquelet. *Isothermal vapor-liquid equilibrium data for the trifluoromethane (R23) +2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) system at temperature from 254 to 348 K*. Fluid Phase Equilib 2016; 415 :158-165.
- [4] J.M. Calm. *The next generation of refrigerants - historical review, considerations, and Outlook*. International Journal of Refrigeration 2008 ; 31 :1123-1133.
- [5] Y.Maalem, A.Zarfa, Y.Tamene, S.Fedali, H.Madani. *Prediction of thermodynamic properties of the ternary azeotropic mixtures*. Fluid Phase Equilib 2020 ; 517:112613.
- [6] T.Tsai. *Environmental risks of new-generation fluorocarbons in replacement of potent greenhouse gases*. International Journal of Global Warming 2013 ; 5 : 84-95.
- [7] G. Saviano, M. Ferrini, L. Benussi, S. Bianco, D. Piccolo, S. Colafranceschi, J. Kjølbro, A. Sharma, D. Yang, G.Chen, Y. Ban, Q. Li, S. Grassini, M. Parvis. *Properties of potential eco-friendly gas replacements for particle detectors in high-energy physics*. J. Instrum 2018 ; 2013.
- [8] A.J. Sicard, A.J. Sicard. *Fluorocarbon Refrigerants and their Syntheses: Past to Present*. Journal of Chemical & Engineering Data 2020 ; 120 : 9164-9303.
- [9] M.O. McLinden, M.L. Huber. *(R)Evolution of Refrigerants*. Journal of Chemical & Engineering Data 2020 ; 65 : 4176-4193.
- [10] V.Nair. *HFO refrigerants: A review of present status and future prospects*. International Journal of Refrigeration 2021 ; 122 : 156-170.
- [11] Mota-Babiloni. Adrián. et al. *Drop-in energy performance evaluation of R1234yf and R1234ze (E) in a vapor compression system as R134a replacements*. Applied Thermal Engineering 2014 ; 71.1 : 259-265.
- [12] Koyama. Shigeru. Nobuo Takata. and Sho Fukuda. *Drop-in experiments on heat pump cycle using HFO-1234ze (E) and its mixtures with HFC-32*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference 2010 : 2514.
- [13] Zilio. Claudio. et al. *The refrigerant R1234yf in air conditioning systems*. Energy 2011; 36.10: 6110-6120.
- [14] Molés. Francisco. et al. *Theoretical energy performance evaluation of different single stage vapour compression refrigeration configurations using R1234yf and R1234ze (E) as working fluids*. International journal of refrigeration 2014; 44:141-150.

- [15] Koyama, Shigeru, Nobuo Takata, and Sho Fukuda. *Drop-in experiments on heat pump cycle using HFO-1234ze (E) and its mixtures with HFC-32*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference 2010; 2514.
- [16] S.Elbel, N.Lawrence. *Review of recent developments in advanced ejector technology*. International Journal of Refrigeration 2016; 62 :1-18.
- [17] J.Sarkar. *Ejector enhanced vapor compression refrigeration and heat pump systems-A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012 ; 16 : 6647-6659.
- [18] A.A.Kornhauser. *The Use Of An Ejector as Refrigerant Expander*. International Refrigeration and Air Conditioning 1990; 82:10-19.
- [19] E. Nehdi, L.Kairouani, M.Bouzaina. *Performance analysis of the vapour compression cycle using ejector as an expander*. International Journal of energy research 2007; 31:364-375.
- [20] J.Sarkar. *Performance characteristics of natural-refrigerants- based ejector expansion refrigeration cycles*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy 2009; 223 : 543-550.
- [21] S. Disawas, S. Wongwiset. *Experimental investigation on the performance of the refrigeration cycle using a two-phase ejector as an expansion device*. International Journal of Refrigeration 2004 ; 27 : 587-594.
- [22] H. Li, F. Cao, X. Bu, L. Wang, X. Wang. *Performance characteristics of R1234yf ejector-expansion refrigeration cycle*, Applied Energy 2014; 121: 96-103.
- [23] L. Zhao, X. Yang, S. Deng, H. Li, Z. Yu. *Performance analysis of the ejector-expansion refrigeration cycle using zeotropic mixtures*. International Journal of Refrigeration 2015; 57: 197-207.
- [24] L. Boumaraf, P. Haberschill, A. Lallemand. *Investigation of a novel ejector expansion refrigeration system using the working fluid R134a and its potential substitute R1234yf*. International Journal of Refrigeration 2014; 45:148-159.
- [25] Deng J. Jiang P. Lu T. Lu W. *Particular characteristics of transcritical CO₂ refrigeration cycle with an ejector*. Applied Thermal Engineering 2007; 27: 381–8.
- [26] X.Dong, M.Gong, J.Shen, and J.Wu. *Vapor-Liquid Equilibria of the trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R1234ze(E))+Isobutane (R600a) System at Various Temperatures from (258.150 to 288.150) K*. J. Chem. Eng. Data 2012 ; 57 : 541-544.
- [27] Q.Zhong, X.Dong, Y.Zhao, H.Li, H. Zhang, H.Guo, M. Gong. *Measurements of isothermal vapour-liquid equilibrium for the 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene+propane system at temperatures from 253.150 to 293.150 K*. International Journal of Refrigeration 2017 ; 81 : 26-32.
- [28] O.Brunin, M.Feidt, B.Hivet. *Comparison of the working domains of some compression heat pumps and a compression-absorption heat pump*. International Journal of Refrigeration. 1997 ; 20 : 308-31.



Monts des Ksour, Atlas saharien, Algérie Synthèse géodynamique, lithostratigraphique et sédimentologique des séries Mésozoïque et Cénozoïque, magmatisme et tectonique.

*Abdel kamal BENMANSOUR¹

¹Department des sciences de la terre et de l'univers (S.T.U), Université Abou Bakr Belkaid – Tlemcen (UABT), Laboratoire de recherche N°25 : « PROMOTION DES RESSOURCES HYDRIQUES, PEDOLOGIQUES ET MINIERES LEGISLATION ET CHOIX TECHNOLOGIQUE, Tlemcen, Algeria

Received : 2021-07-11

Accepted : 2022-05-29

Abstract: The geological and geographical context of the Ksour mountains sector, on the geodynamic, sedimentological, tectonic, magmatic and diapiric side, is one of the best sites where geology is clearly expressed. To know the relationships between these different domains and the way in which they influence each other, such as geodynamic activity causes the upward mobility of diapirism towards the surface and their relationship with the rise of volcanism, as well as to understand the evolution of the different basins and to draw the right explanation of their formation as well as to know the conditions controlling these basins (eustatic regime, deposit environments). This study will help us to discover the secrets of the ancient tectonic regimes producing the current reliefs and terrains. Based on field work. Four cups were lifted.

Key-words: *Ksour mountains; volcanism; diapirism; sedimentology; Ain Sefra.*

Résumé : Le contexte géologique et géographique du secteur des monts de Ksour, du côté géodynamique, sédimentologique, tectonique, magmatique et diapirique, est l'un des meilleurs sites où la géologie s'exprime nettement. Pour savoir les relations entre ces différents domaines et la façon avec laquelle ils s'influencent entre eux, telle que l'activité géodynamique provoque la mobilité ascendante du diapirisme vers la surface et leur rapport avec l'ascension du volcanisme, aussi bien de comprendre l'évolution des différents bassins et de tirer la bonne explication de leur formation ainsi de connaître les conditions contrôlant ces bassins (régime eustatique, milieux de dépôts). Cette étude nous aidera à déceler les secrets des anciens régimes tectoniques produisant les reliefs et terrains actuels. On se basant sur le travail de terrain. Quatre coupes ont été levé.

Mots-clés : *monts des Ksour ; volcanisme ; diapirisme ; sédimentologie ; Ain Sefra.*

Introduction

La géologie des monts des Ksour est bien diversifiée par le fait que ses bassins sédimentaires ante-orogéniques ont été formés et modelés par la tectonique qui a abouti à l'ouverture de l'océan Atlantique dès le début du Trias et en suite fortement déformés par les activités tectoniques telle que l'orogénèse alpine du Cénozoïque, en créant par conséquence des syn-bassins et post-bassins issues de la surrections et plissement des formations géologiques des premiers ante-bassins Triasique.

Dans ce travail on va interpréter l'évolution des contraintes tectoniques par l'analyse des différentes données récupérées à partir des travaux du terrain notamment les levées de quatre coupes dans le secteur de Ain-Sefra.

Plusieurs chercheurs ont réalisé des travaux sur la zone des monts des Ksour dont ils traitent la dynamique tectonique et la dynamique sédimentaire (KACEMI Ali, 2013 ; CHACHA Aziza, 2012), d'autres traitent les écoulements souterrains hydriques (YOUSFI Soumia, 2014) et d'autres ont investigué dans l'activité magmatique des régions des monts de Ksour (MEDDAH Amar, 2010).

L'investigation géologique dans la zone d'étude montre des régimes eustatiques variables d'une coupe à l'autre, parfois régression et parfois transgression comme l'analyse séquentiel à démontrer avec un granoclassement changeable, positif (granocroissant) ou négatif (granodecroissant), d'une coupe à l'autre reflétant la dominance des conditions de sédimentation de chaque milieu.

Le volcanisme est présent par des intrusions basiques passagères accompagnées par un diapirisme bien identifié du Trias, et les chercheurs suggèrent que c'est ce volcanisme est à l'origine des sources hydrothermales de hammam Ouarka.

Pour comprendre comment la tectonique des plaques manifeste sur le continent nécessite beaucoup de travail et prend beaucoup de temps, et ce travail modeste est l'un des pas d'avancement dans cette longue recherche.

1. Méthodes et détails

Cette région est l'un des compartiments les plus pertinents de l'Algérie du fait qu'elle fait partie de la grande orogénèse alpine, s'étend de l'Atlas (Tunis, Algérie, Maroc) passant par la péninsule Ibérique, les Alpes, les chaînes d'Europe de sud et traversant toute la bordure méridionale sud de l'Asie, issue de la fermeture de la Téthys et qui montre une activité toujours active sous un régime compressif de la collision afro-européen, sans oublier qu'elle construit une barrière topographique qui sépare le domaine tellien du domaine saharien dont on localise l'accident sud-atlasique (A.S.A).

2. Localisation géographique de la zone d'étude

La chaîne Atlasique oblique par rapport au littoral méditerranéen s'étend depuis la côte atlantique au Maroc jusqu'en Tunisie littorale.

En Algérie, la chaîne Atlasique a une longueur qui avoisine 1000 Km et une largeur de plus de 100 Km. Elle est située au Sud d'un ensemble septentrional orienté Ouest-Est dont lequel on distingue :

2.1. La partie occidentale :

Elle englobe trois parties bien définies des monts de l'Atlas Saharien :

- Les monts d'Ouled Nail ou "Atlas saharien oriental" (Laghouat-Boussaâda).
- Les monts des Amours ou "Atlas saharien central" (El Bayadh).
- Les monts des Ksour ou "Atlas saharien occidental" (Ain Sefra).

2.2. La partie orientale :

c'est une continuation des monts de l'Atlas Saharien dans l'Est Algérien, sous forme de trois parties montagneuses avoisinantes, on site :

- Les Monts des Ziban
- Les Aurès
- Les Nementchas

3. Localisation géologique de la zone d'étude

3.1. Localisation générale :

L'Algérie, d'un point de vue géologique est subdivisée en deux grands domaines relativement différents, séparés par un accident structural majeur, et on distingue :

3.1.1 Le domaine de l'Algérie du nord (septentrional) :

il s'étend de l'Atlas saharienne jusqu'à la cote algérienne passant par les hauts plateaux vers l'Atlas tellien baptisé lors de l'orogénèse alpine, qui demeure jusqu'à l'actuel d'une activité tectonique plus au moins considérablement instable, et qui y a été clairement édifié au cours du tertiaire.

3.1.2. Le domaine de l'Algérie saharienne ou la plateforme saharienne (Sahara) :

depuis le Précambrien, ce domaine a pu rester stable, il est constitué d'un socle déformé par les orogénèses éburnéenne et panafricaine, et une couverture paléozoïque légèrement plissée par la déformation hercynienne et d'une couverture méso-cénozoïque tabulaire.

3.1.3. L'accident Sud-Atlasique (A.S.A) :

cet accident est représenté par des méga-failles orientées généralement SO, suivant le revers sud de l'Atlas saharienne et qui sépare les deux domaines d'Algérie du nord de l'Algérie saharienne (fig. 1).

3.2. Les Monts des Ksour

Ils représentent un véritable barrage topographique naturel, ils font partie du domaine méridional de l'Algérie, qui résulte de l'orogénèse alpine de collision lors du tertiaire donnant ainsi une chaîne intracontinentale orientée NE-SO.

La chaîne est limitée par deux domaines stable –les hautes plaines au nord, et la plateforme saharienne au sud-elle est affectée par deux grands accidents au nord correspondent à l'accident Sud Mésétien (ASM) et l'accident

Nord atlasiques (ANA) et au sud l'accident Sud atlasique (ASA) (fig. 2). Cette chaîne est représentée comme un grand alignement structural qui délimite les deux domaines topographiquement et climatiquement.

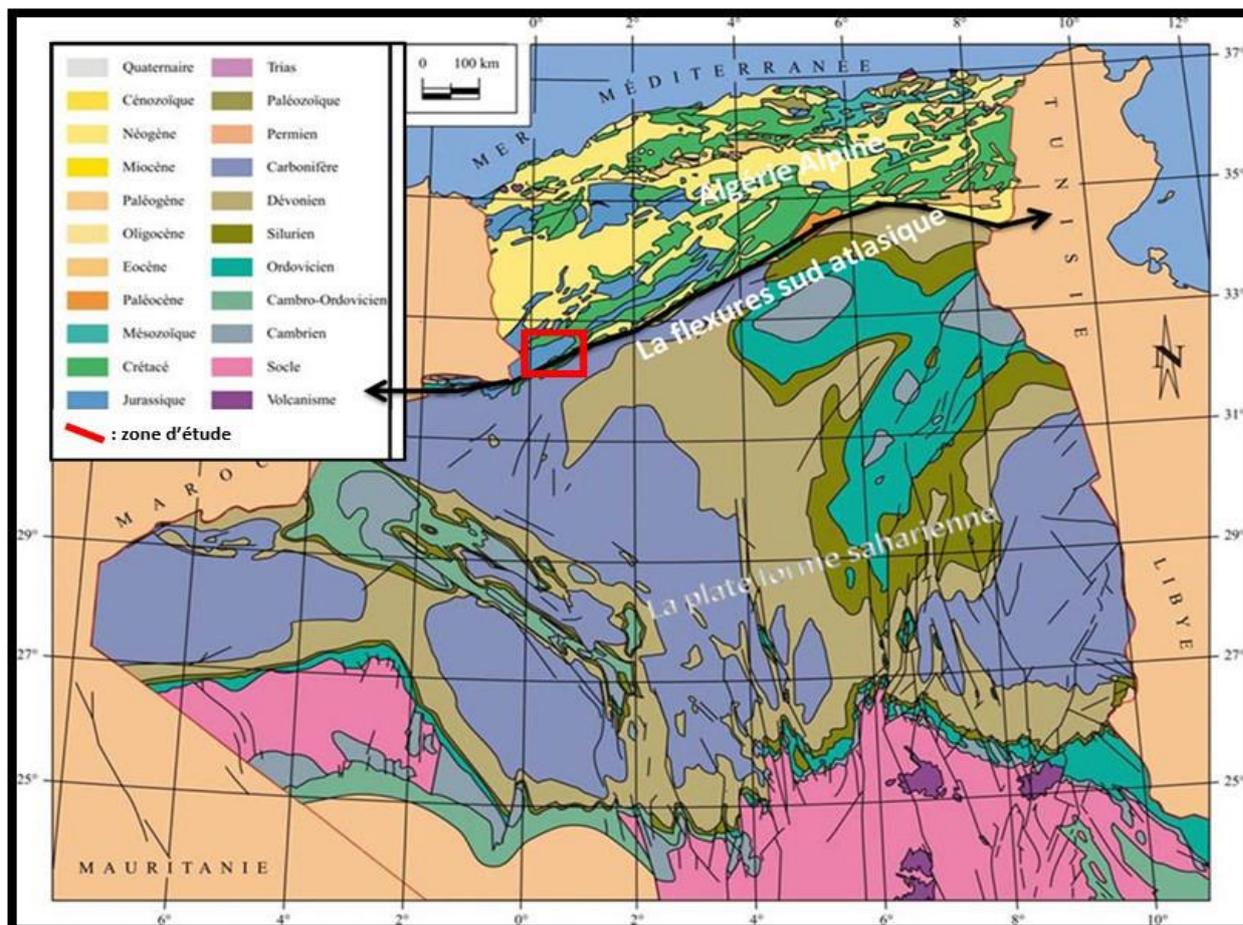


Figure 1 : Carte géologique de l'Algérie. D'après la carte géologique internationale de l'Afrique (feuille n°2), CGMW/UNESCO 1990 pour le Nord de l'Algérie

Ce domaine Atlasique est subdivisé en deux parties majeures, géologiquement individualisées :

- L'Atlas saharien sensu stricto (Atlas saharien occidental), orienté NE-SO : Pour le géologue (E. Ritter, 1902), on se basant sur l'alignement structural, le sensu stricto est composé de trois faisceaux de plis :
 - les Monts d'Ouled Nail à l'Est (Atlas Saharien Oriental)
 - le Djebel Amour (Atlas Saharien Central)
 - les Monts des Ksour à l'Ouest (Atlas Saharien Occidental)

Puis le géologue (KAZI TANI, 1986) a subdivisé ce dernier en compartiment SO et un autre NE recoupés par une ride E-W qui les sépare, produite au Dogger : début de *Tadjrouna* ou le seuil de *Tadjrouna*.

- Les Aurès (Atlas saharien oriental) : Orienté NE-SO, les structures de cet ensemble décrit par Laffitte, se présentent comme un complexe souple et opaque charnier, de vastes plis assez réguliers dont la direction moyenne est de NE 60 avec des anticlinaux légèrement déjetés vers le sud.

Des étranglements ou des dilatations structurales peuvent influencer la nature des plissements (un anticlinal pouvant ainsi se trouver dans le prolongement d'un synclinal ou réciproquement).

N.B : L'Atlas saharien sensu stricto et Les Aurès sont séparés par des couloirs drochant dextres NO-SE, ainsi pouvant être à l'origine des bassins rhombiques.

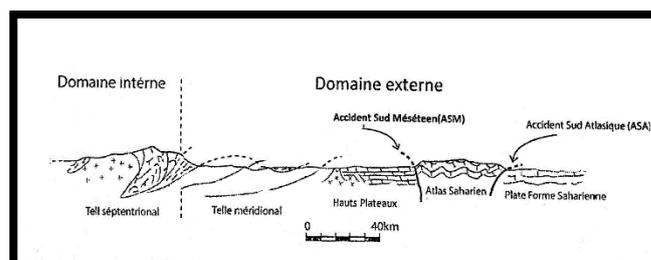


Figure 2 : Coupe schématique structurale NS de l'Algérie du Nord (A. Caire, 1971).

3.3. Diapirisme, volcanisme et hydrothermalisme

3.3.1 le diapirisme triasique (Aïn Ouarka) :

Près de Hammam Ouarka affleure des terrains sédimentaires ayant une extension locale au niveau de la terminaison Est de l'anticlinal dj. Chémariikh.

Le trias diapirique périclinale affleure généralement le long des accidents longitudinaux et à l'intersection des accidents NO-SE et NE-SO, dans ce cas, il coïncide avec la terminaison Est de l'anticlinal dj. Chémariikh.

Ces terrains sont d'âge mésozoïque, faites essentiellement de facies argileu-gypsi-sel continentales ou diapir type Germany disposant d'une position stratigraphique anormale (infra-lias Dogger).

La série virtuelle :

La série triasique partage généralement la même lithologie et lithostratigraphie Par tout dans le domaine nord-africain, elle englobe de bas en haut les niveaux suivants :

- Des conglomérats
- Des grès ou arkoses
- Des argiles bariolées
- De l'anhydrite et du sel
- Enfin de la Dolomie

Formation de Hammam Ouarka triasique

Cette formation triasique contient de bas en haut :

- des argiles bariolées versicolores
- des argiles gypseuses
- des sels,
- contact avec volcanisme tholéiitique
- dolomies



Figure 3 : formation triasique d'argile multicolore (olistolithes) de Hammam Ouarka

La formation diapirique est appelée formation argilo-gypsi-sel. Surmontées par des dolomies de dj. Chémariikh d'âge début Dogger (passage Jurassique inf. Jurassique moyen) qui porte des figures d'immersion, les Sheet-cracks indiquant commencement d'une nouvelle transgression, plus les détails tectoniques marquant l'ouverture d'un bassin, les slumps, et des plis en genoux. Ces témoignes tectono-eustatiques nous renseignent sur la structure tectonisée de la région favorable pour ces facies savons de glisser à travers les fractures engendrées généralement par la tectonique vers la surface.

3.3.2 l'hydrothermalisme :

La région de Hammam Ouarka est célèbre pour ses sources hydrothermales minéralisées d'où elle tient son nom.

La source d'eau provienne de la grande nappe phréatique sous-terrain "Achotte-Chergui" tandis que la source thermique est supposée la faible épaisseur crustale, comme il indique le volcanisme tholéiitique et le début d'ouverture d'un bassin, mettant la nappe très proche à l'asthénosphère.

L'hydrothermalisme a contribué à la formation des dépôts de Travertins Quaternaire toujours active présentant des fractures, indices de l'instabilité du diapir (fig. 4).

3.3.3 le volcanisme :

Ce trias est accompagné par un volcanisme tholéiitique intraplaque (fig. 5), dans un environnement à contraintes distensive (Pearce et Norry, 1979), identifié comme roche verte ou ophite appelée la Spillite, qui peut exister dans les terrains triasiques (cas similaire au volcanisme des monts de Nedroma, Tlemcen).

Comme le diapir, ce volcanisme peut être expliqué par une injection magmatique produite à travers les fractures crustaux (dykes) lors de la remonter du diapir sachant qu'un volcanisme tholéiitique peut nous renseigner sur l'amincissement crustal.

L'ophite port des caractéristiques de genèse typiquement des ouvertures océaniques, phase rift.

Cette dernière présente des cristaux des minéraux d'altération provenant d'un métamorphisme hydrothermale "Amphibolite".



Figure 4 : travertin fracturé de Hammam Ouarka.
f : fractures

Dépôt de travertin mis en-dessus des couches diapirique présentant des fractures locales induisent par la mobilité continue du diapir.

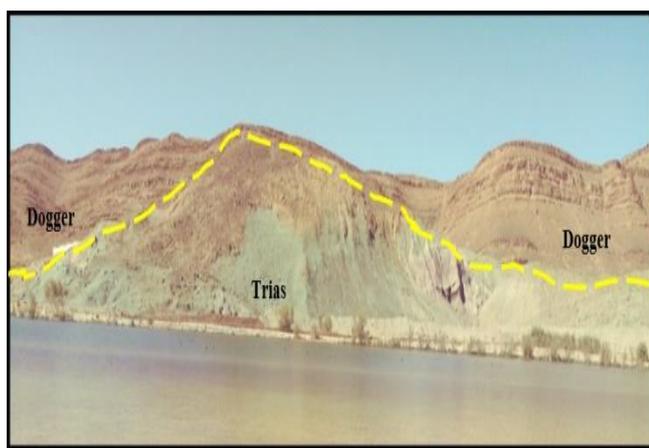


Figure 5 : affleurement du volcanisme basique Triasique sous l'empilement des couches du Dogger.

C'est un empilement des bancs de dolomie du Dogger au-dessus de la formation volcanique triasique qui accompagnent le diapir, notant l'absence du Lias ce qui rend ce contact « Trias-Dogger » une discontinuité temporelle.

On interprète l'ascension de ce diapir et l'activité volcanique qu'elles sont reliées aux divers décrochements et failles jouant au cours du mésozoïque et qui sont difficiles à déceler dans la zone d'Ain Ouarka par rapport aux autres sites de la chaîne Atlasique occidentale, on se référant aux travaux élaborer aux autres parties de l'Atlas saharien occidental (KACEMI 2013, KAZI-TANI 1986, HERKAT 2000...) notamment dans le Haut Atlas marocain (MATTAUER et al 1977).

3.4. Analyse séquentielle :

Dans notre étude on se content de réaliser quatre coupes, qui sont ;

- Coupe de Hammam Ouarka.
- Coupe de H'Zam El Bagra (djebel Larouia).
- Membre supérieure de la Coupe de Tiout.
- Coupe de Djebel Rhoundjaïa.

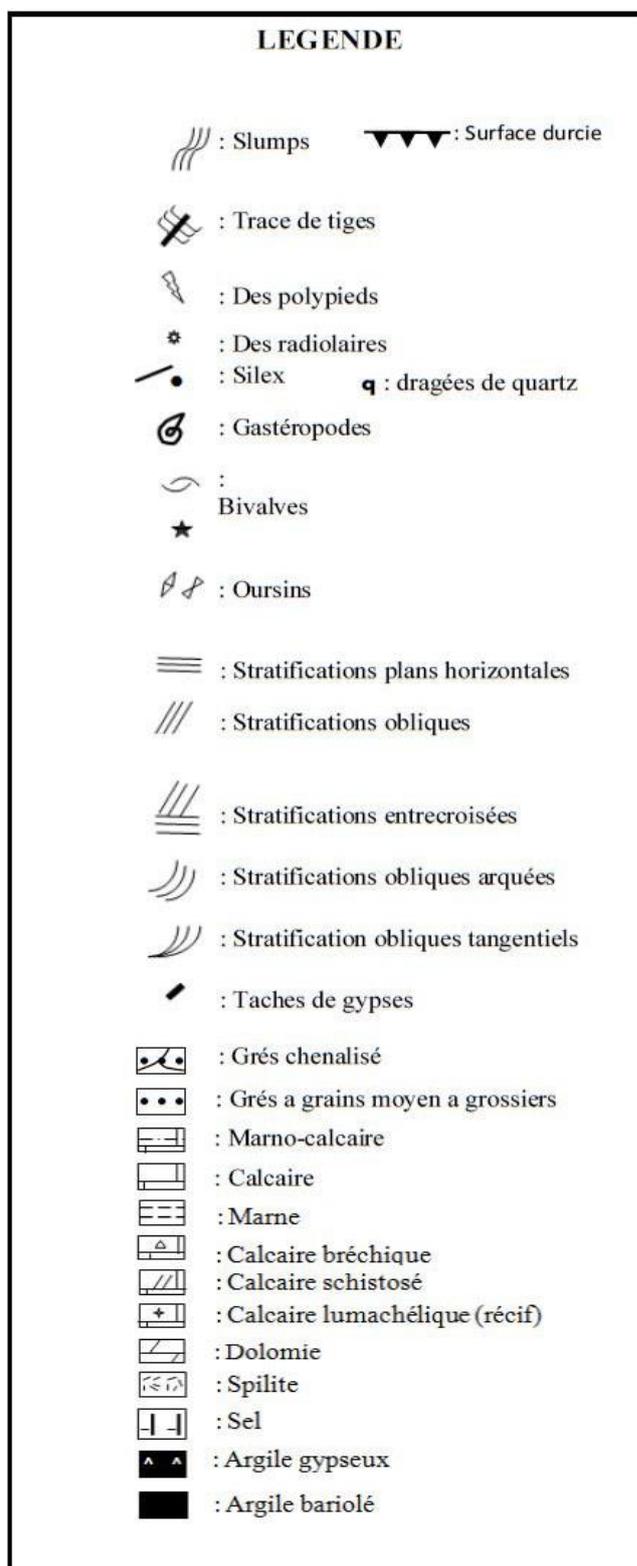


Figure 6 : légende des figures se trouvant sur les coupes géologiques.

C1. Le Trias : Aïn Ouarka :

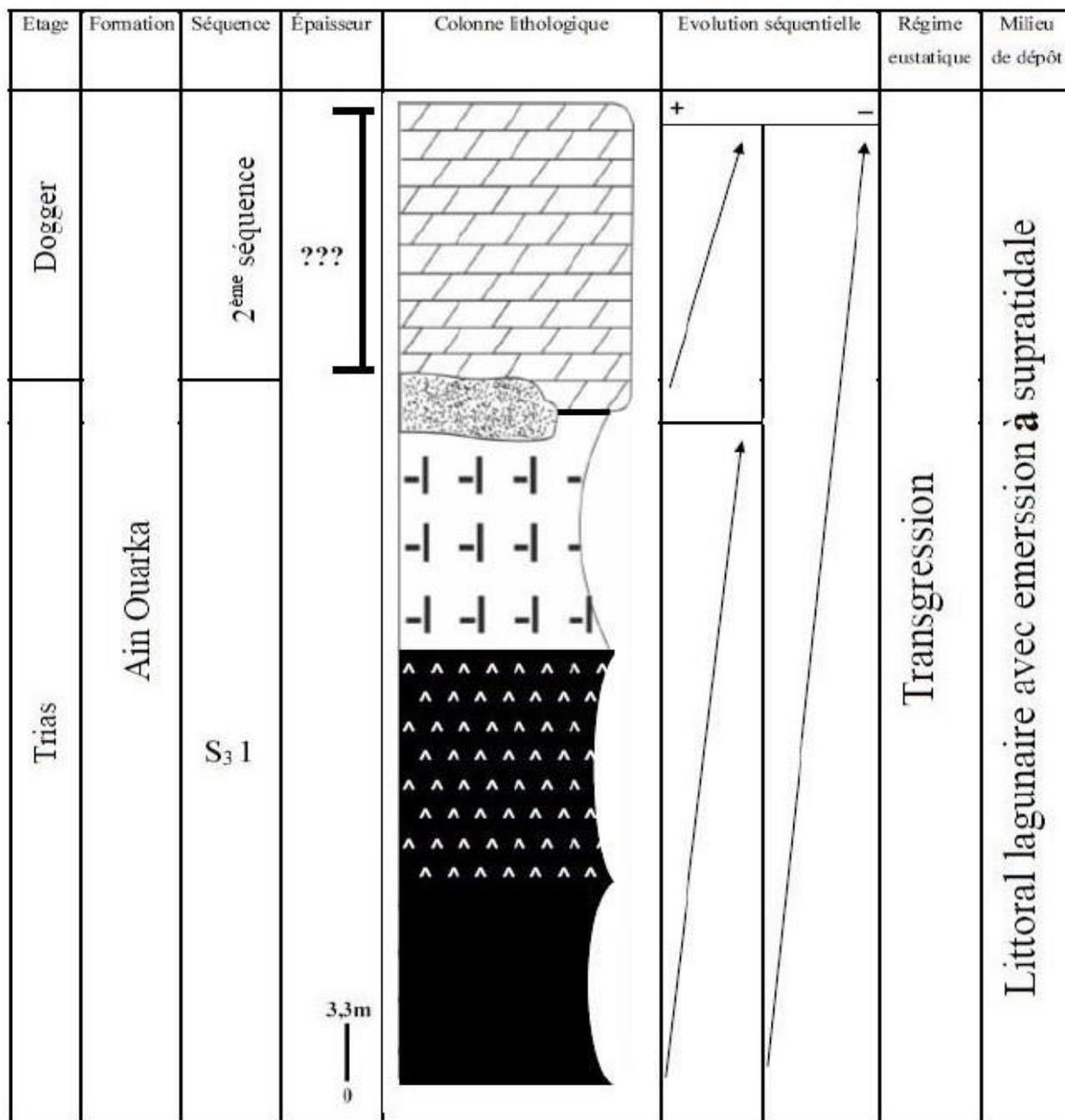


Figure 7 : coupe transgressive de Hammam Ouarka

La coupe d'Aïn Ouarka est une séquence sédimentaire qui englobe de bas en haut une cambe d'argile bariolée à la base suivait par des formations évaporitiques lagunaire (cambe d'argile gypseux puis un massive de sel) le tout et d'Age triasique, avec une saute temporelle direct vers le Dogger, entre ces deux périodes on trouve des passages d'intrusion volcanique.

Dans cette analyse séquentielle, on a pu déterminer deux séquence d'Age différent, la première est d'âge triasique

tandis que la deuxième est d'âge Dogger (Jurassique moyen), avec une discontinuité nette réincarner par l'absence du Lias (Jurassique inferieur), la coupe montre un granoclasement positif (une granocroissance) pour les deux séquences, c-à-d la taille moyenne des grains se réduit avec le temps, ce qui rends compte que le régime eustatique est transgressif avec un milieu de sédimentation littoral lagunaire à supratidale.

C2. Le Jurassique supérieur : coupes de H'Zam el Bagra

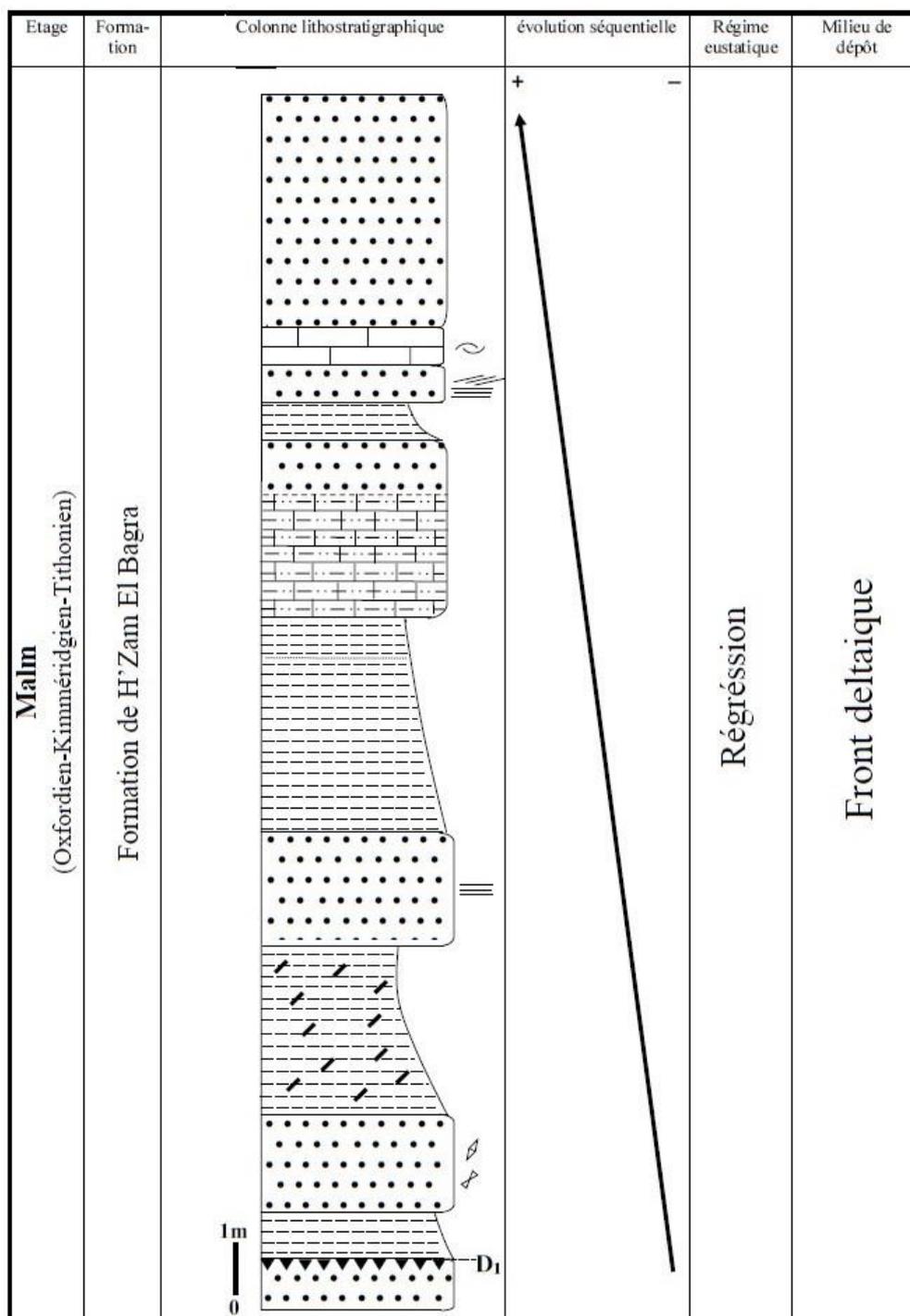


Figure 8 : coupe régressive de H'Zam el Bagra.

La coupe de H'Zam el Bagra début par une surface durcie (D₁), c'est une discontinuité et un toit pour le banc de grès rougeâtre, sur lequel réside notre coupe qui présente une succession de couches et de bancs granodécroissantes (granoclassement négatif), c-à-d la taille moyenne des

grains s'accroît avec le temps, dont laquelle on trouve des marnes, des calcaires et grès, de ce fait, on constate que le régime eustatique est régressif avec un milieu de dépôt de frontdeltaïque.

C3. Coupe de Tiout – membre supérieur – (Crétacé inf.)

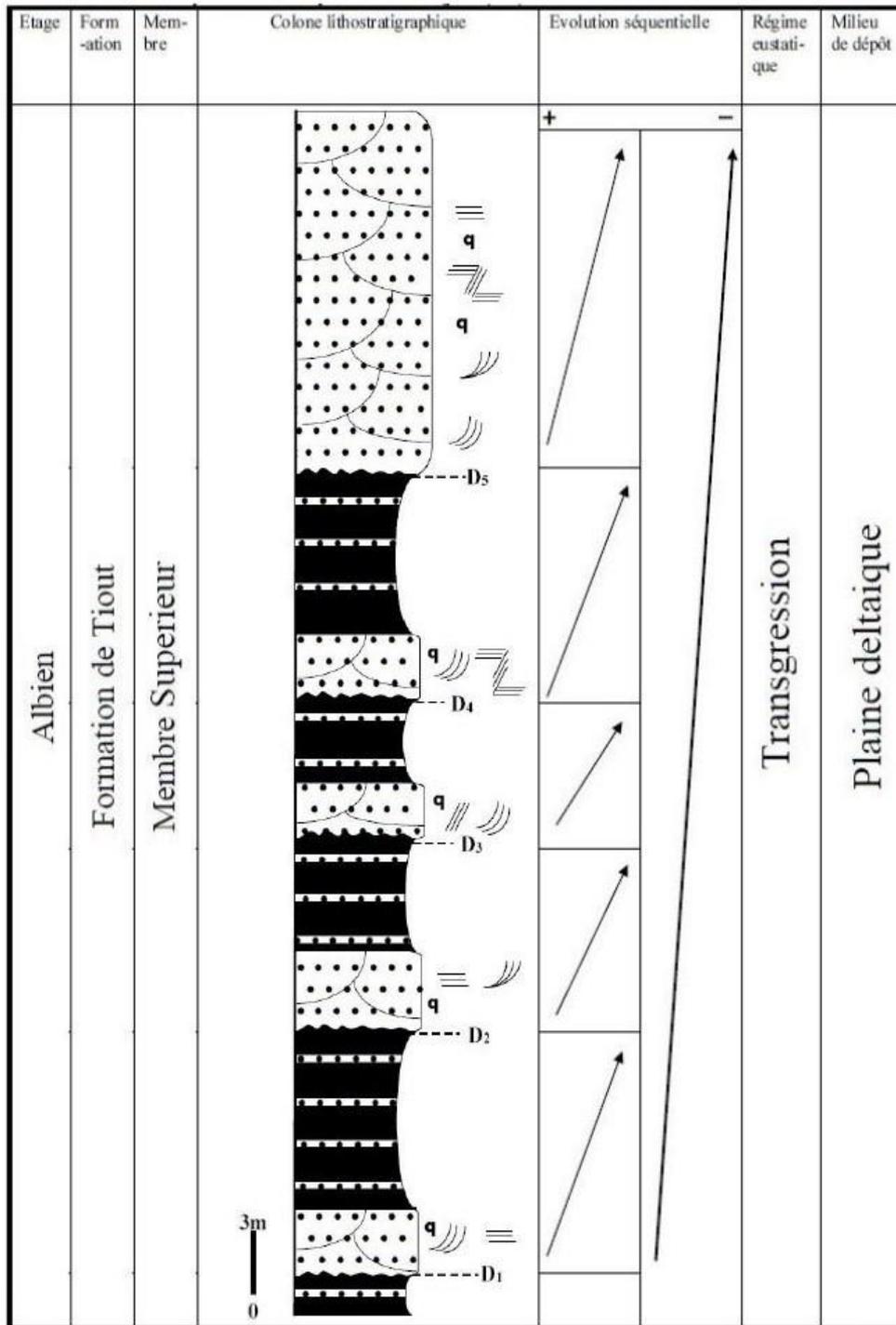


Figure 9 : analyse séquentielle du membre supérieur du synclinal de Tiout.

Le membre supérieur de la coupe de Tiout d'âge Crétacé inférieur, présente cinq discontinuités, délimitant cinq séquences d'ordre deux (S_2), la succession de bancs de grès chenalisés à dragées de quartz et d'argiles intercalées par des passées gréseuses. Les diverses stratifications sédimentaires

qu'on trouve, indiquent la variabilité des directions de courant d'eau. De cette analyse on tire que l'évolution eustatique est transgressive et le dépôt de sédimentation c'est la plaine deltaïque.

C4. Coupe de Rhoundjaïa (Crétacé supérieur)

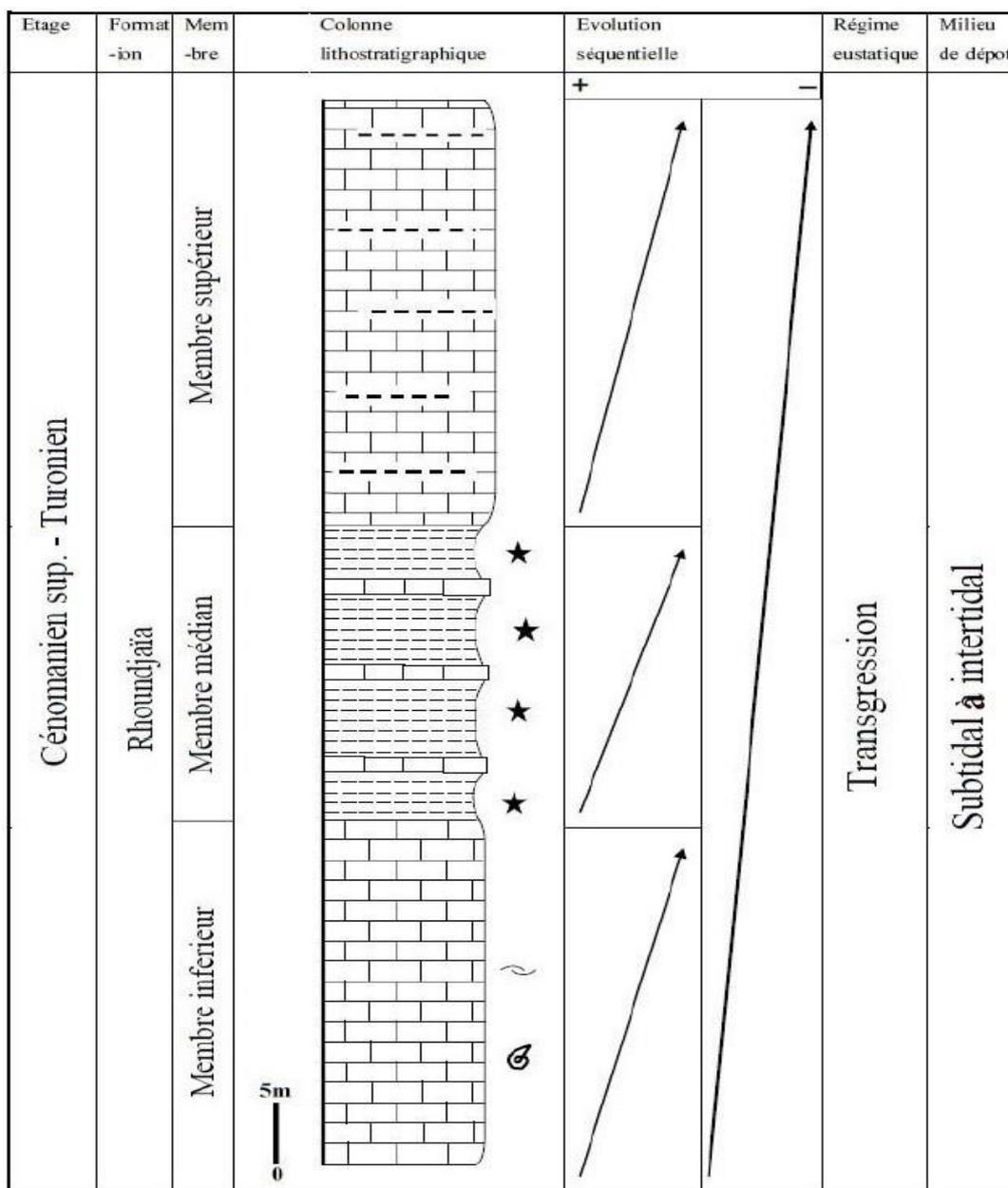


Figure 10 : Coupe de Rhoundjaïa (Crétacé supérieur)

La coupe de Rhoundjaïa d'âge Crétacé supérieur est purement marine dont laquelle on reconnaît des barres calcaires bioturbés à passées marneuses. Combe marneuse intercalée par des calcaires verdâtres jaunâtre. Barre calcaire subhorizontale, beige à la patine, verdâtre à la

cassure, bioclastique et bioturbés à rudistes et avec la présence des fossiles marines, ex : bivalve, gastéropodes, ...etc., faite de 13 bancs séparés par des diaclases. Développé dans un milieu de sédimentation subtidal à intertidal dans un régime eustatique transgressif.

3.5.Synthèse géodynamique : de l'ouverture à l'inversion tectonique

L'étude effectuée dans les quatre coupes (C1, C2, C3, C4) a permis d'identifier la stratigraphie et les lithologies de ces derniers [des lithologies continentaux (C1) d'âge Trias, des lithologies marines (C4) d'âge Lias-Dogger, et des lithologies du milieu mixte (C2, C3) d'âge Malm et Crétacé moyen], plus les contextes structuraux de chaque coupe, généralement des anticlinaux et des synclinaux.

Cela peut nous renseigner sur le régime sédimentaire et aussi sur le régime tectonique, de telle façon qu'on distingue :

a) Le Trias :

A partir des observations faites dans la coupe C1, on note la présence des terrains continentaux évaporitiques (argile gypseuse, gypse, sel) surmontés par des terrains supratidale, peut profonds (les calcaires dolomitiques).

Sur les annexes (décrochement, fracture, failles) de cette déformation (rift) on attribue l'ascension du diapir et du volcanisme.

b) Le Jurassique supérieur :

La coupe C2 montre un changement eustatique inverse vers une régression au niveau des zones mixtes (front deltaïque) une granocroissante, au cours du jurassique supérieur, indices d'un recul des forces tectoniques divergentes.

c) Le Crétacé inférieur :

La coupe C3 démontre une évolution eustatique transgressive dans des zones mixtes fluviales (plaines deltaïques) après qu'elle était régressive au-cours du jurassique supérieur, mettant fin au recul des contraintes divergentes.

d) Le Crétacé supérieur :

L'évolution séquentielle de la coupe C4 de Rhoundjaïa, montre la continuité de la transgression jusqu'au début du Crétacé supérieur, avec évolution des zones de dépôts sédimentaires vers le subtidal à l'intertidale, qui confirme sans aucun doute la genèse du bassin bien marqué (ouverture complète du bassin)

e) L'inversion tectonique :

Les structures majeures de la région traitée tel que les anticlinaux (dj. Chémarihk et dj. Bou Lerfad) et les synclinaux (synclinale de Tiout et synclinale de Rhoundjaïa), qui ont affecté les formations mentionnées au-dessus, sont des structures de compression appliquant de forte pression sur les roches provoquant des témoins enregistrés sur les strates, telle que la schistosité et de décompression tel que la dépression

de Rhoundjaïa entre dj. Djaara et dj. Bou Lerfad, indique l'événement réversible de l'ouverture du bassin ou l'inversion tectonique qui va engendrer une orogénèse post Cénomanién-Turonien ou l'orogénèse alpine.

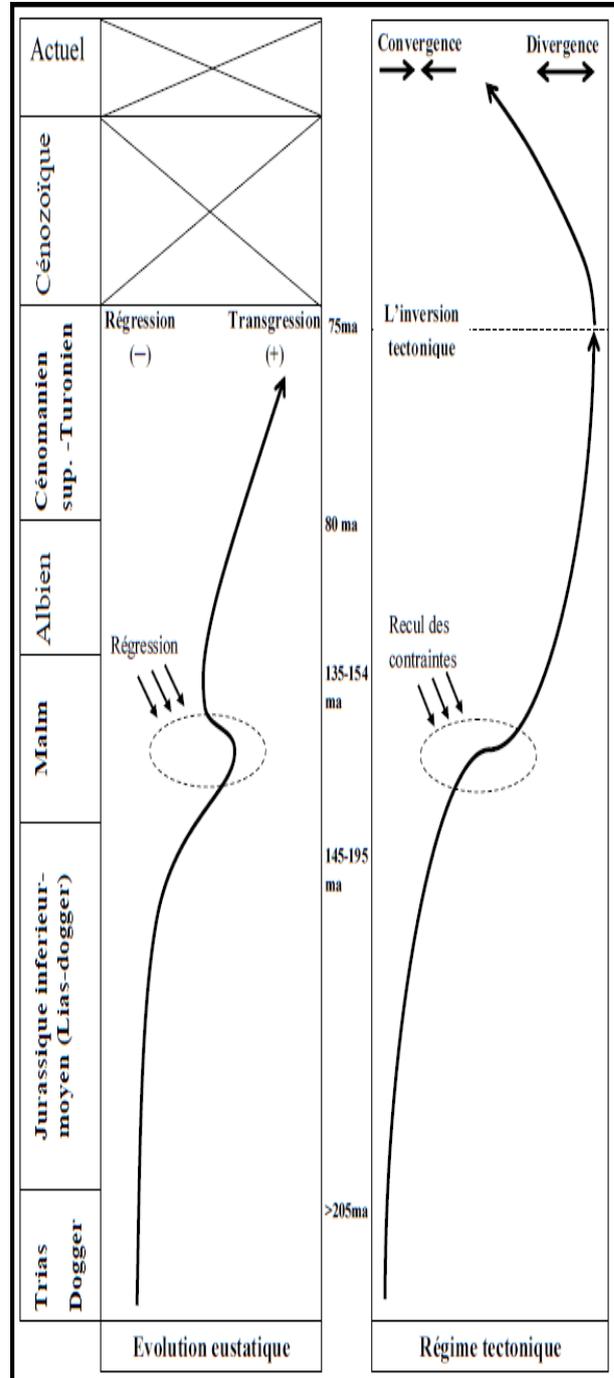


Figure 11 : schéma corrélatif entre le régime eustatique et régime tectonique. (Sans détails des vitesses de changement eustatiques et tectoniques).

Conclusion

L'analyse séquentielle des quatre coupes abouties sur les sites d'études (Ain Ouarka, H'Zam El Bagra, synclinale de Tiout et synclinale de Rhoundjaïa) dans la région d'Ain Sefra, nous a permis de déterminer les milieux de dépôts de ces derniers et de corrélés leur évolution séquentielle avec l'évolution tectonique du secteur.

1- Diapir d'Ain Ouarka construit par des terrains évaporitiques (argiles gypseuses, gypse, sel) d'âge Trias surmonté par les dolomies d'Ain Ouarka d'âge Dogger, qui montre une évolution transgressive, dans un milieu de dépôt littoral lagunaire à supratidale.

2- Formation de H'Zam El Bagra, caractérisée par des dépôts de chenaux séquentiels d'ordre deux séparés par des surfaces durcies (hard grounds) connues sous l'appellation séquence Ksourienne (A. KACEMI) d'âge jurassique supérieur, construite par des alternances binaires de marne et de grès, au sommet de la séquence on rencontre début des passés carbonatés.

3- Le membre supérieur du synclinal de Tiout, baptisé par des dépôts chenalisés d'âge Albien, faite d'une alternance binaire de grès à dragée de quartz et d'argile d'ordre deux connue sous l'appellation de séquence de Barzie (A. KACEMI) séparée par des surfaces de ravinement, l'évolution séquentielle est transgressive dont le milieu de dépôt est celle des plaines deltaïques.

4- Le synclinale de Rhoundjaïa est établi par des terrains purement marins qui commencent par des calcaires fossilifères (bivalve, gastéropodes...) suivi par des combes marneuses à oursins avec des intercalations de calcaires et qui se terminent par des calcaires à passées marneuses, d'âge Cénomani supérieur - Turonien avec un régime transgressif dans des milieux subtidales à intertidales.

Références

[1]. KACEMI1, D. T. (2011). Mise en évidence d'une déformation synsédimentaire transverse en compression au passage Lias-Dogger (Secteur de Zerga - Monts des Ksour - Atlas saharien - Algérie). *Geo-Eco-Trop*(35), 81 - 90.

[2]. Abdelmounim QARBOUS 1, C. H. (2009). Mise en évidence d'un niveau à méga-slumps au sommet de la série triasique du bassin de Tizi n'Test (Haut Atlas,

Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*(31), 35-39.

[3]. Amar, M. (2010). LA PROVINCE MAGMATIQUE DE L'ATLANTIQUE CENTRAL (CAMP) DANS LE BASSIN DES Ksour (Atlas saharien occidental, Algérie. Oran: Université d'Oran.

[4]. Aziza, C. (2012). Géodynamique des bassins triasiques de l'Atlas Saharien Oriental et implication pétrolière. *Mém. Mag. Boumerdes: Univ. M'Hamed Bougara.*

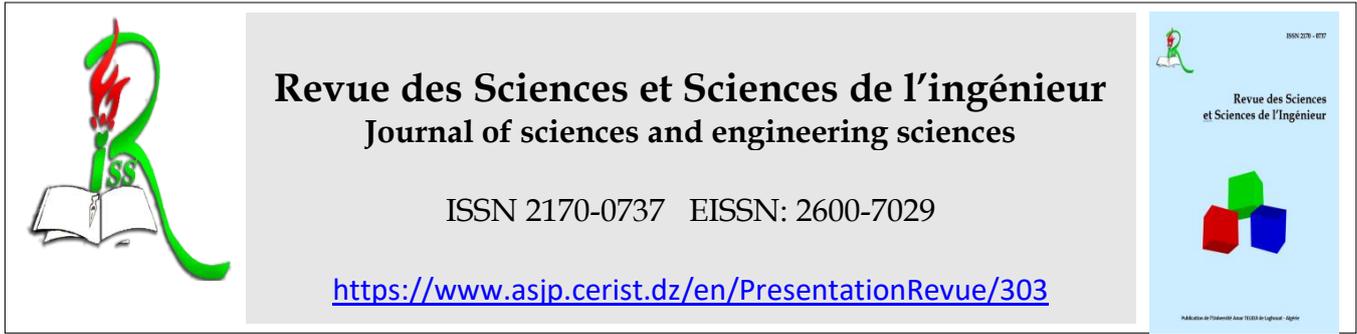
[5]. Boussaad, A. (2009). Analyse Géologique et Pétrophysique de la Zone Sud-Sud-Est du Champ de HAUD BERKAOUI, Développement, Déplétion et Maintien de Pression. Ouargla.

[6]. FILALI Hadjer Saliha, M. S. (2015). Cartographie géologique du secteur de Tiourtelt (Chebkat Tassloh) Atlas Saharien Occidental. tlemcen: université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen.

[7]. KACEMI Ali (2013) : Evolution lithostructural des Monts des Ksour (Atlas Saharien, Algérie) au cours du Trias et du Jurassique : Géodynamique, Typologie du bassin et Télédétection. *Mém. Doct. Univ. Tlemcen.* (2013). Tlemcen: Université Abou BakrBelkaid (UABT).

[8]. Moussaoui Oussama, Z. M. (2016). Cartographie géologique du secteur de Tiout, Atlas Saharien occidental. Tlemcen: Université Abou Bakr Belkaid.

[9]. YOUSFI, S. (2014). Etude hydrodynamique et modélisation des écoulements souterrains dans les gouttières synclinales gréseuses du Barrémo-Albo-Aptien d'Ain Sefra (partie centrale des Monts de Ksour – Atlas Saharien, Nord-Ouest Algérie. Oran: Université Es-Sénia - Oran.



Simulation numérique d'une nouvelle structure de cellule solaire à base de deux couches absorbantes CIGS et CZTS

*Naceur SELMANE¹, Fakhereddine KHEMLLOUL²

¹Electronic department. Laghouat university, Laboratoire Matériaux, Systèmes Énergétiques, Énergies Renouvelables et gestion de l'Énergie (LMSEERGE), A- 03000 Laghouat, Algeria

²Laboratoire de Physique des Matériaux, Université Amar Telidji de Laghouat, Algérie

Received : 2022-11-09

Accepted : 2023-02-12

Abstract: CuInGaSe (CIGS)-based solar cells show promise, but involve a dangerous and expensive indium element. This work aims to solve these problems; The approach is to use thinner CIGS layers. However, very thin layers minimize absorption and reduce cell performance. Adding a second CuZnSnSe (CZTSe) layer absorber should maintain high cell performance. The proposed new cell that has been simulated is MgF₂/ZnO/Al/ZnO:i/CdS(n)/CZTSe(p)/CIGS(p)/Mo, with MgF₂ antireflection layer, ZnO:i passivation layer, emitter layer CdS, CZTSe/CIGS double absorber layer, ZnO-Al transparent conductive oxide (TCO) and back contact of Molybdenum (Mo) element. TCAD SILVACO using the ATLAS module was used in the simulation. Various parameters including layer thickness and doping concentration are optimized. The results show that the addition of CZTSe, the yield increased from 22.40 to 29.22%

Key-words: CZTSe-CIGS absorber layers; TCAD Silvaco module-Atlas; thickness and doping concentration

Résumé : Les cellules solaires à base de CuInGaSe (CIGS) sont prometteuses, mais impliquent un élément d'indium dangereux et coûteux. Ce travail vise à résoudre ces problèmes. L'approche consiste à utiliser des couches CIGS plus fines. Cependant, les couches très fines minimisent l'absorption et réduisent les performances des cellules. L'ajout d'un deuxième absorbeur de couche CuZnSnSe (CZTSe) devrait maintenir des performances élevées de la cellule. La nouvelle cellule proposée qui a été simulée est MgF₂/ZnO/Al/ZnO:i/CdS(n)/CZTSe(p)/CIGS(p)/Mo, il s'agit d'une couche antireflet MgF₂, couche de passivation ZnO:i, couche émettrice CdS, double couche absorbante CZTSe/CIGS, oxyde conducteur transparent ZnO-Al (TCO) et contact arrière de l'élément de molybdène (Mo). Nous avons utilisé TCAD SILVACO pour la simulation, notamment le module ATLAS. Divers paramètres sont optimisés, y compris l'épaisseur de couche et la concentration de dopage, Les résultats montrent que l'addition du CZTSe augmente le rendement de 22,40 à 29,22 %.

Mots-clés : couches absorbantes CZTSe-CIGS; TCAD Silvaco module -Atlas; Épaisseur et concentration de dopage

* Corresponding author: naceur_af@yahoo.fr

1. INTRODUCTION

L'énergie solaire est verte et durable, tant que le Soleil existe. Par conséquent, des efforts considérables sont consacrés à la technologie de l'énergie solaire, en particulier dans les cellules photovoltaïques p-n à couche mince. Cellules binaires, par ex. CdTe[1], cellules ternaires par ex. CIS [2, 3] et cellules quaternaires, par ex. CuInGaSe₂ (CIGS)[4] sont des domaines primordiaux de la recherche photovoltaïque.

La recherche implique divers aspects afin d'améliorer la stabilité des cellules, les performances, la réduction des coûts et la minimisation de l'impact environnemental. Par conséquent, les méthodes de préparation cellulaire, la composition, les rapports des éléments constitutifs, l'épaisseur de la couche et d'autres paramètres ont tous été pris en compte dans la recherche. Dans les cellules solaires à base de CIGS, la valeur de la bande interdite d'énergie peut être réglée en faisant varier la valeur de la fraction molaire x dans la formule générale CuIn_xGa_{1-x}S. La valeur de la bande interdite CIGS passe de 1,0 à 1,5 eV en fonction de la variation de la valeur x [4-9]. Malgré cela, la technologie CIGS n'est pas sans défi. Par exemple, les éléments indium et gallium sont très coûteux, pas suffisamment abondants et peuvent produire des composés dangereux dans leurs déchets[10-12]. Ainsi, il est nécessaire de développer de nouveaux matériaux à moindre coût, avec des éléments disponibles qui préservent de l'environnement avec des absorbances de rayonnement élevées. Une alternative appropriée pour CIGS Le CZTS est un dérivé du CIGS avec une structure cristalline similaire, où le zinc remplace l'indium et le sélénium remplace le gallium. Les problèmes de coût et de rareté peuvent ainsi être éliminés.

Il existe d'autres raisons pour lesquelles les matériaux CZTS sont largement considérés comme des couches absorbantes dans les cellules solaires[13-15]. Leurs bandes interdites directes accordables sont compatibles avec les rayonnements solaires incidents. Ils ont également des valeurs de coefficient d'absorption élevées de plus de 10⁴cm⁻¹[16]. De plus, la simulation est une méthode puissante pour comprendre les comportements électriques des matériaux. C'est un moyen efficace pour éviter les coûts expérimentaux élevés. Les simulations sont largement utilisées pour prédire les différentes propriétés des matériaux en optoélectronique, telles que : le logiciel wx-AMPS[16], le programme Afors[17], le programme Scaps [18] et le programme TCAD Silvaco [19, 20]. Dans de nombreux cas, les simulations ouvrent des nouvelles voies à la recherche expérimentale en montrant les valeurs d'efficacité théoriques de cellules solaires données. À notre connaissance, il existe peu d'études de simulation, [21] qui traitent des cellules basées sur des couches combinées CZTSe/CIGS, ce qui a incité la présente étude.

Dans ce travail, les propriétés électriques de nouvelles cellules solaires à couches minces, utilisant Cu₂ZnSn(S,Se)₄ (écrit ici comme CZTSe) et Cu(In,Ga)Se₂ (écrit ici comme CIGS), comme couches absorbantes combinées, sont simulées. Le CdS est utilisé comme couche émettrice et

le ZnO-Al comme TCO[22-24]. L'effet de l'insertion de CZTSe, en tant que couche absorbante supplémentaire à une fine couche CIGS, sur les performances de la cellule est le problème central. L'objectif de l'étude est triple : premièrement, utiliser une épaisseur de couche CIGS plus petite pour éviter les inconvénients décrits ci-dessus. Les éléments Cu, Zn et S sont utilisés dans le CZTSe ajouté au détriment de l'épaisseur de la couche CIGS. Deuxièmement, étudier les effets de divers paramètres, y compris l'épaisseur et la concentration de dopage, pour différentes couches, avec un accent particulier sur les deux couches absorbantes. Concevoir une nouvelle cellule solaire, basée sur CZTSe et CIGS avec une efficacité nettement supérieure à celle rapportée précédemment[32].

2. DÉTAILS DE LA SIMULATION

La simulation a été réalisée avec l'environnement de TCAD SILVACO en utilisant le module Atlas. Il s'agit d'un simulateur de modélisation de composants bidimensionnel très utile [25] avec la capacité de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des semi-conducteurs. En plus des propriétés électriques externes, le logiciel donne des informations sur les distributions internes de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique et les potentiels. Ceci est réalisable en résolvant numériquement l'équation de Poisson avec les équations de continuité des électrons et des trous en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par le programme. Toutes les propriétés des matériaux impliqués dans la présente cellule solaire sont définies. La cellule implique un réseau de fines couches semi-conductrices de MgF₂/ZnO/ZnO:i/n-CdS/p-CZTS/p-CIGS/Moto simulé par TCAD Silvaco-Atlas. La structure complète du dispositif est représentée schématiquement sur la "Fig1". Dans la présente étude, l'élément molybdène (Mo) est utilisé ici comme contact arrière, CIGS et CZTSe comme deux couches absorbantes, CdS comme couche tampon, ZnO non dopé: i comme couche intrinsèque, ZnO-Al comme TCO et MgF₂ comme antireflet. couche de revêtement (ARC). Les bons choix de maillage, de modèles et de méthodes jouent un rôle important dans la précision de la simulation. Tous les paramètres optiques utilisés ont été extraits de rapports antérieurs [26, 27]. Le rayonnement AM 1,5, avec une densité de puissance de 1000 W/m², est utilisé comme source d'éclairage dans la simulation.

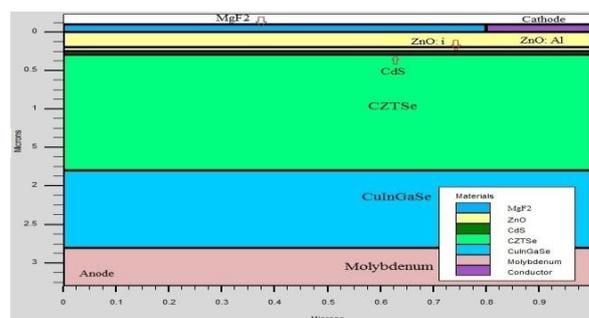


Figure 1: Structure de la cellule solaire simulée par TCAD Silvaco

Atlas

Lors de la simulation par atlas TCAD, les modèles physiques sont restés inchangés. Les principaux paramètres de simulation pour différentes couches, basés sur la littérature [2, 17, 28-31] sont présentés dans le tableau 1. L'épaisseur de couche mesurée de ZnO-Al a été fixée à 200 nm, avec une bande interdite à 3,4 eV, un indice de réflexion de la lumière n compris entre 1,8 et 2,8, une transmission T comprise entre 0,70 et 0,42 [26], un travail de sortie de 4 eV et une affinité électronique 4 eV. La couche MgF₂ ARC a été utilisée pour réduire les pertes de réflexion et améliorer le confinement optique, comme décrit dans la littérature [43]. La deuxième couche absorbante CZTSe est avantageuse pour le coefficient d'absorption élevé (>10⁴cm⁻¹)[21]. Sa bande interdite peut également être réglée de 1,0 eV (pour le CZTSe pur) à 1,5 eV (pour le CZTS pur). La bande interdite varie avec la valeur de x dans la formule générale du matériau Cu₂ZnSn(SexS_{1-x})₄. Les valeurs des bandes interdites CZTSe et CZTS ont été calculées à l'aide de la théorie fonctionnelle de la densité (DFT) [15, 32-35] avec le paramètre d'inclinaison (b ~ 0,1) comme indiqué dans l'équation (1) :

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(\text{CZTSe}) + xE_g(\text{CZTS}) - bx(1 - x) \quad (1)$$

Une variation linéaire de Eg pour le matériau peut être obtenue en fonction de x dans le cas d'un petit paramètre de courbure b, en utilisant l'équation (2)

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(\text{CZTSe}) + xE_g(\text{CZTS}) \quad (2)$$

Si x = 0, alors l'équation (2) donne la valeur de la bande interdite pour le CZTSe pur à 1,0 eV.

Tableau1. Principaux paramètres de simulation utilisés pour différentes couches de la cellule solaire.

Propriétés de couches	Type de semiconducteurs				
	n-ZnO	n-CdS	p-CZTSe	p-CIGS	ZnO:i
Permittivité Dielectrique ε _r	10	10	13.6	10	10
Epaisseur(μm)	0.2	variable	Variable	Variable	0.05
Energie de gap (eV)	3.4	2.45	1.096	1.2	3.4
Affinité Electronique (eV)	4.55	4.45	4.1	4.5	4.55
densité effective de la bande conduction N _c (cm ⁻³)	4 ×10 ¹⁸	2 ×10 ¹⁸	2.2 ×10 ¹⁸	2 ×10 ¹⁸	4 ×10 ¹⁸

densité effective de la bande valence N _v (cm ⁻³)	9 ×10 ¹⁸	1.5 ×10 ¹⁹	1.8 ×10 ¹⁹	2 ×10 ¹⁸	9 ×10 ¹⁸
Mobilité des électrons μ _n (cm ² /V.s)	5 ×10 ¹	5 ×10 ¹	5 ×10 ²	5 ×10 ¹	5 ×10 ¹
Mobilité de trous (cm ² /V.s)	2 ×10 ¹	2 ×10 ¹	2.5 ×10 ¹	2 ×10 ¹	2 ×10 ¹
concentration doping des donneurs N _d (cm ⁻³)	5 ×10 ¹⁸	1 ×10 ¹⁷	0	0	1.1 ×10 ¹⁸
concentration doping des accepteurs N _a (cm ⁻³)	0	0	5 ×10 ¹⁶	1 ×10 ¹⁵	1.1 ×10 ¹⁸

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. mono couche-absorbante (CIGS)

L'effet de l'ajout de la deuxième couche absorbante CZTSe sur le dispositif est un objectif majeur de cette étude. Par conséquent, la structure conventionnelle ZnO-Al(TCO)/ZnO(i)/CdS/CIGS/Mo, sans deuxième couche CZTSe ou couche ARC (MgF₂), est simulée en premier. Les paramètres physiques de chaque couche sont présentés ci-dessus dans le tableau 1. L'épaisseur de la couche absorbante CIGS a été modifiée de 1,0 à 2,5 μm, en maintenant l'épaisseur de la couche tampon CdS fixée à 0,05 μm. Les effets de l'épaisseur de la couche CIGS sur les paramètres de la cellule sont résumés dans Fig 2. Les figures 2a à c montrent que les valeurs de performance des cellules sont améliorées avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'absorbant CIGS. La figure 6b montre que la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et la densité de courant de court-circuit (J_{sc}) atteignent des valeurs élevées de 0,784 V et 39,7 mA/cm², respectivement, avec une épaisseur de couche absorbante croissante à 2,5 μm. La figure 6c montre que les valeurs du facteur de remplissage (FF) et de l'efficacité de conversion (η) ont continué d'augmenter avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CIGS. Les valeurs d'efficacité de conversion sont conformes aux travaux antérieurs [18, 36-38] . De même, la figure 6d montre une valeur d'efficacité quantique (QE) accrue avec une épaisseur de couche accrue.

Comme pour une couche d'absorbant CIGS, une épaisseur plus élevée donne des performances de cellule plus élevées. Parmi la gamme d'épaisseur utilisée, l'épaisseur optimale est de 2,5 μm, en accord avec la littérature [25] . Ceci est compréhensible car les photons de plus grande longueur

d'onde peuvent être absorbés par la couche absorbante plus épaisse, ce qui produit une génération de paires électron-trou plus élevée. Par conséquent, les valeurs J_{sc} , V_{oc} , FF et η augmentent.

Malgré ce qui précède, l'amélioration des performances des cellules par une épaisseur de couche CIGS accrue ne justifie toujours pas l'utilisation d'épaisseurs plus élevées, en aucun cas. Par exemple, lorsque l'épaisseur de la couche est plus que doublée, de 1,0 à 2,5 μm , l'efficacité de conversion η augmente de $\sim 22,3$ à $\sim 24,3$ % seulement. De même, d'autres valeurs de paramètre de la cellule augmentent dans une certaine mesure. Le problème qui se pose est que les améliorations des paramètres de la cellule ne justifient pas des épaisseurs plus élevées des matériaux CIGS coûteux, notamment l'indium et le gallium. Il devrait y avoir un autre moyen plus pratique d'obtenir des performances plus élevées.

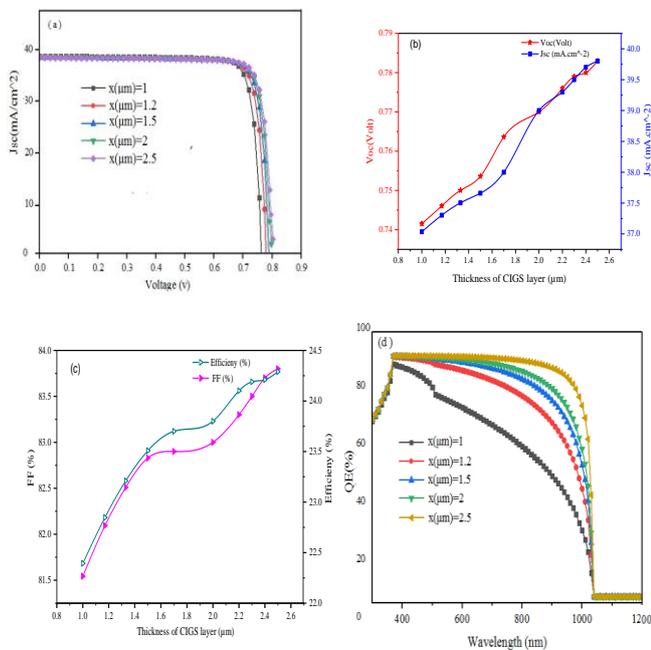


Figure 2: Effet de l'épaisseur de la monocouche d'absorbant CIGS sur les performances des cellules ZnO(TCO)/ZnO:i/CdS/CIGS/Mo. (a) J-V tracés, (b) J_{sc} & V_{oc} , (c) rendement & FF, (d) Rendement quantique

3.2. Deux couches absorbantes

La solution au problème ci-dessus est décrite ici. Si les performances de la cellule peuvent être augmentées, sans coût plus élevé hérité d'une épaisseur de couche CIGS plus élevée, cela devrait alors être la meilleure stratégie, comme décrit ici. L'utilisation d'une couche CIGS plus fine et d'une couche CZTSe à faible coût comme autre adsorbant supplémentaire pourrait être la solution pour obtenir des performances cellulaires plus élevées sans augmentation des coûts. L'épaisseur de la couche CIGS de 1,0 μm est

utilisée ici sur la base de la littérature[38]. Des études de simulation de la cellule à deux couches d'absorbant proposée sont présentées ici. L'optimisation de divers paramètres des composants de la cellule solaire pour obtenir les meilleures performances est primordiale.

3.2.1 Effets des épaisseurs des couches CdS et CZTSe :

En utilisant tous les paramètres des autres couches mentionnées ci-dessus. L'épaisseur de la couche absorbante CIGS a été fixée à 1,0 μm et la deuxième couche absorbante insérée CZTSe à 1,5 μm pour donner une épaisseur totale pour le CIGS + CZTSe combiné à 2,5 μm .

pour optimiser l'épaisseur de la couche tampon CdS. Les épaisseurs par défaut des couches CZTSe et CIGS sont respectivement de 1,5 et 1 μm , avec une épaisseur totale de 2,5 μm utilisée dans la simulation, l'épaisseur de la couche d'émetteur CdS est évaluée ici. La valeur d'épaisseur de la couche d'émetteur CdS dans la plage de 0,05 à 0,5 μm a été utilisée, comme décrit sur la figure 3. D'autres valeurs de paramètres optimales pour les autres couches restantes sont restées inchangées. Tous les paramètres de performance des cellules, tracés J-V, V_{oc} , J_{sc} , FF et η , sont plus élevés avec une épaisseur de couche CdS plus fine. L'épaisseur de 0,05 μm donne la valeur d'efficacité de conversion optimale de 25,88 %, conformément aux études expérimentales antérieures[17, 39]. Le J_{sc} diminue également de 41,3 à 33,3 mA/cm^2 avec l'augmentation de l'épaisseur de l'émetteur CdS. Les résultats sont justifiables. Le CdS est un semi-conducteur de type n avec une énergie de bande interdite de 2,3 eV (E_g) supérieure à celle du CIGS (type p 1,2 eV) et du CZTSe (type p 1,0 eV). Le courant photogénéré le plus élevé résulte des deux couches d'absorbant avec peu de contribution de la couche d'émetteur CdS à bande interdite plus large. Par conséquent, J_{sc} augmente avec une épaisseur de couche émettrice plus petite, ce qui entraîne un taux de combinaison plus faible dans cette zone. La petite épaisseur de 0,05 μm présente des valeurs de performance de cellule optimales pour FF, V_{oc} , J_{sc} et η . En cas de couche émettrice très fine, les porteurs minoritaires se déplacent librement vers l'électrode, assurant ainsi leur collecte. Une épaisseur de couche CdS plus élevée augmente la probabilité de recombinaison des porteurs dans la couche émettrice avant d'atteindre les électrodes des deux côtés.

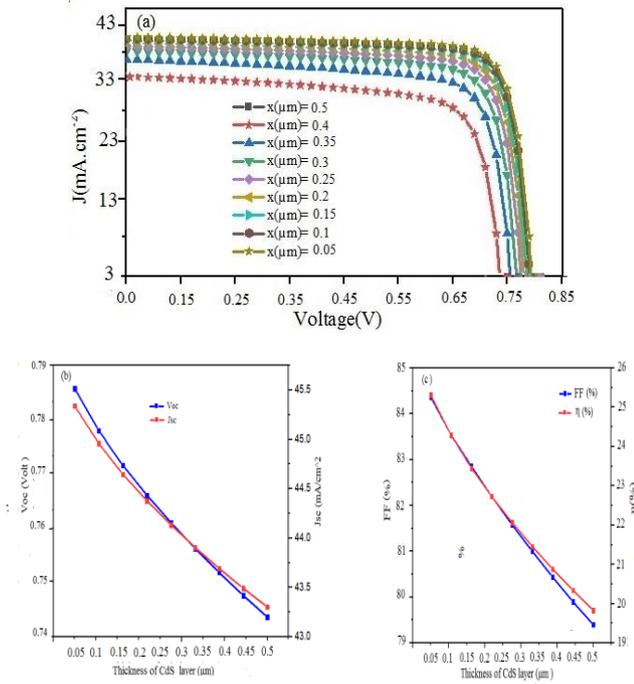


Figure3: Effet de l'épaisseur de la couche tampon de l'émetteur CdS sur les paramètres de performance des cellules solaires MgF₂/ZnO/ZnO:i/n-CdS/p-CTZS/p-CIGS/Mo. (a) tracés J-V, (b) valeurs J_{sc} et V_{oc} , (c) valeurs FF et η

L'épaisseur supplémentaire de la couche d'absorbeur CZTSe affecte les paramètres de la cellule. Comme la première couche absorbante du CIGS est responsable de la conversion des photons en excitons électron-trou, la couche absorbante totale doit avoir une absorption élevée, en particulier dans le visible. Il est donc préférable que ce matériau présente une bande interdite directe ; de l'ordre de 1,0 à 1,2 eV. La bande interdite pour le matériau de la couche absorbante doit être adaptée à diverses longueurs d'onde incidentes pour maximiser l'efficacité de conversion des cellules. Les deux couches absorbantes de CIGS et CZTSe, avec deux bandes interdites différentes de 1,2 et 1,0 eV, respectivement, sont donc utiles. Afin de maximiser l'absorption dans la plage de lumière incidente, la présente étude se concentre davantage sur la deuxième couche absorbante CZTSe. Comme discuté ci-dessus, l'épaisseur du CIGS est maintenue à une valeur minimale pour éviter des coûts inutiles. Dans l'étude d'optimisation de l'épaisseur de la couche CZTSe ici, la plage de 0,1 à 1,5 μm a été utilisée dans la simulation. L'effet de l'épaisseur de la couche CZTSe sur les performances des cellules solaires est examiné et les tracés J-V résultants sont décrits à la figure 4a. Les figures 4a et b montrent que le V_{oc} reste approximativement constant à 0,79 V. C'est parce que le V_{oc} est déterminé par l'écart à bande étroite de CZTSe. Le J_{sc} augmente significativement de 40,7 à 44,22 mA/cm² avec les épaisseurs élevées, comme le montre la fig 4b. L'amélioration est due à une épaisseur de couche absorbante plus élevée qui augmente le nombre de

photons absorbés et, par conséquent, augmente les paires électron-trou.

La valeur FF passe de 84 % à 86,2 % avec l'augmentation de l'épaisseur de la couche CZTSe, Figure 4c. qui aide à comprendre les performances des cellules solaires à diverses longueurs d'onde incidentes, a également été étudiée ici. La figure 9d montre l'amélioration de l'efficacité quantique, à différentes longueurs d'onde, avec une épaisseur de couche absorbante accrue. Dans la plage de longueurs d'onde de 300 à 1 000 nm, la valeur d'efficacité quantique reste constante à 90 %, avec une épaisseur de couche d'absorbeur inférieure à 1,0 μm. Une réponse supplémentaire se produit également à 1 150 nm dans la région IR, avec une épaisseur supérieure de 1,15 μm. La réponse spectrale totale dans les trois régions spectrales (proche IR, visible et proche UV) est plus faible avec une épaisseur plus faible qu'avec des épaisseurs élevées. Les faibles valeurs de QE à des longueurs d'onde inférieures à 350 nm et supérieures à 1150 nm, Fig 4d, résultent de différents processus de recombinaison qui se produisent éventuellement aux contacts avant et arrière. Ils sont également dus à la faible absorption qui se produit dans ces plages. Par conséquent, le QE diminue fortement dans ces régions.

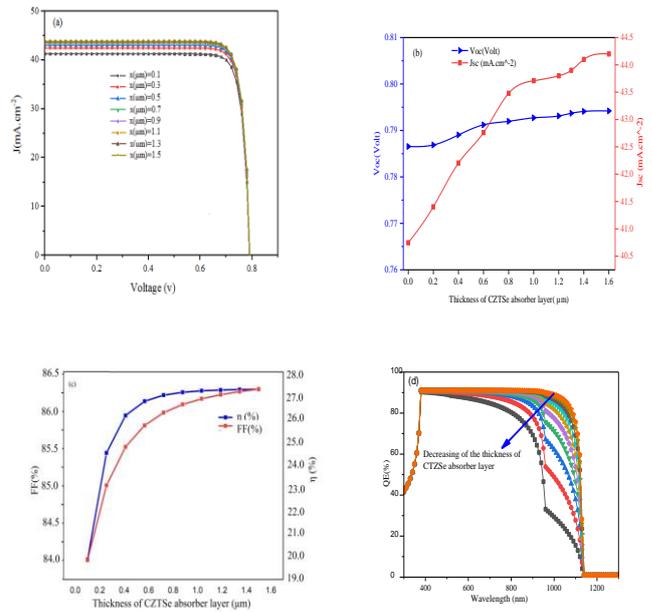


Figure4 Effet de l'épaisseur de la couche d'absorbeur CZTSe sur les performances de la cellule solaire MgF₂/ZnO/ZnO:i/n-CdS/p-CTZS/p-CIGS/Mo. a) J-V plots, b) J_{sc} & V_{oc} , c) Efficacité & FF, d) r

3.2.2. Effets des concentrations de dopage de la couche semi-conductrice

La sensibilité de la présente cellule solaire simulée aux impuretés ou aux défauts dans diverses couches doit être étudiée. Les effets de la concentration de dopage, dans les couches puis-CdS, p-CIGS et p-CZTSe, sont évalués ici. Les

trois couches sont impliquées dans la formation de la jonction p-n, qui est le composant de base de la cellule solaire. Ayant optimisé les épaisseurs de couche comme décrit ci-dessus, tout en maintenant l'épaisseur du CIGS au minimum, l'effet des concentrations de dopant est évalué ici, tout en maintenant la densité de dopage (Nd) pour la couche de TCO (ZnO-Al) à $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

- Concentration de dopage dans la couche CdS

L'effet de la couche de CdS Nd sur les performances de la cellule est décrit à la "Fig 5". La valeur Nd pour les autres couches est indiquée dans le tableau I. La concentration de CIGS est fixée ici à $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Les figures 5a et b montrent que l'augmentation du Nd pour le CdS couche, dans la plage de 1×10^{17} à $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, augmente tous les paramètres cellulaires, y compris η , FF, V_{oc} et J_{sc} . À des valeurs Nd supérieures à $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, tous les paramètres de performance de la cellule diminuent. Par conséquent, la valeur optimale de densité de dopage de la couche de CdS est de $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ avec une efficacité de conversion maximale de 28,5 %. L'effet négatif de concentrations de dopage plus élevées est justifiable. Avec une densité de dopage plus élevée, un champ électrique plus élevé se traduit par la région de la zone de charge d'espace (CSZ) entre la couche CdS et la couche absorbante CZTSe, ce qui encourage les porteurs minoritaires (trous) à se déplacer vers le contact arrière. De même, le champ électrique dans les couches absorbantes encourage les électrons à se déplacer vers la face avant. De plus, avec des valeurs de bande interdite de couche absorbante de 1,0 et 1,2 eV, les énergies photoniques supérieures à ces bandes interdites sont converties en chaleur sous forme de relaxation du réseau. Un tel procédé diminue le rendement de conversion. Par conséquent, des concentrations de dopage plus élevées dans la couche absorbante de l'émetteur doivent être évitées pour réduire les pertes par recombinaison. Sinon, le fort champ électrique dans la zone d'appauvrissement devient fort et accélère les porteurs minoritaires sans leur permettre de diffuser vers d'autres côtés. L'effet négatif de la concentration élevée de dopage de la couche tampon ($> 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) sur les performances des cellules, observé ici, est cohérent avec les résultats expérimentaux antérieurs]. [34, 40]

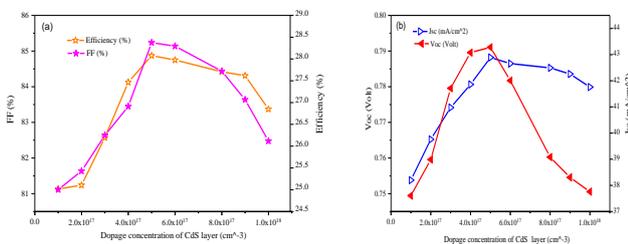


Figure 5 : Effet de la concentration de dopage de la couche émettrice de CdS sur les performances de la cellule solaire $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{ZnO} : i/n\text{-CdS}/p\text{-CTZS}/p\text{-CIGS}/\text{Mo}$. (a) J_{sc} et V_{co} , (b) Efficacité et FF

-Concentration de dopage dans la couche CIGS

La concentration de dopage dans la couche CIGS peut affecter de manière significative les performances de la cellule. L'effet de la concentration de CIGS sur la performance cellulaire est étudié. La concentration de dopage Na dans la couche absorbante CIGS a été variée dans la plage 1×10^{14} - $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Les concentrations de dopage Nd pour les couches CdS, ZnO et CTZSe ont été maintenues à 5×10^{17} , 10^{18} cm^{-3} et $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, respectivement

Les résultats sont résumés dans la figure 6. Tous les paramètres de performance de la cellule sont améliorés en augmentant la couche CIGS Nd dans la plage 1×10^{14} - $\sim 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, en utilisant nous avons utilisé pour tracer l'échelle logarithmique pour l'axe de concentration. V_{oc} , J_{sc} , FF et η les valeurs augmentent et atteignent respectivement 79,6 mV, 43,37 mA/cm², 85,3 % et 28,6 %, comme le montrent les figures 6a et b. Toutes ces améliorations sont observées dans les cas de concentrations de dopage inférieures à $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

A des concentrations de dopage plus élevées, allant de 5×10^{15} à $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, les choses sont différentes. Les valeurs de J_{sc} , FF et l'efficacité diminuent facilement avec une concentration accrue, tandis que le V_{co} reste presque constant à $\sim 0,796 \text{ V}$. Dans l'ensemble, la concentration de dopage plus élevée affecte négativement les paramètres de performance de la cellule, notamment J_{sc} . Cela peut réduire la possibilité de collecter des électrons libres générés par les rayonnements incidents au niveau du contact avant et peut réduire la valeur J_{sc} . Des concentrations de porteurs plus élevées augmentent le désordre cristallin et diminuent les performances de la cellule. Par conséquent, des concentrations de dopage très élevées doivent être évitées dans la couche CIGS pour éviter les pertes de recombinaison associées aux défauts. D'autres paramètres clés pour augmenter le J_{sc} sont les longueurs de diffusion pour l'électron (L_n) et le trou (L_p), comme décrit dans les équations (3-4) [41].

$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2} \tag{3}$$

$$L_p = (D_p \tau_p)^{1/2} \tag{4}$$

D_n et D_p parent respectivement les coefficients de diffusion des électrons et des trous, tandis que τ_n et τ_p sont respectivement les durées de vie des électrons et des trous.

Les équations (3) et (4) démontrent la relation entre la longueur de diffusion et la mobilité et la durée de vie des porteurs minoritaires. La mobilité est également liée au coefficient de diffusion D_n par la relation d'Einstein, équation (5) :

$$D_n / \mu_n = kT / q \tag{5}$$

Où kT/q est le potentiel thermodynamique. Tous les paramètres mentionnés ci-dessus sont interdépendants. Avec une concentration de dopage supérieure à $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, la mobilité diminue, tandis que la durée de vie dépend de la concentration de dopage de manière complexe[42]. La durée de vie est affectée par plusieurs mécanismes de recombinaison, comme la recombinaison Auger. Cela résulte de défauts de réseau qui créent des niveaux de pièges dans la bande interdite. Des défauts cristallins sous diverses formes, tels que des défauts ponctuels, des dislocations ou des joints de grains, peuvent ainsi se produire en raison d'une concentration de dopage accrue. De tels défauts encouragent la recombinaison, donnant des valeurs J_{sc} abaissées[43].

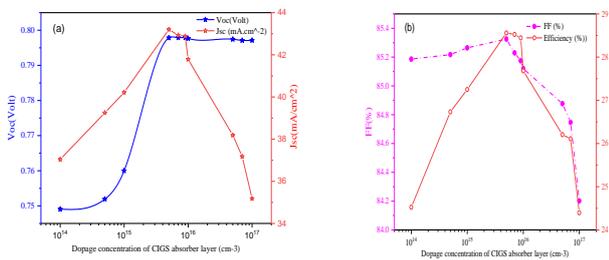


Figure 6: Effet de la concentration de dopage de la couche absorbante CIGS sur les performances de la cellule solaire $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{i}/\text{n}-\text{CdS}/\text{p}-\text{CTZS}/\text{p}-\text{CIGS}/\text{Mo}$ (a) J_{sc} & V_{oc} , (b) Efficacité & FF

- Concentration de dopage dans la couche CZTSe

La couche CZTSe a ici une importance particulière car c'est la couche supplémentaire qui compense la couche CIGS plus fine. Il est impératif d'évaluer l'effet de la concentration de dopage CZTSe sur les performances de l'appareil. A cet effet, la concentration de dopage Na de la couche a été variée dans la gamme 1×10^{15} à $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Pour les couches CdS et ZnO, les concentrations de dopage sont respectivement de 5×10^{17} et 10^{18} cm^{-3} . Les performances de la cellule solaire actuelle sont influencées par la concentration de dopage de la couche CZTSe, comme résumé à la fig 7. La figure montre que les valeurs de J_{sc} et d'efficacité augmentent de manière significative avec l'augmentation concentration de dopage jusqu'à une limite à $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, après quoi elles diminuent fortement. Les résultats sont en accord avec les cellules solaires à couche absorbante unique à base de CZTSe décrites précédemment [43]. Une efficacité optimale et des valeurs J_{sc} de 29,22 % et 43,5 mA/cm^2 , respectivement, sont observées ici. La valeur FF augmente également de 82,8 % (à $\text{Nd } 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) à 85,7 % (à $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), après quoi la valeur diminue lentement. La valeur V_{oc} augmente avec la concentration de dopage jusqu'à $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, après quoi la valeur V_{oc} fluctue sans changement majeur.

Les résultats sont compréhensibles. Après une concentration de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, le petit changement de V_{oc} est dû à sa sensibilité aux bandes interdites de la couche absorbante CZTSe et CIGS. Avec une concentration de dopage plus élevée, les pertes de recombinaison augmentent et le J_{sc} diminue. La valeur J_{sc} est affectée par les excitations lumineuses incidentes et les pertes dues à divers processus de recombinaison. L'abaissement est associé à la durée de vie plus courte des excitons électron-trou générés, en raison de la forte concentration de dopage et de la mobilité des porteurs. Les porteurs minoritaires peuvent se recombiner avant leur diffusion vers l'électrode de la présente structure. De plus, avec des concentrations de dopage plus élevées au-dessus de $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, la recombinaison Auger peut se produire dans la bande interdite. Comme décrit ci-dessus, des phases secondaires ou des défauts de réseau cristallin peuvent se produire et former des pièges qui réduisent la durée de vie des paires électron-trou. Par conséquent, les pertes de recombinaison augmentent. Par conséquent, le CZTSe ne doit pas avoir de fortes concentrations de dopage. Ceci est cohérent avec des études antérieures sur les systèmes CZTSSe[34]

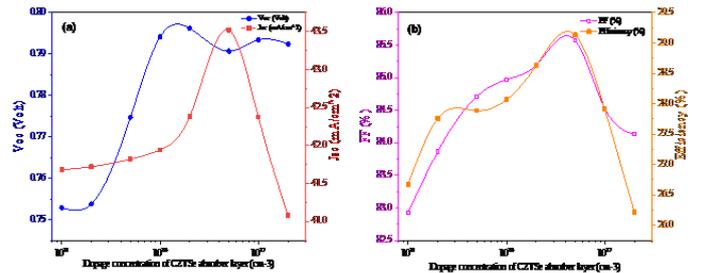


Figure 7 : Effet de la concentration de dopage de la couche absorbante CZTSe sur les performances de la cellule solaire $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{i}/\text{n}-\text{CdS}/\text{p}-\text{CTZS}/\text{p}-\text{CIGS}/\text{Mo}$ (a) J_{sc} & V_{oc} , (b) Efficacité & FF.

Cellule solaire	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	$V_{oc}(\text{mV})$	FF	$\eta\%$
$\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{ZnO}:\text{i}/\text{n}-\text{CdS}/\text{p}-\text{CZTSe}/\text{p}-\text{CIGS}/\text{Mo}$	43.5	796	85.7	29.22

Le tableau 2 résume tous les paramètres de performance pour le $\text{MgF}_2/\text{ZnO}/\text{ZnO} \text{ i}/\text{n}-\text{CdS}/\text{p}-\text{CZTSe}/\text{p}-\text{CIGS}/\text{Mo}$ proposé: cellule solaire

4. CONCLUSION

Une cellule solaire de type $\text{MgF}_2/\text{ZnO-Al}/\text{ZnO:i/n-CdS/p-CTZS/p-CIGS}/\text{Mo}$ impliquant deux couches absorbantes CZTSe et CIGS a été simulée ici à l'aide du logiciel SILVACO TCAD (module ATLAS). MgF_2 est utilisé comme couche de revêtement antireflet (ARC), ZnO-Al comme couche d'oxyde conducteur transparent, CdS comme couche tampon, absorbeur CZTSe/CIGS et Mo comme contact arrière. L'inclusion de la couche d'absorbeur CZTSe ici, avec ses composants abondants, permet de minimiser l'épaisseur de la couche CIGS coûteuse, sans sacrifier les performances des cellules solaires. Les effets des épaisseurs de couche et des concentrations de dopage ont été optimisés pour produire une cellule solaire avec des paramètres de performance de : efficacité 29,22 %, V_{co} 0,79 V, J_{sc} 43,5 mA/cm^2 et FF 85,7 %. Les valeurs d'épaisseur de couche optimales sont : CZTSe 1,5 μm et couche tampon CdS 0,05 μm , tout en maintenant le CIGS fixé à 1,0 μm . Les concentrations de dopage optimales pour les couches CdS, CIGS et CZTSe sont de 5×10^{17} , 5×10^{15} et $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, respectivement. Les résultats indiquent que l'inclusion de la deuxième couche absorbante CZTSe permet d'utiliser une couche CIGS plus fine, ce qui réduit les coûts de production et réduit les risques environnementaux sans compromettre les performances de la cellule.

Acknowledgment

Financial support from Université Amar Telidji de Laghouat is acknowledged. The authors would thank the General Directorate of Scientific Research and Technological Development (DGRSDT), ALGERIA.

REFERENCES

- Gloeckler, M., I. Sankin, and Z. Zhao, *CdTe solar cells at the threshold to 20% efficiency*. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013. **3**(4): p. 1389-1393.
- Jackson, P., et al., *New world record efficiency for Cu (In, Ga) Se₂ thin-film solar cells beyond 20%*. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2011. **19**(7): p. 894-897.
- Ki, W. and H.W. Hillhouse, *Earth-abundant element photovoltaics directly from soluble precursors with high yield using a non-toxic solvent*. Advanced Energy Materials, 2011. **1**(5): p. 732-735.
- Lundberg, O., M. Edoff, and L. Stolt, *The effect of Ga-grading in CIGS thin film solar cells*. Thin Solid Films, 2005. **480**: p. 520-525.
- Kemell, M., M. Ritala, and M. Leskelä, *Thin film deposition methods for CuInSe₂ solar cells*. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2005. **30**(1): p. 1-31.
- Gloeckler, M. and J. Sites, *Band-gap grading in Cu (In, Ga) Se₂ solar cells*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2005. **66**(11): p. 1891-1894.
- Amal, M.I., S.H. Lee, and K.H. Kim, *Properties of Cu₂ZnSn (SxSe_{1-x})₄ thin films prepared by one-step sulfo-selenization of alloyed metal precursors*. Current Applied Physics, 2014. **14**(7): p. 916-921.
- Wu, S.-H., et al., *Cu₂ZnSn (SxSe_{1-x})₄ thin film solar cell with high sulfur content (x approximately 0.4) and low Voc deficit prepared using a postsulfurization process*. Solar energy materials and solar cells, 2018. **175**: p. 89-95.
- Xue, C., et al., *Fabrication of Cu₂ZnSn (SxSe_{1-x})₄ solar cells by ethanol-ammonium solution process*. Applied Surface Science, 2016. **383**: p. 90-97.
- Huang, T.J., et al., *CZTS-based materials and interfaces and their effects on the performance of thin film solar cells*. physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters, 2014. **8**(09): p. 735-762.
- Ramasamy, K., M.A. Malik, and P. O'Brien, *Routes to copper zinc tin sulfide Cu₂ZnSnS₄ a potential material for solar cells*. Chemical communications, 2012. **48**(46): p. 5703-5714.
- Shi, Z., D. Attygalle, and A.H. Jayatissa, *Kesterite-based next generation high performance thin film solar cell: current progress and future prospects*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017. **28**(2): p. 2290-2306.
- Persson, C., *Electronic and optical properties of Cu₂ZnSnS₄ and Cu₂ZnSnSe₄*. Journal of Applied Physics, 2010. **107**(5): p. 053710.
- Chen, S., et al., *Abundance of Cu Zn+ Sn Zn and 2Cu Zn+ Sn Zn defect clusters in kesterite solar cells*. Applied Physics Letters, 2012. **101**(22): p. 223901.

15. Wei, H., et al., *Tunable band gap Cu₂ZnSnS₄(1-x) nanocrystals: experimental and first-principles calculations*. CrystEngComm, 2011. **13**(7): p. 2222-2226.
16. Padhy, S., R. Mannu, and U.P. Singh, *Graded band gap structure of kesterite material using bilayer of CZTS and CZTSe for enhanced performance: A numerical approach*. Solar Energy, 2021. **216**: p. 601-609.
17. Xu, J., J. Lin, and C. Zhuang, *Analysis of the open-circuit voltage of Cu₂ZnSn(S, Se)₄ thin film solar cell*. Solar Energy, 2018. **164**: p. 231-242.
18. Chelvanathan, P., M.I. Hossain, and N. Amin, *Performance analysis of copper-indium-gallium-diselenide (CIGS) solar cells with various buffer layers by SCAPS*. Current Applied Physics, 2010. **10**(3): p. S387-S391.
19. Boukortt, N.E.I., S. Patané, and Y.M. Abdulraheem, *Numerical investigation of CIGS thin-film solar cells*. Solar Energy, 2020. **204**: p. 440-447.
20. Selmane, N., et al., *Cost-saving and performance-enhancement of CuInGaSe solar cells by adding CuZnSnSe as a second absorber*. Solar Energy, 2022. **234**: p. 64-80.
21. Heriche, H., et al., *Enhanced efficiency of Cu(In, Ga)Se₂ solar cells by adding Cu₂ZnSn(S, Se)₄ absorber layer*. Optik, 2017. **144**: p. 378-386.
22. Vilarica, M. and G. González-Aguilar, *Electrochemical behaviour of ZnO/flavonoid pairs*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2013. **32**(3): p. 804-809.
23. Qu, G., et al., *Electrochemical method for wet removal of phosphine*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015. **34**(6): p. 1640-1646.
24. Selmane, N., et al., *Effect of ZnO-based TCO on the performance of a-Si H(n)/a-Si H(i)/c-Si H(p)/Al BSF(p+)/Al heterojunction solar cells*. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019. **38**(4): p. 13114.
25. Dabbabi, S., T.B. Nasr, and N. Kamoun-Turki, *Parameters optimization of CIGS solar cell using 2D physical modeling*. Results in physics, 2017. **7**: p. 4020-4024.
26. Loubat, A., et al., *Optical properties of ultrathin CIGS films studied by spectroscopic ellipsometry assisted by chemical engineering*. Applied Surface Science, 2017. **421**: p. 643-650.
27. Carron, R., et al., *Refractive indices of layers and optical simulations of Cu(In, Ga)Se₂ solar cells*. Science and Technology of advanced Materials, 2018. **19**(1): p. 396-410.
28. Ouédraogo, S., F. Zougmore, and J. Ndjaka, *Numerical analysis of copper-indium-gallium-diselenide-based solar cells by SCAPS-1D*. International Journal of photoenergy, 2013. **2013**.
29. Muhammad, A.J., A.I. Salih, and G. Fadel, *Numerical analysis of graded band gap CZT(S, Se) solar cells using AMPS-1D*.
30. Parisi, A., et al., *Graded carrier concentration absorber profile for high efficiency CIGS solar cells*. International Journal of photoenergy, 2015. **2015**.
31. Olopade, M., O. Oyebola, and B. Adeleke, *Investigation of some materials as buffer layer in copper zinc tin sulphide (Cu₂ZnSnS₄) solar cells by SCAPS-1D*. Advances in Applied Science Research, 2012. **3**(6): p. 3396-3400.
32. Chen, S., et al., *Crystal and electronic band structure of Cu₂ZnSnX₄ (X= S and Se) photovoltaic absorbers: First-principles insights*. Applied Physics Letters, 2009. **94**(4): p. 041903.
33. Chen, S., et al., *Compositional dependence of structural and electronic properties of Cu₂ZnSn(S, Se)₄ alloys for thin film solar cells*. Physical Review B, 2011. **83**(12): p. 125201.
34. Maklavani, S.E. and S. Mohammadnejad, *Reduction of interface recombination current for higher performance of p+-CZTSxSe(1-x)/p-CZTS/n-CdS thin-film solar cells using Kesterite intermediate layers*. Solar Energy, 2020. **204**: p. 489-500.
35. Grossberg, M., et al., *Photoluminescence and Raman study of Cu₂ZnSn(SexS_{1-x})₄ monocrystals for photovoltaic applications*. Thin Solid Films, 2011. **519**(21): p. 7403-7406.
36. Benmir, A. and M. Aida, *Analytical modeling and simulation of CIGS solar cells*. Energy Procedia, 2013. **36**: p. 618-627.

37. Tobbeche, S. and H. Amar, *Two-dimensional Modelling and Simulation of CIGS thin-film solar cell*. Journal of New Technology and Materials, 2014. **277**(1747): p. 1-5.
38. Rezaei, N., et al., *Optical optimization of a multi-layer wideband anti-reflection coating using porous MgF₂ for sub-micron-thick CIGS solar cells*. Solar Energy, 2019. **177**: p. 59-67.
39. Saha, U., A. Biswas, and M.K. Alam, *Efficiency enhancement of CZTSe solar cell using CdS (n)/(Ag_xCu_{1-x})₂ZnSnSe₄ (p)/Cu₂ZnSnSe₄ (p+) structure*. Solar Energy, 2021. **221**: p. 314-322.
40. Gloeckler, M., A. Fahrenbruch, and J. Sites. *Numerical modeling of CIGS and CdTe solar cells: setting the baseline*. in *3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of*. 2003. IEEE.
41. Selmane, N., A. Cheknane, and H.S. Hilal, *Optimization of Al-Doped ZnO Transparent Conducting Oxide and Emitter Layers for Enhanced Performance of Si Heterojunction Solar Cells*. Journal of Electronic Materials, 2020. **49**(3): p. 2179-2190.
42. Möller, H.J., *Semiconductors for solar cell applications*. Progress in materials science, 1991. **35**(3-4): p. 205-418.
43. Burk, D. and V. De La Torre, *An empirical fit to minority hole mobilities*. IEEE electron device letters, 1984. **5**(7): p. 231-233.