

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialité : Génie chimique

Intitulé du mémoire

**Optimisation des paramètres influençant le processus de
condensation**

Présenté par :

Aoucha Djazia

Caid Nada

Encadré par :

Dr. IRKLI.S

Année universitaire 2024/2025

ملخص

تُعد كفاءة التكاثف من المعايير الحاسمة في عمليات التقطير، حيث تؤثر بشكل مباشر على المردود العام. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير المجال المغناطيسي على أداء التكاثف ضمن عملية تقطير، بهدف زيادة كمية المقطر المسترجعة. تم تنفيذ تجارب مخبرية باستخدام مجال مغناطيسي دائم. أظهرت النتائج أنه بعد ساعة ونصف من التقطير، بلغ الحجم الإجمالي للماء المسترجع 650 مل في غياب المجال المغناطيسي، ويُعد هذا الحجم أقل من الحجم الذي تم الحصول عليه بوجود المجال المغناطيسي، والذي بلغ 900 مل، أي بتحسين يُقدَّر بحوالي 38.45٪، مع انخفاض بنسبة 25٪ في استهلاك الطاقة الحرارية النوعية. تفتح هذه النتائج التجريبية آفاقاً واقعية لتحسين عمليات التقطير ذات الاستهلاك الطاقي المنخفض.

الكلمات المفتاحية: التكاثف، التقطير، المجال المغناطيسي، كفاءة الطاقة، أنبوب حلزوني، النحاس، انتقال الحرارة.

Résumé

L'efficacité de la condensation constitue un paramètre critique dans les procédés de distillation, influençant directement le rendement global. Cette étude s'est intéressée à l'impact d'un champ magnétique sur les performances de condensation dans un procédé de distillation, dans le but d'augmenter la quantité de distillat récupéré. Des montages expérimentaux spécifiques ont été réalisés avec l'application d'un champ magnétique permanent. Les résultats montrent qu'après 1 h 30 min de distillation, le volume total d'eau récupéré est de 650 mL en l'absence de champ magnétique ; ce volume est inférieur à celui obtenu en présence de champ magnétique, qui atteint 900 mL, soit une amélioration d'environ 38,45 %, accompagnée d'une réduction de 25 % de la consommation spécifique d'énergie sensible. Ces résultats expérimentaux ouvrent des perspectives concrètes pour l'optimisation des procédés de distillation à faible consommation énergétique.

Mots-clés : condensation, distillation, champ magnétique, rendement énergétique, serpent, cuivre, transfert thermique.

Abstract

Condensation efficiency is a critical parameter in distillation processes, directly affecting the overall yield. This study investigates the impact of a magnetic field on condensation performance in a distillation process, with the aim of increasing the quantity of recovered distillate. Specific experimental setups were developed using a permanent magnetic field. The results show that after 1 hour and 30 minutes of distillation, the total volume of water recovered was 650 mL without the magnetic field, compared to 900 mL with it, representing an improvement of approximately 38.45%, along with a 25% reduction in specific sensible energy consumption. These experimental results open up concrete prospects for the optimization of distillation processes with low energy consumption.

Keywords: condensation, distillation, magnetic field, energy efficiency, coil, copper, heat transfer.

REMERCIEMENTS

*La réalisation de ce projet n'aurait pas été possible sans l'accompagnement précieux de notre promotrice, **Mme Irki Sara**. Nous lui adressons nos plus sincères remerciements pour son soutien indéfectible et son rôle central dans le succès de ce travail.*

*Dès les premiers échanges, sa bienveillance, sa patience et son engagement ont été des sources constantes d'encouragement et de motivation, nous incitant à donner le meilleur de nous-mêmes. **Mme Irki** a su allier écoute attentive et pédagogie, et sa rigueur scientifique, couplée à sa générosité et à sa vision claire, ont été des atouts majeurs qui ont guidé nos pas vers la réussite.*

*Nous souhaitons également exprimer notre gratitude au **Pr. W. Naceur** pour ses conseils avisés et ses idées éclairantes qui ont grandement enrichi ce travail.*

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury, dont l'honorabilité et les remarques pertinentes ont permis de donner une direction encore plus précise à ce projet. Leurs avis éclairés et leurs recommandations sont d'une grande valeur pour nous.

Nous tenons également à exprimer nos sincères remerciements à la Faculté de Génie des Procédés pour son accueil chaleureux et pour avoir offert un environnement propice à l'apprentissage et à la recherche.

Un grand merci aux techniciens de laboratoire qui ont su nous accompagner et nous aider tout au long de ce travail, permettant sa réalisation dans les meilleures conditions possibles.

Enfin, nous remercions tous les enseignants qui ont jalonné notre parcours académique, pour la qualité de leur enseignement et leur dévouement à transmettre leur savoir.

DEDICACES

Je dédie ce travail, avec tout mon amour et ma reconnaissance, à ceux qui occupent une place irremplaçable dans mon cœur.

À mes chers parents

Pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices silencieux, votre patience infinie et votre soutien constant. Vous êtes ma plus grande fierté et ma plus belle force.

*À mes frères **Mahdi** et **Mustapha**, et à mes sœurs **Fella** et **Zola***

Merci pour votre présence rassurante ainsi que votre soutien et encouragement dans les moments où j'en avais besoin.

*À mes **neveux** et **nièce**, Puisse votre chemin être guidé par la lumière du savoir et la persévérance.*

*À **Farah**, ma chère copine, merci pour ta présence, ton soutien dans les moments difficiles.*

*A mon binôme **Djazia**, Merci pour ton sérieux, ta patience et cette belle synergie tout au long de ce travail.*

*Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire,
Je vous exprime toute ma gratitude.*

CAID NADA

DEDICACES

Je dédie ce travail

*À mes **parents** bien-aimés, piliers de ma vie, pour leurs sacrifices silencieux, leurs prières constantes, leur patience infinie et leur amour inconditionnel. Vous êtes ma source d'inspiration et ma force au quotidien. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.*

*À mes sœurs, **Ikram** et **Feriel**, et à mon frère **Mohamed**, et à ma cousine **Manel** qui m'ont encouragée avec tendresse, humour et affection. Vos mots, votre présence et vos gestes m'ont souvent réconfortée lorsque le découragement me guettait.*

*À ma chère amie **Dounia**, plus qu'une amie, une sœur de cœur, pour ta présence constante, ton écoute, ton sourire et ton soutien indéfectible, ainsi qu'à ta famille, qui m'a accueillie avec tant de chaleur et de bienveillance.*

*À **Nada**, ma binôme et complice de route, avec qui j'ai partagé cette aventure académique. Merci pour ton sérieux, ta loyauté, ton sens du partage et les nombreux moments de solidarité que nous avons vécus ensemble.*

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à cette étape de ma vie, je vous suis profondément reconnaissante. Ce mémoire est aussi un peu le vôtre.

AOUCHA DJAZIA

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉS

REMERCIEMENTS

DEDICACES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

INTRODUCTION.....	12
CHAPITRE 1 CONDENSATION.....	14
1.1 Introduction	14
1.2 Définition et principes de base de la condensation.....	14
1.3 Types de condensation	15
1.3.1 Condensation en film	15
1.3.2 Condensation en gouttelettes	15
1.3.3 Condensation homogène	16
1.3.4 Condensation hétérogène.....	16
1.4 Facteurs influençant la condensation	17
1.4.1 Température.....	17
1.4.2 Pression.....	17
1.4.3 Humidité relative.....	17
1.4.4 Vitesse de la vapeur.....	18
1.4.5 Nature du fluide.....	18
1.5 Applications industrielles de la condensation	19
1.5.1 Traitement et récupération de l'eau.....	19
1.5.2 Contrôle environnemental.....	19
1.5.3 Récolte d'eau atmosphérique.....	19
1.5.4 Génération de vapeur solaire.....	20
1.5.5 Refroidissement par gouttelettes sauteuses.....	20
1.6 Travaux de recherche sur la condensation	21
1.6.1 Optimisation des tours de condensation.....	21
1.6.2 Récupération du condensat et pièges à vapeur.....	22
1.6.3 Optimisation des PHE pour la condensation.....	23
1.6.4 Condensation du mercure et transferts thermiques.....	23
1.6.5 Effet des micro/nanostructures sur la condensation.....	24
1.6.6 Condenseurs avancés pour le refroidissement	24

1.7 Contribution de la condensation au processus de distillation	25
1.7.1 Principe de la distillation	25
1.7.2 Rôle de la condensation dans le processus de distillation	26
1.7.3 Paramètres clés de la distillation	26
CHAPITRE 2 CHAMP MAGNÉTIQUE	28
2.1 Introduction	28
2.2 Généralités sur les champs magnétiques et leurs propriétés	28
2.2.1 Champ magnétique.....	28
2.2.2 Aimant permanent.....	28
2.2.3 Aimant annulaire.....	29
2.2.4 Bobine ou solénoïde.....	30
2.2.5 Action des forces électromagnétiques.....	31
2.2.6 Classification magnétique des matériaux.....	33
2.3 Travaux de recherche portant sur l'influence du champ magnétique.....	34
CHAPITRE 3 MATÉRIELS ET MÉTHODES	42
3.1 Introduction	42
3.2 Matériel	42
3.3 Montages expérimentaux.....	43
3.4 Démarche expérimentale	53
3.5 Mesure des paramètres opératoires.....	53
3.6 Analyse des Performances : Rendement et Consommation Énergétique.....	53
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	55
4.1 Introduction	55
4.2 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 1.....	55
4.3 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 2.....	56
4.4 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 3.....	57
4.5 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 4.....	59
4.6 Évolution de la température dans le Montage N°4	59
4.7 Effet de l'orientation du champ magnétique sur le condenseur du Montage N°5... ..	61
4.8 Évolution de la température dans le Montage N°5	64
4.9 Effet de l'état du serpentins sur le Montage N°6	65
4.10 Effet du champ magnétique sur le couplage de deux serpentins différents	67

CONCLUSION.....	70
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
LISTE DES SYMBOLES	
LISTE DES ABRÉVIATIONS	

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Liste des Figures

Figure 1.1. Schéma des transformations physiques entre états de la matière	15
Figure 2.1. Cycle d'hystérésis représentatif des matériaux magnétiques a) doux et b) durs ; champ coercitif	29
Figure 2.2. (a) structure de l'aimant annulaire. (b) Équiflux	30
Figure 3.1. Montage de distillation N°1. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Colonne de distillation ,4 Pince, 5 Support, 6 Éprouvette graduée (100 mL).....	43
Figure 3.2. Montage de distillation N°1 soumis à un champ magnétique. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond ,3 Colonne de distillation, 4 Aimant circulaire (Ø 7,5 cm, 229 mT), 5 Aimant circulaire (Ø 5 cm, 119 mT), 6 Éprouvette graduée (100 mL), 7 Support	44
Figure 3.3. Montage de distillation N°2. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Colonne graduée, 4 Pince, 5 Support, 6 Éprouvette graduée (50 mL)	45
Figure 3.4. Montage de distillation N°2 soumis à un champ magnétique. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Aimant circulaire (Ø 6 cm, 220 mT), 4 Pince, 5 Aimant circulaire (Ø 7,5 cm, 229 mT), 6 Colonne graduée, 7 Aimant rectangulaire (15 cm x 10 cm, 117 mT), 8 support, 9 Éprouvette graduée (50 mL)	46
Figure 3.5. Montage de distillation N°3. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Condenseur de Liebig, 4 Pince, 5 Support, 6 Tuyau en PVC, 7 Bouteille de lavage de gaz, 8 Éprouvette graduée (50 mL).....	47
Figure 3.6. Montage de distillation N°3 soumis à un champs magnétique. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Aimant circulaire (Ø 6 cm, 220mT), 3 Ballon à fond rond, 4 Aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT), 5 Condenseur de Liebig, 6 Aimant circulaire (Ø 7,5 cm, 292 mT), 7 Tuyau en PVC, 8 Aimant circulaire (Ø 5 cm, 119 mT), 9 Éprouvette graduée (50 mL), 10 Bouteille de lavage de gaz, 11 Support	48
Figure 3.7. Montage de distillation N°4 équipé d'une spirale en cuivre. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Spirale en cuivre, 5 Tuyau en PVC, 6 Éprouvette graduée (500 mL).....	48
Figure 3.8. Montage de distillation N°4 équipé d'une spirale en cuivre exposée à un champ magnétique.1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Spirale en cuivre, 5 Aimant (Ø 7,5 cm, 229 mT), 6 Tuyau en PVC, 7 Éprouvette graduée (500 mL)	49

Figure 3.9. Montage de distillation N° 5 équipé d'un serpentín rectangulaire. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín rectangulaire, 5 Tuyau de gaz, 6 Éprouvette graduée (500 mL).....	50
Figure 3.10. Montage de distillation N° 5 équipé d'un serpentín rectangulaire exposé à un champ magnétique a) essai 1 et b) essai 2 avec champ magnétique. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín rectangulaire, 5 Tuyau de gaz, 6 Éprouvette graduée (500 mL), 7 Aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT)	50
Figure 3.11. Montage de distillation N° 6 équipé d'un serpentín rectangulaire en cuivre corrodé. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín en cuivre corrodé, 5 Tuyau de gaz, 6 Éprouvette graduée (500 mL)	51
Figure 3.12 Montage de distillation N°6 équipé d'un serpentín rectangulaire en cuivre corrodé exposé à un champ magnétique.1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín en cuivre corrodé, 5 Aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT).....	52
Figure 4.1. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°01).....	56
Figure 4.2. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N° 02)..	57
Figure 4.3. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N° 3)....	58
Figure 4.4. Evolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°4).....	59
Figure 4.5. Évolution de la température en fonction du temps en absence de champ magnétique (Montage N°4)	60
Figure 4.6. Évolution de la température en fonction du temps en présence de champ magnétique (Montage N°4)	61
Figure 4.7. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps selon la direction du champ magnétique (Montage N° 5).....	62
Figure 4.8. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°5).....	63
Figure 4.9. Évolution de la température en fonction du temps en absence de champ magnétique (Montage N°5)	65
Figure 4.10. Évolution de la température en fonction du temps en présence de champ magnétique (Montage N°5)	65
Figure 4.11. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°6)...	66
Figure 4.12. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps par le couplage entre les deux serpentins (Montage N°7).....	67
Figure 4.13. Schéma du bilan des forces s'exerçant sur la bulle	68

Liste des Tableaux

Tableau 3.1. Verrerie et dispositifs.....	42
--	----

INTRODUCTION

La distillation représente un procédé thermique fondamental de séparation, reposant sur le principe des différences de températures d'ébullition des constituants au sein d'un mélange liquide. Du fait de sa vaste applicabilité et de sa capacité à produire des substances de haute pureté, elle est largement employée dans des secteurs variés tels que l'industrie chimique, pharmaceutique, agroalimentaire, et s'avère cruciale pour la purification de l'eau [1]. Afin de satisfaire des exigences spécifiques, ce procédé se décline en plusieurs configurations reconnues, notamment la distillation simple, fractionnée, sous vide, et la distillation à la vapeur ou distillation de l'eau [2]. Ce procédé est particulièrement important pour la production d'eau distillée, dont la qualité et la pureté sont indispensables en laboratoire et dans de nombreuses industries [3]

L'efficacité opérationnelle de la distillation a été amplement démontrée par plusieurs études ; toutefois, des analyses subséquentes ont mis en évidence que ce procédé présente des contraintes significatives en termes de rendement énergétique et de productivité. Les études techniques révèlent qu'un système thermique standard requiert entre 10 et 25 kWh pour la production d'un mètre cube d'eau distillée, ce qui représente une consommation énergétique comprise entre 0,01 et 0,025 kWh par litre, en fonction des conditions opératoires et de l'efficacité du dispositif [2]. De plus, la quantité d'eau effectivement récupérée sous forme distillée demeure généralement inférieure à 50 % du volume initialement traité, en raison des pertes thermiques et du rendement incomplet du processus de condensation [2]. Ce constat met en évidence une problématique majeure liée à l'amélioration de l'efficacité de la condensation de la vapeur d'eau dans les systèmes de distillation, tout en diminuant la consommation énergétique globale du procédé.

La condensation constitue en effet une étape critique dans le cycle de distillation : elle peut représenter à elle seule jusqu'à 40 % du temps total du processus, et son inefficacité compromet directement la performance du système [4]. Des travaux récents ont montré que, sans optimisation, le rendement de condensation peut descendre en dessous de 45 %, en particulier lorsque les gradients thermiques ou les surfaces d'échange sont mal contrôlés [5].

Une approche innovante susceptible d'améliorer la phase de condensation du procédé consiste en l'application de champs magnétiques statiques à la vapeur d'eau au moment de sa transition de phase. Cette influence magnétique, en interaction avec les dipôles moléculaires de la vapeur, pourrait favoriser la formation des noyaux de condensation,

modifier la densité locale et affecter la cinétique du changement d'état. Des résultats expérimentaux préliminaires suggèrent que l'orientation et l'intensité du champ magnétique peuvent avoir un effet mesurable sur la dynamique du processus [6].

Dans ce cadre, la présente étude expérimentale vise à évaluer l'influence d'un champ magnétique statique sur le processus de condensation de la vapeur d'eau au sein d'un système de distillation. Plusieurs montages expérimentaux ont été réalisés, chacun soumis à un champ magnétique appliqué à des zones spécifiques et dans des conditions contrôlées. Chaque montage a ensuite été analysé séparément, en comparant les résultats obtenus en l'absence et en présence du champ magnétique, afin d'estimer le pourcentage d'amélioration de la production d'eau distillée induite par son application.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres interdépendants, visant à fournir une compréhension approfondie du sujet traité. Le premier chapitre présente les principes fondamentaux régissant les phénomènes de distillation et de condensation, en s'appuyant sur les lois physiques et thermodynamiques qui en déterminent le comportement. Il met en évidence les paramètres clés influençant l'efficacité de ces processus. Le deuxième chapitre s'attache à l'examen de l'état de l'art concernant l'influence des champs magnétiques sur la vapeur d'eau en phase de condensation. Cette revue bibliographique permet d'identifier les avancées récentes, les hypothèses formulées, ainsi que les lacunes encore présentes dans la littérature scientifique. Le troisième chapitre décrit avec rigueur le dispositif expérimental conçu dans le cadre de ce travail, en détaillant les conditions opératoires, les matériaux choisis, les instruments de mesure utilisés, ainsi que les paramètres soumis à contrôle. Enfin, le quatrième chapitre est dédié à la présentation, à l'analyse critique et à l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus. Il propose également des perspectives d'optimisation du procédé et suggère des orientations pour de futures investigations.

CHAPITRE 1

CONDENSATION

1.1 Introduction

Ce chapitre présente d'abord les principes fondamentaux de la condensation, notamment ses différents types et les principaux facteurs physiques et thermodynamiques qui l'influencent. Il aborde aussi ses applications industrielles et les avancées scientifiques récentes dans ce domaine. Enfin, il établit le lien entre condensation et distillation, et souligne l'importance de cette étape dans le processus de séparation thermique, largement utilisé en milieu industriel.

1.2 Définition et principes de base de la condensation

La condensation est un phénomène physique correspondant à la transformation d'un gaz en liquide, ou plus rarement en solide (Figure 1.1). Ce changement d'état se produit lorsque la vapeur est suffisamment refroidie pour atteindre le point de rosée. À cette température critique, la pression partielle de la vapeur devient égale à la pression de vapeur saturante, entraînant ainsi la formation de gouttelettes liquides ou, dans certains cas, de cristaux solides [7].

Dans le cycle hydrologique, ce processus joue un rôle essentiel dans la formation des nuages, de la rosée, des précipitations et du givre. Il se manifeste aussi dans la vie quotidienne, par exemple lors de la formation de buée sur un miroir après une douche chaude [8].

Sur le plan industriel, ce changement d'état est largement exploité pour le traitement des gaz industriels. Il permet notamment de séparer les polluants volatils des gaz porteurs (comme l'air ou l'azote), facilitant leur récupération ou leur élimination. Cette technique est précieuse dans les secteurs de la chimie et de l'environnement, car elle contribue à la réduction des émissions nocives et à l'amélioration de la qualité des rejets gazeux [8].

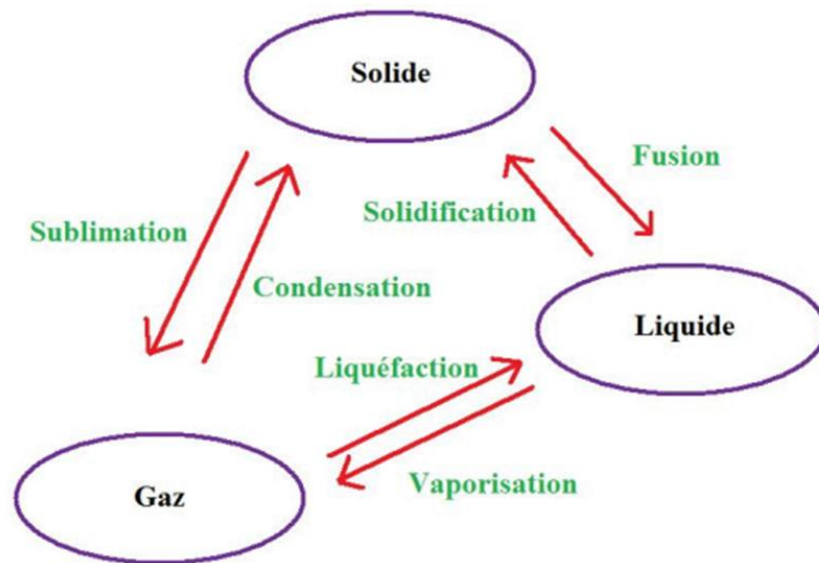


Figure 1.1. Schéma des transformations physiques entre états de la matière [7]

1.3 Types de condensation

1.3.1 Condensation en film

La condensation en film est le mode de condensation le plus courant dans les applications industrielles. Elle se distingue par la création d'une pellicule homogène de liquide sur la surface refroidie, qui se déplace sous l'influence de la gravité ou d'autres forces externes, telles que les tensions de cisaillement causées par le flux de la vapeur [9]. Cette pellicule sert de principale barrière thermique, Ce qui entrave l'efficacité du transfert calorifique [10]. Même si ce type de condensation est simple à entretenir et moins sensible aux impuretés, ses coefficients de transfert thermique sont inférieurs à ceux constatés lors de la condensation en gouttes. On l'utilise couramment dans les condensateurs industriels grâce à sa stabilité et à la simplicité de son entretien [11].

1.3.2 Condensation en gouttelettes

La condensation en gouttelettes, qui se manifeste lorsque la vapeur se transforme en gouttes distinctes sur des surfaces hydrophobes, présente une efficacité thermique nettement supérieure à celle de la condensation en film [11]. Ce type implique trois phases cruciales : la nucléation, où les gouttelettes se créent sur des points propices de la surface, qui est suivie de l'expansion par coalescence, puis le relâchement des gouttelettes quand elles ont atteint une dimension idéale. Ce processus continu assure un rafraîchissement constant de la surface active, ce qui diminue la résistance thermique et améliore les coefficients de transfert de

chaleur jusqu'à 10 fois par rapport à la condensation en film. Toutefois, cette performance requiert des surfaces spécialement élaborées, comme les revêtements hydrophobes ou les nanostructurations, qui présentent encore des défis en termes de durabilité et de coût pour une utilisation industrielle. Des études récentes s'efforcent de surmonter ces défis tout en préservant l'extraordinaire performance thermique de cette forme de condensation [11]. Des progrès récents dans la compréhension des mécanismes de formation de gouttelettes ouvrent des perspectives pour des solutions plus performantes, en privilégiant l'utilisation de surfaces spécifiquement élaborées pour encourager le décrochage des gouttes [12].

1.3.3 Condensation homogène

Le processus de condensation homogène consiste en la conversion de la vapeur d'eau en gouttelettes, sans l'intervention de particules solides servant de noyaux de condensation. Ce phénomène exige des degrés de sursaturation extrêmement élevés, souvent supérieurs à 400 %, pour franchir la barrière énergétique de la nucléation. Contrairement à la condensation hétérogène, qui se produit fréquemment dans l'atmosphère en raison des aérosols, la condensation homogène se manifeste dans des milieux d'une pureté exceptionnelle, comme dans certaines applications cryogéniques ou des expériences en laboratoire [13].

Des études menées dans des chambres d'expansion ont démontré que la condensation homogène peut contribuer à la formation de nuages glacés à haute altitude. Dans ce contexte, les gouttelettes formées peuvent geler rapidement à des températures avoisinant -40°C [13]. D'autres travaux ont approfondi l'analyse numérique du processus de nucléation et de croissance des gouttelettes en régime d'équilibre, mettant en évidence les dynamiques microscopiques complexes de cette transformation [14].

1.3.4 Condensation hétérogène

La condensation hétérogène désigne le passage de la vapeur d'eau à l'état liquide lorsqu'elle est en contact avec des particules solides ou liquides en suspension, également nommées noyaux de condensation. Ces noyaux simplifient le processus en réduisant l'énergie requise pour la nucléation, ce qui autorise la condensation à des degrés de sursaturation considérablement plus bas que dans la situation de condensation homogène. On retrouve ce phénomène à tous les niveaux de la nature, y compris dans la formation de la rosée sur les surfaces froides, du brouillard, ou encore des nuages dans l'atmosphère [15].

À l'échelle microscopique, la présence de ces noyaux influence la dynamique de la nucléation en facilitant le premier développement des gouttelettes sur des points privilégiés. Cela rend la condensation hétérogène bien plus efficace dans les conditions environnementales habituelles. Cette connaissance est indispensable pour la modélisation des processus météorologiques et l'optimisation des procédés industriels en lien avec le contrôle de la vapeur et des polluants [16].

1.4 Facteurs influençant la condensation

1.4.1 Température

La température est l'un des paramètres thermodynamiques clés régissant le processus de condensation. Lorsqu'un mélange vapeur-gaz est refroidi à pression constante jusqu'à une température inférieure au point de rosée, la vapeur atteint un état de sursaturation qui initie la condensation. Cette température critique correspond au moment où la pression partielle de la vapeur devient égale à la pression de vapeur saturante. En deçà de ce seuil, l'air ne peut plus contenir toute la vapeur d'eau, entraînant la formation de gouttelettes par nucléation. Ce phénomène est observé dans divers systèmes, tels que les échangeurs de chaleur, les condensateurs industriels, ainsi que dans les processus atmosphériques comme la formation du brouillard et des nuages [17].

1.4.2 Pression

La pression est un paramètre thermodynamique fondamental qui influence directement la température de saturation de la vapeur, conditionnant ainsi le déclenchement de la condensation. À pression constante, la vapeur atteint l'état de saturation lorsque sa pression partielle devient égale à la pression de vapeur saturante. Une augmentation de la pression provoque une élévation de cette température, modifiant l'équilibre entre les phases liquide et vapeur. Ce mécanisme est essentiel dans les systèmes à condensation sous pression contrôlée, tels que les turbines à vapeur, les chaudières et les condensateurs industriels. La compréhension fine de cette relation pression-température est cruciale pour le dimensionnement et l'optimisation des systèmes thermodynamiques [18].

1.4.3 Humidité relative

L'humidité relative est définie comme le rapport entre la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et la pression de vapeur saturante à une température donnée. Elle constitue

un indicateur du degré de saturation de l'atmosphère. Lorsque ce rapport atteint 100 %, l'air devient saturé, incapable d'absorber davantage de vapeur sans condensation. Dans ces conditions, un léger refroidissement suffit à provoquer une sursaturation et initier la formation de gouttelettes. Ce paramètre est central dans les phénomènes atmosphériques, où les fluctuations locales de température et d'humidité influencent la formation du brouillard, de la rosée ou des nuages. L'interaction entre l'humidité relative et les processus de refroidissement adiabatique ou radiatif joue un rôle déterminant dans la dynamique de la condensation atmosphérique [19].

1.4.4 Vitesse de la vapeur

La vitesse de la vapeur est un paramètre fondamental dans les processus de condensation, en particulier dans le régime de condensation en film. Une vapeur à haute vitesse exerce un cisaillement sur le film de condensat formé à la surface, ce qui tend à réduire son épaisseur. Cette réduction de l'épaisseur diminue la résistance thermique, ce qui améliore le transfert de chaleur entre la vapeur et la paroi. En outre, la direction de l'écoulement influence fortement l'efficacité du phénomène : un écoulement ascendant ralentit l'écoulement du condensat, épaissit le film et dégrade le transfert thermique, tandis qu'un écoulement descendant facilite l'écoulement gravitaire du liquide, favorisant ainsi l'amincissement du film et l'optimisation des échanges thermiques. Une maîtrise précise de la vitesse et de la direction de la vapeur est donc essentielle dans la conception des condenseurs, notamment dans les systèmes industriels où la performance thermique doit être maximisée [20].

1.4.5 Nature du fluide

Les propriétés thermodynamiques spécifiques d'un fluide, telles que la chaleur latente de vaporisation, la pression de vapeur saturante, la conductivité thermique et la tension superficielle, déterminent son comportement lors de la condensation. Ces paramètres influencent la température de saturation, le mode de formation des gouttelettes, ainsi que la quantité d'énergie libérée durant la transition de phase. Le choix du fluide est donc essentiel dans la conception des systèmes thermiques, chaque fluide présentant une réponse distincte selon les conditions de fonctionnement. Par exemple, un fluide ayant une pression de vapeur saturante élevée condense à une température plus élevée, ce qui peut être favorable ou non selon les applications [21].

1.5 Applications industrielles de la condensation

La condensation est un phénomène clé dans de nombreux secteurs industriels et technologiques. Ses applications vont de la production d'énergie à la gestion thermique des systèmes électroniques, en passant par le traitement de l'eau et la récolte d'énergie. Ces différentes applications témoignent de l'importance de la condensation comme levier technologique dans la transition énergétique et la gestion durable des ressources.

1.5.1 Traitement et récupération de l'eau

La condensation joue un rôle fondamental dans les systèmes de traitement et de récupération de l'eau, notamment dans les procédés thermiques de dessalement. Elle permet de séparer l'eau des impuretés par simple changement de phase, une méthode particulièrement utile dans les contextes de stress hydrique croissant. L'optimisation de ce processus, par l'amélioration des surfaces de condensation ou l'utilisation de fluides thermiques avancés, constitue un levier important pour réduire la consommation énergétique et les coûts associés. Ces approches innovantes contribuent à rendre les technologies de dessalement plus durables et accessibles, notamment dans les régions confrontées à un manque d'eau et à des besoins énergétiques croissants [22].

1.5.2 Contrôle environnemental

Le contrôle de l'humidité est un paramètre essentiel dans la conception des bâtiments pour garantir un environnement intérieur sain, confortable et durable. Les systèmes de climatisation et de déshumidification utilisent la condensation comme principe de base pour extraire l'humidité contenue dans l'air. Lorsque l'air chaud et humide traverse une surface froide, telle qu'un serpentin de refroidissement, la vapeur d'eau se condense et est éliminée. Ce phénomène permet de réguler le taux d'humidité relative à des niveaux adaptés à l'usage des locaux. Ce mécanisme est particulièrement important pour prévenir l'apparition de moisissures, la dégradation des matériaux de construction et la détérioration de la qualité de l'air intérieur. Dans des environnements spécifiques comme les musées, les archives ou les laboratoires, un contrôle précis de l'humidité est indispensable pour préserver les objets sensibles et assurer la stabilité des conditions ambiantes [23].

1.5.3 Récolte d'eau atmosphérique

La récolte d'eau atmosphérique peut être optimisée par l'utilisation de surfaces hydrophiles directionnelles à interface glissante, inspirées des plantes comme la Népenthès

ou les feuilles de riz. Ces surfaces favorisent à la fois la nucléation rapide des gouttelettes et leur écoulement sans piégeage, augmentant ainsi significativement le rendement. Des essais de récolte de brouillard ont montré que ces surfaces permettent de collecter jusqu'à $435 \text{ mg/h}\cdot\text{cm}^2$, avec une amélioration de 206 % par rapport aux surfaces superhydrophobes traditionnelles. Ce type de technologie est particulièrement adapté aux zones arides ou insulaires, où l'accès à l'eau potable est limité [24].

1.5.4 Génération de vapeur solaire

La génération de vapeur solaire sans concentration optique repose sur des structures flottantes conçues pour localiser la chaleur à l'interface eau-air. Ces systèmes utilisent une surface absorbante efficace pour capter le rayonnement solaire, tandis qu'une couche isolante située en dessous limite les pertes thermiques vers le volume d'eau sous-jacent. Ce dispositif permet d'atteindre des températures proches de 100°C sous un ensoleillement standard (1 kW/m^2), favorisant une évaporation rapide. La vapeur ainsi produite peut ensuite être condensée pour récupérer de l'eau douce, notamment dans des applications de dessalement, ou utilisée pour des procédés thermiques tels que la stérilisation ou la production d'électricité. Cette approche, à la fois économe en énergie et respectueuse de l'environnement, constitue une solution prometteuse pour les régions ensoleillées confrontées à des besoins croissants en eau potable et en énergie [25].

1.5.5 Refroidissement par gouttelettes sauteuses

Sur certaines surfaces superhydrophobes nanostructurées, la coalescence de microgouttelettes d'eau condensée, de diamètre inférieur à $10 \mu\text{m}$, peut entraîner leur éjection spontanée sous forme de gouttelettes sauteuses. Ce phénomène permet de maintenir un régime de condensation en gouttelettes, évitant la formation d'un film continu moins performant. L'élimination rapide des condensats favorise un renouvellement constant de la surface, ce qui améliore l'échange thermique. Des études ont montré que ce mécanisme peut augmenter le coefficient de transfert thermique de 30 % et le flux thermique global de 25 % par rapport à des surfaces hydrophobes classiques, dans des conditions de faible sursaturation [26].

Ce type d'approche ouvre des perspectives prometteuses pour l'optimisation des performances thermiques dans les systèmes de refroidissement avancés, notamment dans les domaines de l'électronique de puissance et des technologies spatiales.

1.6 Travaux de recherche sur la condensation

1.6.1 Optimisation des tours de condensation

Les recherches sur la condensation se concentrent largement sur les mécanismes de transfert de chaleur et de masse, ainsi que sur l'amélioration de l'efficacité des systèmes industriels. Les travaux récents soulignent l'influence déterminante du choix des garnissages et des modèles prédictifs dans l'optimisation des tours de refroidissement-condensation.

Solà Cervera et al. (2018) ont mené une étude de conception industrielle comparant plusieurs types de garnissages aléatoires et structurés, en plastique et en métal. Les résultats montrent que le type de garnissage influence directement la hauteur de remplissage, le diamètre de la colonne, le coefficient global de transfert thermique, et les coûts d'investissement. Par exemple, le coefficient de transfert thermique varie entre 506 et 662 W/m²·K selon le garnissage utilisé, ce qui entraîne des hauteurs de garnissage de 5,6 à 7,3 mètres, et des écarts de coûts pouvant atteindre 30 % entre les configurations les plus économiques et les plus coûteuses [27].

L'étude souligne également l'intérêt des modèles empiriques, comme celui de Billet et Schultes (1999), qui permettent d'estimer les coefficients de transfert avec une précision inférieure à 10 %, en tenant compte des propriétés du fluide et de la structure du garnissage. L'association de garnissages innovants et de modèles fiables représente donc une stratégie pertinente pour améliorer la rentabilité énergétique des systèmes industriels [28].

Veidenbergs et al. (2010) ont étudié les transferts thermiques et massiques dans un système de récupération de chaleur intégrant un laveur à contact direct. Ce dispositif comprend deux zones : une zone de pré-refroidissement sans garnissage, et une zone avec garnissage favorisant la condensation de la vapeur contenue dans les gaz de combustion. L'étude met en évidence l'influence des conditions ambiantes (température et humidité du gaz) sur les performances de transfert. Les auteurs précisent que les échanges de chaleur et de masse ne s'effectuent pas directement entre le gaz et les gouttelettes d'eau, mais via des couches limites de vapeur saturée, ce qui conditionne fortement la condensation. Ce type de dispositif peut améliorer le rendement des chaufferies à biomasse de 5 à 10 % en valorisant la chaleur latente issue des fumées [29].

Lehner et al. (2011) ont quant à eux étudié un nouveau garnissage structuré en plastique, conçu sous forme de grille ouverte, permettant un échange efficace de vapeur et de liquide,

y compris horizontalement. Les performances hydrauliques ont été mesurées dans une colonne de 440 mm de diamètre, et les transferts de masse ont été évalués avec un système d'absorption ammoniacque–air–eau. Les résultats montrent que ce garnissage offre une excellente capacité hydraulique, supérieure à celle des garnissages aléatoires classiques. Il présente également des avantages en termes de facilité d'installation et de réduction des coûts par rapport aux garnissages structurés en tôle ondulée [30].

L'ensemble de ces travaux met en lumière l'importance des matériaux de garnissage et de la maîtrise des conditions opérationnelles dans les systèmes de condensation. L'intégration de solutions innovantes, appuyées par des modèles prédictifs éprouvés, constitue une voie prometteuse pour développer des installations plus performantes et durables.

1.6.2 Récupération du condensat et pièges à vapeur

Une étude menée à l'Alexandria Mineral Oils Company (AMOC) en Égypte a démontré l'importance de la récupération du condensat pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les pertes de vapeur. Un audit approfondi de 4 675 pièges à vapeur a révélé un taux de défaillance de 50 %, dont 22 % de pièges fuyants et 27 % de pièges froids (fermés), entraînant des pertes significatives estimées à 7,3 tonnes par heure de vapeur perdue et 20,5 tonnes par heure de condensat non récupéré. Pour remédier à cette situation, une phase pilote a été mise en œuvre dans les unités 100 et 200, incluant l'installation de nouveaux vases d'expansion, de pompes à condensat et une réorganisation des conduites. Ces interventions ont permis de réduire la pression de retour de 2,5 à 1,6 bars, augmentant ainsi la récupération du condensat et diminuant les pertes de vapeur. Les projections indiquent qu'une application complète des recommandations pourrait réduire la génération de vapeur de 82,7 à 73,2 tonnes par heure tout en augmentant la récupération du condensat de 16,6 à 37,1 tonnes par heure, générant des économies annuelles de 1,56 million de dollars avec un retour sur investissement en 12,5 mois [31].

1.6.3 Optimisation des PHE pour la condensation

Les échangeurs de chaleur à plaques (PHE) sont de plus en plus utilisés dans les applications de condensation, en particulier avec des fluides frigorigènes à faible impact environnemental. Des études récentes ont montré que des paramètres clés tels que l'angle de chevron des plaques (généralement compris entre 30° et 65°), leur géométrie et les pertes de pression associées influencent fortement l'efficacité thermique. Des essais expérimentaux ont été réalisés avec des réfrigérants conformes aux nouvelles normes environnementales, ainsi qu'avec des mélanges complexes utilisés pour optimiser le rendement énergétique des systèmes. Les résultats mettent en évidence un compromis important : bien qu'un angle de chevron plus élevé améliore significativement le transfert de chaleur, il provoque également une augmentation notable des pertes de charge. Pour mieux modéliser ces phénomènes, les chercheurs ont développé des approches mathématiques avancées. Ces modèles s'appuient sur une analyse locale détaillée, intégrant des variables telles que le titre en vapeur et les profils de vitesse, et utilisent une discrétisation fine des écoulements dans les canaux. Cette méthodologie a permis de rapprocher considérablement les prévisions théoriques des données expérimentales, avec des écarts parfois inférieurs à 10 % [32].

1.6.4 Condensation du mercure et transferts thermiques

Une étude expérimentale a été menée sur la condensation en film de vapeur de mercure sur un tube en nickel refroidi. L'épaisseur du film de condensat a été mesurée à six hauteurs différentes le long du condenseur, pour des flux thermiques variant de 63 à 552 kW/m². Les épaisseurs relevées allaient de 0,025 mm à 0,064 mm. Ces valeurs sont en accord raisonnable avec les prédictions du modèle classique de Nusselt pour la condensation en film laminaire [33].

Le coefficient de transfert thermique, calculé à partir de l'épaisseur du film, atteignait des valeurs proches de 283 W/m²·K. Toutefois, les mesures directes obtenues à partir du flux de chaleur et de la température de paroi ont donné des valeurs comprises entre 1130 et 22 700 W/m²·K, soit nettement inférieures à celles prédites par les modèles théoriques [33].

Cette différence est attribuée à des résistances thermiques inter faciales, ainsi qu'à une légère surchauffe de la vapeur dans la chambre de condensation. En outre, la présence de gaz non condensables, tels que l'air, a été identifiée comme un facteur réduisant significativement le transfert de chaleur en empêchant le mouillage complet de la surface

par le mercure liquide. Toutes les mesures ont été réalisées en régime de condensation en film continu, afin de garantir une meilleure stabilité et reproductibilité des données expérimentales [33].

1.6.5 Effet des micro/nanostructures sur la condensation

L'amélioration du transfert thermique par condensation a été étudiée à travers la modification de la surface de tubes en cuivre, d'une longueur de 500 mm, à l'aide d'un procédé de micro/nanofabrication simple, peu coûteux et applicable à grande échelle. Quatre types de structures ont été réalisés : nano-dendrite (ND), micro-dendrite (MD), micro-cubique (MC) et micro/nano-cubique (MNC). Les expériences ont révélé que les surfaces ND et MNC présentent les meilleures performances thermiques, avec des coefficients de transfert de chaleur nettement supérieurs grâce à une fréquence de détachement accrue des gouttelettes et une condensation en mode goutte-à-goutte efficace [34].

Une corrélation a été établie entre l'hystérésis de l'angle de contact et les performances thermiques. Les surfaces présentant un angle de contact plus faible favorisent un détachement rapide des gouttes, permettant de maintenir la condensation en mode goutte-à-goutte même à des niveaux élevés de sursaturation. Cela se traduit par une résistance thermique plus faible et une efficacité accrue du transfert de chaleur [34].

Ces résultats mettent en évidence le rôle clé de la micro/nanostructuration des surfaces dans l'optimisation du transfert thermique par condensation. De plus, la simplicité et la faisabilité industrielle du procédé de fabrication ouvrent la voie à des applications concrètes dans les échangeurs de chaleur à grande échelle [34].

1.6.6 Condenseurs avancés pour le refroidissement

Dans le cadre de l'amélioration des systèmes de condensation, plusieurs travaux rapportés par Harby et al. (2016) mettent en évidence l'efficacité des condensateurs évaporatifs intégrés aux cycles à compression de vapeur. Ces systèmes exploitent l'évaporation de l'eau pour renforcer l'évacuation thermique, réduisant ainsi la charge sur le compresseur et améliorant le rendement global. Ainsi, Nasr et Salah (2009) ont proposé un design innovant utilisant des feuilles de tissu enroulées autour des tubes, permettant une réduction de 0,45 °C au niveau du condenseur pour chaque degré d'abaissement de la température de l'évaporateur. De leur côté, Michalis et al. (2007) ont conçu un condenseur intégré

permettant une augmentation du coefficient de performance (COP) jusqu'à 110 %, tout en réduisant la consommation énergétique de 58 %. Enfin, Hwang et al. (2001) ont testé un condenseur évaporatif immergé, démontrant une capacité supérieure de 8,1 % par rapport à un condenseur à air classique. Ces études, compilées dans la revue de Harby et al. Confirment que l'optimisation du processus de condensation via des moyens passifs ou hybrides constitue une voie prometteuse pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de refroidissement modernes [35].

1.7 Contribution de la condensation au processus de distillation

1.7.1 Principe de la distillation

La distillation est un procédé thermique qui permet de séparer les constituants d'un mélange liquide en exploitant les différences de volatilité entre les composants. Lorsqu'un liquide tel que l'eau du robinet est chauffé jusqu'à son point d'ébullition, les constituants les plus volatils s'évaporent. Les vapeurs ainsi formées sont ensuite condensées sur une surface froide pour être récupérées sous forme de liquide purifié. Ce procédé repose sur les équilibres liquide-vapeur (ELV), qui décrivent la répartition des composants entre les phases liquide et vapeur à une température donnée [36].

Dans le cas de mélanges simples, comme l'eau et ses impuretés, le comportement thermodynamique peut être approximé à l'aide de la loi de Raoult :

$$P_A = x_A \cdot P_A^0 \quad (1.1)$$

Où :

P_A : Pression de vapeur du composant A (eau).

x_A : Fraction molaire dans le liquide.

P_A^0 : Pression de vapeur du composant A pur à la même température.

Cette relation permet de modéliser la formation de vapeur d'eau au cours de la distillation. En l'absence de composés volatils significatifs, ce procédé assure une purification efficace de l'eau, notamment dans des dispositifs tels que les distillateurs solaires ou les systèmes de production d'eau potable [36].

1.7.2 Rôle de la condensation dans le processus de distillation

La condensation constitue une étape thermodynamique clé du procédé de distillation, assurant la conversion des vapeurs en liquide récupérable, appelé distillat. Elle intervient après la vaporisation, au niveau du condenseur, où les vapeurs montantes sont refroidies jusqu'à atteindre leur température de saturation [37].

Dans les systèmes utilisant de l'eau, la condensation permet de purifier le liquide en séparant les substances non volatiles. L'efficacité du transfert thermique pendant la condensation dépend du mode de condensation (gouttelettes ou film liquide), de la tension superficielle, de la mouillabilité de la surface, et des conditions opératoires (pression, température, débit de refroidissement) [38].

Un condenseur fonctionnant en régime diphasique optimal permet une récupération quasi complète de la vapeur produite, tout en minimisant les pertes énergétiques. Le coefficient global de transfert thermique, noté U , est un paramètre déterminant influencé par les propriétés thermo physiques du fluide, les résistances de contact et les caractéristiques géométriques de l'échangeur [39].

Ainsi, la condensation n'est pas simplement une phase passive du cycle, mais un levier majeur pour optimiser l'efficacité énergétique et la qualité du distillat dans les procédés de séparation thermique [39].

1.7.3 Paramètres clés de la distillation

➤ Température

La température est le facteur clé de la distillation, car elle détermine la vaporisation sélective des composants du mélange. Chaque composé possède un point d'ébullition spécifique ; ainsi, en chauffant le mélange à une température précise, on permet à l'un des composants de passer à l'état vapeur pendant que les autres restent liquides. Un contrôle précis de la température est essentiel pour éviter la vaporisation simultanée de plusieurs constituants, ce qui altérerait la séparation. Cette régulation est cruciale dans les colonnes à plateaux ou à garnissage utilisées dans les procédés industriels [1].

➤ Pression

La pression influence directement le point d'ébullition des substances. En diminuant la pression (distillation sous vide), les composants peuvent être séparés à des températures plus basses, ce qui est indispensable pour préserver l'intégrité des composés thermosensibles. À l'inverse, l'augmentation de pression peut être utilisée pour des mélanges à haut point d'ébullition. Le choix du niveau de pression doit donc être adapté à la nature du mélange traité et aux objectifs de séparation [39].

➤ Volatilité relative

La volatilité relative est un paramètre thermodynamique essentiel qui exprime la facilité avec laquelle deux composants peuvent être séparés par distillation. Elle correspond au rapport des pressions de vapeur des deux substances. Plus cette valeur est élevée, plus la séparation est aisée. En revanche, lorsque la volatilité relative est proche de 1, la séparation devient difficile, nécessitant plus de plateaux ou un reflux plus important. C'est un critère central dans le dimensionnement et l'analyse de l'efficacité des colonnes de distillation [40].

➤ Rapport de reflux

Le rapport de reflux représente la proportion du distillat condensé qui est renvoyée dans la colonne de distillation. Il joue un rôle crucial dans le raffinement de la séparation : un reflux élevé augmente le nombre de contacts vapeur-liquide, améliorant ainsi la pureté du distillat. Toutefois, cela entraîne une consommation énergétique plus importante. Le choix optimal du rapport de reflux permet de concilier performance de séparation et coût énergétique, ce qui est fondamental en génie chimique [41].

CHAPITRE 2

CHAMP MAGNÉTIQUE

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les notions fondamentales liées aux champs magnétiques, leurs origines, ainsi que leurs effets sur les matériaux. Il aborde également l'influence de ces champs dans les procédés thermiques, tels que la condensation et l'évaporation, en mettant en évidence leur rôle potentiel dans l'amélioration des performances énergétiques.

2.2 Généralités sur les champs magnétiques et leurs propriétés

2.2.1 Champ magnétique

Le champ magnétique désigne une région de l'espace influencée par un aimant ou par la circulation d'un courant électrique à travers un conducteur, comme une bobine. Il résulte du déplacement ou de la rotation de charges électriques, générant des forces de nature attractive ou répulsive. Ce champ peut être représenté par des lignes imaginaires, orientées selon la direction qu'indiquerait une boussole en un point donné de l'espace [42].

2.2.2 Aimant permanent

Un aimant permanent est fabriqué à partir de matériaux ferromagnétiques, reconnus pour leur capacité à conserver une aimantation même en l'absence de champ magnétique externe. Cette propriété repose sur la présence de domaines magnétiques alignés et sur le phénomène de rémanence, qui permet de maintenir la direction de l'aimantation de façon durable.

Deux caractéristiques essentielles définissent un aimant permanent :

- une induction magnétique élevée lorsque le champ extérieur est nul.
- un champ coercitif important élevé pour annuler cette induction.

Autrement dit, ces aimants sont constitués de matériaux présentant un cycle d'hystérésis large. Bien que les métaux ferromagnétiques comme le fer, le cobalt ou le nickel présentent tous un tel cycle, seuls certains alliages rares possèdent les propriétés nécessaires

pour maintenir une aimantation stable et durable. En plus de leurs performances magnétiques, ces matériaux doivent également offrir une bonne stabilité structurelle et des propriétés mécaniques satisfaisantes [43].

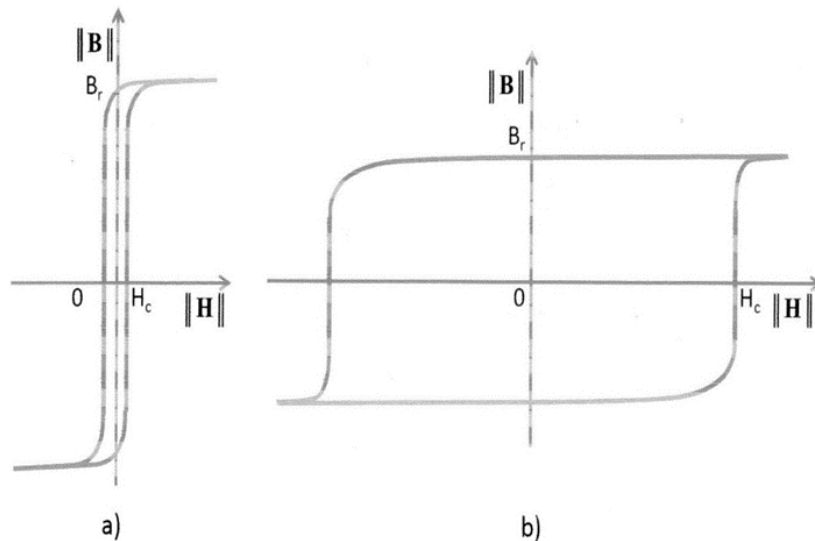


Figure 2.1. Cycle d'hystérésis représentatif des matériaux magnétiques a) doux et b) durs ; champ coercitif [44]

➤ Caractéristiques microscopiques

L'étude physique des matériaux magnétiques permet de relier les propriétés des aimants permanents à des phénomènes à l'échelle atomique. La création d'un dipôle magnétique est principalement associée au spin des électrons, qui génère un moment magnétique individuel [43]. Le phénomène de ferromagnétisme résulte de l'organisation de ces moments en domaines de Weiss, où les aimantations atomiques sont alignées dans une même direction. Ces domaines sont séparés par des zones de transition appelées parois de Bloch, dont le comportement influence la capacité du matériau à conserver son aimantation après suppression du champ extérieur, un phénomène connu sous le nom de rémanence. Ces parois jouent également un rôle crucial dans les mécanismes de démagnétisation [45].

2.2.3 Aimant annulaire

Les aimants annulaires sont couramment utilisés dans des dispositifs tels que les moteurs, les paliers magnétiques, les transducteurs électromécaniques et les haut-parleurs. On distingue plusieurs types d'aimantation dans ces structures : radiale, axiale et diamétrale. Dans le cas d'un aimant à aimantation diamétrale, la distribution des charges magnétiques

peut être visualisée en schématisant les pôles magnétiques (Figure 2.2). Sur cet anneau, la face supérieure est associée à une densité de pôles magnétiques positifs (+M), représentant le pôle nord, tandis que la face inférieure présente une densité équivalente mais de signe opposé (-M), correspondant au pôle sud. À l'extérieur de l'aimant, les lignes de champ magnétique s'étendent du pôle nord vers le pôle sud, illustrant le champ généré par ce type de géométrie [46]



Figure 2.2. (a) structure de l'aimant annulaire. (b) Équiflux [47]

2.2.4 Bobine ou solénoïde

Un solénoïde est obtenu en enroulant un fil conducteur autour d'un cylindre, formant ainsi une hélice. Lorsqu'un courant électrique traverse ce fil, il génère un champ magnétique. À l'intérieur du solénoïde, ce champ est pratiquement homogène et aligné avec l'axe longitudinal de l'enroulement. À l'extérieur, les lignes de champ s'étendent comme celles d'un aimant droit, partant de la face nord pour revenir par la face sud. Le comportement du champ magnétique dans un solénoïde ressemble donc à celui d'un aimant permanent. Plus le solénoïde est long par rapport à son diamètre, plus le champ magnétique interne est uniforme [48].

❖ Intensité du champ magnétique

Dans un solénoïde de longueur finie, orienté selon l'axe $\vec{u}_z$, contenant N spires par unité de longueur et traversé par un courant électrique I, le champ magnétique à l'intérieur est considéré comme uniforme. Il est exprimé par la relation suivante (2.1) [48] :

$$\vec{B} = \mu n I \vec{u}_z \quad (2.1)$$

La constante μ représente la perméabilité magnétique du milieu, nécessaire pour conserver l'homogénéité dimensionnelle de l'équation. Elle est définie par (2.2) :

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.2)$$

Où :

μ_0 : la perméabilité du vide

μ_r : la perméabilité relative du matériau.

2.2.5 Action des forces électromagnétiques

Lorsqu'un champ magnétique est appliqué à une cellule électrochimique, il peut influencer significativement les processus de transfert de matière et le dépôt des espèces électrochimiques. Cette influence s'exerce notamment par l'intermédiaire de forces électromagnétiques telles que la force de Lorentz, qui agit sur les ions en mouvement dans la solution [48]. Par ailleurs, des effets peuvent aussi résulter de forces purement magnétiques, selon les propriétés des ions présents, leur concentration, ainsi que l'intensité du champ appliqué [49].

2.2.5.1 Force de Lorentz

La loi de Lorentz permet de déterminer la force exercée sur une particule chargée lorsqu'elle se déplace dans un champ électromagnétique, c'est-à-dire soumise simultanément à un champ électrique $\vec{E}$ et à un champ magnétique $\vec{B}$. Dans le contexte des procédés électrochimiques, où l'effet du champ magnétique est prédominant, l'expression de la force de Lorentz peut être simplifiée de la manière suivante (2.3) [49, 50, 51] :

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Avec :

$\vec{j}$: La densité du courant électrique (A/m²)

$\vec{B}$: Le champ magnétique (T)

$\vec{F}_L$: La force de Lorentz (N/m³)

Cette force, orientée perpendiculairement à la fois à la direction du courant et à celle du champ magnétique, peut modifier localement la dynamique des fluides et des espèces ioniques, influençant ainsi les transferts de matière dans les cellules électrochimiques.

2.2.5.2 Force magnétique

Lorsqu'un champ magnétique est appliqué à une solution, celle-ci devient magnétisée. Cette aimantation, notée ($\vec{M}$), est reliée à l'intensité du champ magnétique ($\vec{H}$) par la relation suivante (2.4) [49, 52] :

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (2.4)$$

Dans cette expression, χ désigne la susceptibilité magnétique du milieu, et μ_0 représente la perméabilité du vide. L'induction magnétique $\vec{B}$ résultante est alors donnée par (2.5) :

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu\vec{H} \quad (2.5)$$

Les forces générées dans le fluide sous l'effet de ce champ s'obtiennent à partir du gradient de l'énergie magnétique, selon (2.6) [46] :

$$F_{\text{magnétique}} = -\nabla E_{\text{magnétique}} = \frac{1}{2\mu} (\nabla \chi B^2) \quad (2.6)$$

Dans le cas des solutions électrochimiques, la susceptibilité magnétique dépend de la concentration ionique C et de la susceptibilité magnétique molaire χ_m des espèces dissoutes (2.7) :

$$\chi = \chi_m C \quad (2.7)$$

Ainsi, la force magnétique résultante peut s'écrire :

$$F_{\text{magnétique}} = \frac{\chi_m C}{\mu} B \nabla B \quad (2.8)$$

Les relations suivantes (2.9) et (2.10) précisent les paramètres magnétiques du milieu :

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (2.9)$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m \quad (2.10)$$

Avec :

χ_m : Susceptibilité magnétique molaire des ions (m^3/mol)

C : Concentration des ions (mol.L^{-1})

$F_{\nabla B}$: Force magnétique due au gradient du champ magnétique (N.m^{-3})

2.2.6 Classification magnétique des matériaux

Les matériaux peuvent présenter différents types de comportement magnétique, en fonction des propriétés électromagnétiques spécifiques de leurs atomes [49, 52] :

❖ Diamagnétisme

Le diamagnétisme concerne les matériaux constitués d'atomes dont toutes les couches électroniques sont complètes, ce qui signifie qu'ils ne possèdent aucun moment magnétique intrinsèque [53]. Lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, ces matériaux développent une aimantation induite très faible, orientée en sens opposé au champ. En conséquence, leur susceptibilité magnétique est faible et négative, typiquement de l'ordre de $\chi \approx -10^{-6}$, et reste constante quelle que soit la température. Parmi les exemples de matériaux diamagnétiques, on trouve certains métaux comme l'argent (Ag) et le cuivre (Cu), ainsi que des minéraux dépourvus de fer tels que le quartz, les silicates, et les carbonates purs de calcium ou de magnésium [54].

❖ Paramagnétisme

Les matériaux présentant un comportement paramagnétique ont une susceptibilité magnétique positive, généralement comprise entre 10^{-6} et 10^{-3} . Ce phénomène apparaît dans des substances dont les atomes possèdent un moment magnétique permanent, mais sans interactions mutuelles entre ces moments. Lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué, ces moments ont tendance à s'orienter dans la direction du champ, ce qui renforce l'aimantation. Toutefois, dès que le champ est supprimé, l'alignement disparaît [53]. Parmi les matériaux paramagnétiques, on trouve les silicates ferromagnésiens ((Fe, Mg)SiO₄) tels que les péridots, pyroxènes, amphiboles, micas noirs, mais aussi certains minéraux argileux (comme la smectite ou l'illite), les sulfures de fer (pyrite, FeS₂) et les oxydes de fer et de titane [54].

❖ Ferromagnétisme

Le ferromagnétisme se manifeste chez certains matériaux capables d'acquérir une aimantation induite intense, qu'ils peuvent conserver partiellement même après la disparition du champ externe. Cette propriété résulte du couplage entre les moments magnétiques des électrons non appariés d'atomes voisins, conduisant à une orientation

collective persistante [53]. Ces matériaux présentent une susceptibilité magnétique très élevée, généralement entre 10^3 et 10^6 . Des exemples notables incluent les métaux comme le fer, le nickel, le cobalt, le chrome, le manganèse, ainsi que certains de leurs oxydes et sulfures [54].

❖ Ferrimagnétisme

Le ferrimagnétisme apparaît lorsque des ions comme Fe^{2+} et Fe^{3+} occupent des positions distinctes dans le réseau cristallin, avec des moments magnétiques inégaux orientés en sens opposé. Cette configuration donne une aimantation nette plus faible que celle des matériaux ferromagnétiques et une susceptibilité qui dépend de l'intensité du champ externe [53]. Ce comportement est typique des oxydes de fer magnétiques, comme la magnétite (Fe_3O_4), qui associe des ions Fe^{2+} et Fe^{3+} dans une structure de ferrite naturelle [50]. On le retrouve aussi dans certaines ferrites mixtes comme $(\text{NiO}) (\text{Fe}_2\text{O}_4)$, et dans des sulfures de fer enrichis tels que la greigite un (Fe_3S_4) et la pyrrhotite (Fe_7S_8) [54].

❖ Antiferromagnétisme

L'antiferromagnétisme se produit dans des minéraux cristallisés contenant des ions identiques (comme Fe^{3+}) placés de façon à ce que leurs moments magnétiques soient alignés de manière strictement antiparallèle, s'annulant mutuellement. Ce type de matériau ne présente donc pas de moment magnétique global, et sa susceptibilité reste faible, augmentant avec la température jusqu'à une température critique caractéristique [53]. Des exemples de minéraux antiferromagnétiques imparfaits sont l'hématite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) et la goethite ($\alpha\text{-FeOOH}$), notamment lorsqu'ils sont peu cristallisés [54, 55].

2.3. Travaux de recherche portant sur l'influence du champ magnétique

Cette section explore les diverses applications des champs magnétiques dans les domaines de la condensation, de l'évaporation, et des procédés thermiques. Plusieurs études expérimentales et théoriques ont démontré que les champs magnétiques, par leur interaction avec les molécules d'eau et les fluides thermiques, peuvent modifier les propriétés physiques, spectroscopiques et thermodynamiques des systèmes. Ces effets, bien que parfois subtils, ouvrent la voie à des optimisations potentielles dans des applications industrielles et environnementales.

Une étude fondamentale menée par D.W. Posener (1960) a examiné les effets des interactions magnétiques et quadripolaires nucléaires sur le spectre micro-onde des

molécules d'eau, en particulier pour les isotopes HDO (eau semi-lourde) et D₂O (eau lourde). Les résultats ont mis en évidence que les interactions magnétiques dipolaires entre les moments nucléaires de l'hydrogène et du deutérium induisent des décalages de fréquence notables dans la structure hyperfine du spectre, atteignant environ 100 kHz pour HDO. L'analyse des constantes de couplage magnétiques a également montré que les champs magnétiques internes à la molécule influencent sensiblement la distribution énergétique des niveaux hyperfins. Ces observations suggèrent, de manière prospective, que des champs magnétiques externes pourraient potentiellement modifier les propriétés spectroscopiques et les interactions intermoléculaires de l'eau, ce qui pourrait avoir un impact dans des processus comme la condensation [56].

Dans cette continuité, Nakagawa et al. (1998) ont examiné l'effet d'un champ magnétique de 8 Tesla sur la vapeur d'eau. Ils ont testé deux configurations expérimentales : l'une en air ambiant et l'autre avec un flux de gaz porteur. Dans la première, l'évaporation s'accroît dans les zones où le champ magnétique est plus intense, et dans la seconde, l'effet est plus prononcé avec l'oxygène (gaz paramagnétique) par rapport à l'azote (gaz diamagnétique). Ces résultats suggèrent que le champ magnétique influe sur l'évaporation en fonction de la nature du gaz environnant, indiquant que l'interaction entre la vapeur d'eau et les champs magnétiques pourrait être complexe et influencée par divers facteurs [57].

Dans cette même perspective, d'autres travaux expérimentaux ont mis en évidence l'influence directionnelle et statistiquement significative des champs magnétiques sur l'évaporation de l'eau. Seyfi et al. (2017) ont mené une étude expérimentale pour évaluer l'effet d'un champ magnétique statique sur l'évaporation de l'eau déionisée. Deux récipients identiques ont été utilisés : l'un exposé à un champ magnétique perpendiculaire à l'interface eau-air, et l'autre a servi de témoin. Le champ a été généré à l'aide d'un, deux ou trois aimants en ferrite, produisant des intensités allant jusqu'à 100 mT. Les masses d'eau évaporée ont été mesurées toutes les 20 minutes avec une balance de précision. Les résultats montrent une augmentation de l'évaporation proportionnelle au nombre d'aimants, atteignant jusqu'à 18,3 % avec trois aimants. Aucune variation n'a été observée lorsque le champ a été orienté tangentiellement à l'interface. Un effet mémoire a également été mis en évidence, puisque après le retrait du champ magnétique, l'eau préalablement exposée a maintenu un taux d'évaporation supérieur à celui de l'eau témoin pendant environ 40 minutes. Ces observations sont expliquées par l'effet de la force de Lorentz sur les molécules

chargées à l'interface, ce qui affaiblit les liaisons hydrogène et facilite le passage à l'état vapeur. [58].

Dueñas et al. (2021) ont étudié l'effet de champs magnétiques statiques de faible intensité (30 à 200 mT) sur le taux d'évaporation de l'eau purifiée en circulation dans un système fermé. Les essais ont été réalisés à différentes températures (6 à 70 °C) et humidités relatives, avec une méthode rigoureuse de mesure du poids des échantillons évaporés dans une enceinte thermique. Les résultats montrent que l'application d'un champ magnétique perpendiculaire au flux d'eau augmente significativement la vitesse d'évaporation, en particulier à basse température, avec un gain allant jusqu'à 20 %. L'effet est statistiquement confirmé et diminue progressivement à mesure que la température augmente. Un modèle empirique triadique a été développé, reliant le champ magnétique, la température et l'humidité à la vitesse d'évaporation. Il a été démontré que le mouvement de l'eau en circulation n'influence pas significativement l'évaporation (<1 %). L'augmentation de l'évaporation est attribuée à l'action du champ magnétique sur les liaisons hydrogène, favorisant la fragmentation des clusters moléculaires et augmentant le nombre de molécules monomériques plus susceptibles de s'évaporer [59].

Poursuivant l'exploration des effets physiques, Guo et al. (2012) ont approfondi ces mécanismes en étudiant l'effet d'un champ magnétique sur l'évaporation de l'eau, qui ont utilisé un aimant supraconducteur pour simuler différentes conditions de gravité (0 g, 1 g, 1,56 g et 1,96 g). Les résultats ont montré que l'évaporation de l'eau s'accélérait de manière significative en présence d'un champ magnétique, notamment dans des conditions de microgravité simulée (0 g). À la position 0 g/8,69 T, l'évaporation était plus rapide qu'à 1,56 g/8,69 T. Les mécanismes proposés incluent l'affaiblissement des liaisons hydrogène et des forces de van der Waals sous l'effet du champ magnétique, ainsi que la convection induite par le gradient de champ magnétique. Ces résultats suggèrent que les champs magnétiques peuvent influencer les transitions de phase de l'eau, notamment la condensation [60].

Ces observations sont confortées par les travaux de Wang et al. (2018) ont examiné l'effet d'un champ magnétique statique sur certaines propriétés physiques de l'eau, en comparant de l'eau du robinet avec quatre types d'eau magnétisée soumise à différentes intensités de champ (100 à 400 mT). Les résultats montrent que la magnétisation modifie significativement les propriétés thermiques de l'eau : la chaleur spécifique diminue, l'évaporation augmente et le point d'ébullition baisse, particulièrement à une intensité

optimale de 300 mT. Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un calorimètre différentiel pour la chaleur spécifique et d'un ébulliomètre pour l'évaporation et le point d'ébullition. À 300 mT, l'évaporation a augmenté de près de 39 %, tandis que le point d'ébullition a diminué d'environ 2 °C. Ces variations indiquent un effet de magnétisation optimal à cette intensité, sans que les effets ne s'amplifient au-delà. Bien que le mécanisme exact reste incertain, il est suggéré que les champs magnétiques influencent les liaisons hydrogène entre molécules d'eau [61].

Dans une approche complémentaire, Shalatonin et al. (2017) ont exposé de l'eau distillée à des champs magnétiques de 45–65 mT pendant jusqu'à 70 heures. Les résultats montrent que le pôle nord favorise l'augmentation du pH et du taux d'évaporation, tandis que le pôle sud a l'effet inverse. Ces observations renforcent l'idée que les champs magnétiques peuvent modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau en fonction de l'orientation du champ, et que ces modifications peuvent être liées à la modification des forces intermoléculaires [62].

À une échelle plus fine, Kohno et al. (2022) ont examiné l'effet du champ magnétique terrestre (d'une intensité de $1,0 \times 10^{-4}$ T) sur la dissolution des gaz dans l'eau. Des expériences ont été réalisées en utilisant de l'eau ultra-pure et des gaz de haute pureté (oxygène et hydrogène à 99,5 %). Les concentrations de gaz dissous ont été mesurées à différentes températures (de 5 à 60°C) à l'aide d'électrodes spécifiques pour l'oxygène et l'hydrogène. Les résultats ont montré que le champ magnétique terrestre influence la dissolution des gaz en modifiant les énergies d'excitation des molécules. Par exemple, l'énergie d'excitation de l'oxygène dissous a été calculée à $-4,55 \times 10^{-7}$ J mol⁻¹ à 25°C, tandis que celle de l'hydrogène était de $-4,40 \times 10^{-7}$ J mol⁻¹. Ces résultats indiquent que les interactions moléculaires entre l'eau et les gaz dissous sont influencées par les propriétés électromagnétiques des molécules et du champ magnétique terrestre [63].

Une application directe de ces effets a été démontrée par Badru et al. (2015), qui ont étudié la condensation de vapeur d'eau électriquement chargée en présence d'un champ magnétique. Les chercheurs ont utilisé une chambre à vapeur placée dans un environnement calorimétrique maintenu à 100 °C, afin d'éliminer toute condensation liée aux variations thermiques externes. La vapeur d'eau a été ionisée à l'aide d'électrodes en aluminium et en cuivre, puis soumise à un champ magnétique de 165,23 mT, généré soit par un solénoïde, soit par un aimant permanent. Les résultats ont montré que la vapeur chargée s'est condensée

beaucoup plus rapidement que la vapeur non chargée : la durée de la phase de brouillard est passée de 121 secondes sans champ à seulement 6 secondes en présence du champ magnétique. De plus, le temps de coalescence des gouttelettes a été réduit à 35 secondes, contre 362 secondes dans le cas de vapeur non chargée. Les gouttelettes issues de la vapeur chargée ont également présenté un diamètre supérieur, atteignant entre 2 et 5 mm après 20 minutes, contre un maximum de 2 mm sans champ. Cette étude suggère que le champ magnétique, en interagissant avec les charges électriques présentes sur les molécules de vapeur, favorise la nucléation, la coalescence et la croissance des gouttelettes. Ces résultats confirment l'intérêt potentiel de l'application des champs magnétiques dans les procédés de condensation assistée, notamment dans les contextes de contrôle climatique, de récupération d'humidité atmosphérique, ou d'optimisation thermique dans les systèmes industriels [64].

En simulation numérique, Khosravifar et al. (2021) ont étudié l'effet des champs magnétiques sur la condensation d'une bulle montante dans un liquide sous-refroidi. Leur étude, réalisée à l'aide d'une simulation 3D, a porté sur deux diamètres initiaux de bulles (1,008 mm et 4 mm) et a utilisé le modèle de Tanasawa, une relation empirique qui permet d'estimer le taux de transfert de masse à l'interface vapeur-liquide en fonction des conditions thermiques, pour modéliser la condensation. Les résultats ont montré que l'application d'un champ magnétique a entraîné une augmentation de la pression à l'intérieur de la bulle, ce qui a favorisé une condensation plus rapide par rapport à une situation sans champ. Pour les bulles de petite taille, un champ magnétique vertical s'est révélé plus efficace, tandis qu'un champ horizontal s'est montré plus favorable pour les bulles plus grandes. Par ailleurs, les champs magnétiques ont modifié la forme des bulles en induisant une déformation orientée selon la direction du champ [65].

Au-delà de l'eau pure, l'application de champs magnétiques s'est étendue aux fluides techniques, notamment dans le domaine du refroidissement. Kadhim et al. (2021) ont ainsi examiné l'impact du champ magnétique sur certaines propriétés de l'eau, en particulier l'eau salée (Almasab Alam), qui a étudié les effets de cinq intensités de champ magnétique (0,1 T, 0,2 T, 0,3 T, 0,5 T et 0,7 T). Ces champs ont été appliqués pour magnétiser l'eau salée, et plusieurs propriétés physiques ont été mesurées, notamment le point d'ébullition, la densité, la durée d'évaporation et la solubilité. Les résultats ont montré des changements notables dans ces propriétés. En particulier, le point d'ébullition de l'eau magnétisée a diminué de 1,52 % avec un champ de 0,3 T, tandis que la solubilité a augmenté de 14 % pour la même intensité. De plus, la durée d'évaporation a été réduite de 26 % et la densité a légèrement

diminué. Ces modifications sont attribuées aux effets du champ magnétique sur les liaisons hydrogène et la structure moléculaire de l'eau. Ces résultats suggèrent que l'eau magnétisée pourrait offrir des avantages dans des applications telles que l'irrigation, le refroidissement et la production d'énergie [66].

De manière similaire, Chibowski, Szczes et Hołysz (2018) qui ont étudié l'effet d'un champ magnétique statique intense (0,5–0,65 T, obtenu avec des aimants néodymes) sur le taux d'évaporation et la tension de surface de l'eau à température ambiante (22–24 °C). Ils montrent qu'en plaçant un échantillon d'eau pure sous un anneau magnétique, l'évaporation est systématiquement accélérée (jusqu'à 440 mg d'eau évaporée en 150 min) et que cet effet dépend du pôle orienté vers le haut, bien qu'à long terme (jusqu'à 48 h) l'augmentation soit indépendante de la polarité. Par ailleurs, une diminution de la tension de surface d'environ 2,1 mN/m est observée après 60 min de traitement, avec un effet mémoire qui persiste plus d'une heure après suppression du champ. Les auteurs discutent ces résultats à la lumière de simulations moléculaires et invoquent l'influence du champ sur les liaisons hydrogène intra et inter clusters d'eau, ainsi que l'action possible de la force de Lorentz sur les dipôles à l'interface liquide vapeur [67].

Dans le domaine du refroidissement thermique, plusieurs études ont mis en évidence les bénéfices liés à l'application d'un champ magnétique dans les systèmes à compression de vapeur. Tipole et al. (2017) ont étudié un refroidisseur d'eau fonctionnant avec un réfrigérant R404A, sur lequel quatre paires d'aimants permanents (300 mT) ont été installées à la sortie du condenseur. L'ajout d'un champ magnétique a permis une amélioration du coefficient de performance (COP) de 8,94 %, une réduction de la consommation énergétique du compresseur de 4,43 % et une augmentation de l'effet frigorifique pouvant atteindre 8,82 %. Cette amélioration est principalement attribuée à une diminution de la viscosité du fluide frigorigène, favorisant l'augmentation du débit massique et une meilleure efficacité de transfert thermique [68].

Dans la même optique, Sidheshware et al. (2020) ont étudié l'effet de champs magnétiques appliqués à la sortie du condenseur sur la consommation énergétique de compresseurs utilisant différents réfrigérants (R134a, R152a, R407a et R290). Des intensités de champ de 3000 à 12000 gauss ont été testées. Les résultats montrent une réduction significative de la puissance absorbée, notamment pour le R152a, avec une économie maximale de 25,86 % à 12000 gauss. Des gains moindres, mais notables, ont également été

observés pour les autres fluides. L'application du champ magnétique améliore les échanges thermiques en facilitant l'évaporation, ce qui réduit l'effort du compresseur. Cette méthode simple, passive et non intrusive se révèle prometteuse non seulement pour l'optimisation énergétique, mais aussi pour réduire l'empreinte environnementale des systèmes de réfrigération dans une logique de transition vers des solutions plus durables [69].

Parallèlement, Jathar et al. (2018) ont comparé les performances de différents réfrigérants (R600a, R134a, R404a, R290) soumis à un champ magnétique de 2000 Gauss. Les résultats ont montré une amélioration significative du COP, en particulier pour les réfrigérants hydrocarbonés comme le R600a, dont le COP est passé de 1,136 à 1,376 avec deux paires magnétiques. Au-delà de cette intensité, les performances ont diminué, probablement en raison d'un échauffement excessif du fluide. Ces études soulignent que l'application ciblée d'un champ magnétique peut optimiser le rendement des systèmes frigorifiques, à condition de contrôler l'intensité du champ et le type de fluide utilisé [70].

Dans une approche plus technologique, Samin et Aucoin (2003) ont étudié l'effet de champs magnétiques appliqués à la sortie du condenseur sur les performances de nouveaux mélanges de réfrigérants dans un système de pompe à chaleur à air. Les tests ont été réalisés avec les mélanges R-404A, R-410A, R-507 et R-407C, en utilisant jusqu'à trois aimants totalisant une intensité de champ magnétique de 12 000 Gauss. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la force du champ magnétique entraînait une légère hausse de la pression de tête du compresseur et de la température de décharge, tout en réduisant la quantité de réfrigérant liquide bouillant dans le compresseur. Cela a eu pour effet d'améliorer le coefficient de performance (COP) de l'évaporateur jusqu'à 20 %, ainsi que les capacités thermiques du condenseur et de l'évaporateur. Le mélange R-404A s'est particulièrement distingué, affichant les meilleures performances à basse température d'évaporation, grâce à son point d'ébullition bas et à sa chaleur latente élevée. L'étude a également suggéré que le champ magnétique facilite l'entraînement de l'huile hors des surfaces d'échange thermique, améliorant ainsi les transferts de chaleur. Ces effets varient selon la composition du mélange et son point d'ébullition, soulignant le potentiel de cette méthode passive pour optimiser l'efficacité énergétique des systèmes frigorifiques [71].

Enfin, dans une étude expérimentale pionnière, Griest, Libsch et Conard (1956) ont exploré l'effet d'un champ magnétique appliqué durant la condensation de fer évaporé sous vide, afin d'analyser son influence sur la coercivité et la morphologie du dépôt. Le fer a été

é vaporé à haute température, entre 1600 et 1650 °C, dans une enceinte à vide poussé à une pression résiduelle de $6,7 \times 10^{-4}$ Pa, puis condensé sur des substrats en cuivre refroidis à différentes températures, notamment à -196 °C et -78 °C. Un champ magnétique externe, appliqué perpendiculairement à la surface de condensation et atteignant jusqu'à 71,6 kA/m, a été utilisé durant le dépôt. Les résultats ont mis en évidence que l'intensité du champ affectait significativement les propriétés magnétiques du fer déposé. En particulier, à une température de -196 °C et sous un champ de 71,6 kA/m, la coercivité a atteint une valeur maximale d'environ 9,55 kA/m. L'analyse morphologique a révélé que les particules formées présentaient des dimensions majoritairement comprises entre 10 et 20 micromètres, sans présence notable de particules submicroniques. Par ailleurs, la diffraction des rayons X a montré un élargissement des raies, attribué à des contraintes internes dans les cristaux, responsables en grande partie de l'augmentation de la coercivité. Cette étude met ainsi en évidence le rôle du champ magnétique comme paramètre actif dans le contrôle des propriétés magnétiques des couches métalliques déposées, en particulier à très basse température [72].

CHAPITRE 3

MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Introduction

Ce chapitre décrit les dispositifs expérimentaux et matériaux utilisés pour étudier l'effet d'un champ magnétique statique sur la condensation de la vapeur d'eau. Divers montages ont été conçus pour comparer le comportement de la vapeur avec ou sans champ magnétique, en maintenant constants les principaux paramètres physiques afin de garantir la fiabilité des résultats.

3.2 Matériel

Les expériences ont été menées à l'aide d'un ensemble de matériels de laboratoire, comprenant notamment des dispositifs de chauffage et de condensation, ainsi que différentes sources de champ magnétique. Le matériel utilisé au cours des expériences est présenté dans le tableau ci-dessous (Tableau 3.1).

Tableau 3.1. Verrerie et dispositifs

Verrerie	Dispositifs
➤ Ballon à fond rond de 1000 mL ➤ Colonne de distillation ➤ Petite colonne de distillation graduée ➤ Bouteille de lavage de gaz ➤ Condenseur de Liebig ➤ Éprouvettes graduées de 50 mL, 100 mL et 500 mL	➤ Cocotte d'une capacité de 5000 mL ➤ Réchaud à gaz ➤ Chauffe-ballon électrique ➤ Serpentin en cuivre détérioré et corrodé ➤ Serpentin en cuivre en bon état ➤ Tuyaux en cuivre et en PVC de 1.2 cm de diamètre ➤ Aimants permanents en néodyme-fer-bore (NdFeB) (119-229 mT) ➤ Aimant rectangulaire d'intensité de 117 mT

3.3 Montages expérimentaux

Les différents montages expérimentaux ont été conçus pour analyser l'effet d'un champ magnétique statique sur la condensation de la vapeur d'eau. Chaque configuration a été testée dans deux conditions : sans champ magnétique, puis avec champ magnétique, en plaçant des aimants de type et d'intensités variés sur certaines zones du système telles que le ballon, la colonne, la bouteille de lavage de gaz, la spirale ou le serpentín. Des figures accompagnées de descriptions précises illustrent les montages et expliquent le rôle de chaque composant. L'orientation du champ magnétique a été soigneusement définie : les aimants sont disposés de façon à diriger le champ du pôle Nord, situé à l'entrée de la vapeur, vers le pôle Sud, à la sortie, assurant une continuité le long du trajet de la vapeur.

❖ Montage de distillation N°1 : condensation avec une colonne de distillation simple

Le montage expérimental illustré par la figure 3.1 correspond à un système de distillation simple conçu pour condenser la vapeur d'eau. La mise en place du montage a été réalisée à l'aide d'un ballon à fond rond, positionné sur un chauffe-ballon électrique, dans lequel 500 mL d'eau ont été introduits. Lors du chauffage, la vapeur d'eau s'est formée et a été dirigée vers une colonne de distillation via un adaptateur coudé. Le distillat ainsi obtenu a été recueilli dans une éprouvette graduée de 100 mL, ce qui a permis la mesure précise de son volume. Cette configuration de base a servi de référence pour étudier l'impact de paramètres externes, tels qu'un champ magnétique, sur le processus de condensation.



Figure 3.1. Montage de distillation N°1. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Colonne de distillation, 4 Pince, 5 Support, 6 Éprouvette graduée (100 mL)

Afin d'évaluer l'influence d'un champ magnétique sur le processus de condensation de la vapeur d'eau figure, six aimants permanents en néodyme-fer-bore (NdFeB) ont été intégrés au montage expérimental initial, (figure 3.2). Deux aimants circulaires identiques, ($\varnothing$ 6 cm, 220 mT), ont été fixés sur les parois externes du ballon à fond rond contenant l'eau. Quatre autres aimants circulaires ont été disposés sur la colonne de distillation : deux de ($\varnothing$ 7,5 cm, 229 mT), et deux plus petits de ($\varnothing$ 5 cm, 119 mT), également fixés sur la colonne. Cette configuration a visé à soumettre la vapeur d'eau, issue du ballon et circulant dans la colonne de distillation, à un champ magnétique statique, dont l'intensité et la distribution ont été définies par la position et les caractéristiques des aimants.



Figure 3.2. Montage de distillation N°1 soumis à un champ magnétique. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Colonne de distillation, 4 Aimant circulaire ($\varnothing$ 7,5 cm, 229 mT), 5 Aimant circulaire ($\varnothing$ 5 cm, 119 mT), 6 Éprouvette graduée (100 mL), 7 Support

❖ Montage de distillation N°2 : Condensation avec petite colonne de distillation graduée.

Le deuxième montage expérimental présente une configuration identique à celle du montage initial, à l'exception de la substitution de la colonne de distillation par une colonne graduée plus petite (figure 3.3). Cette modification permet un suivi visuel plus précis du trajet de la vapeur et de son passage vers la zone de condensation. Le dispositif repose sur le principe classique de la distillation : un ballon à fond rond, contenant 500 mL d'eau du robinet, a été chauffé à l'aide d'un chauffe-ballon électrique. La vapeur produite a traversé la colonne graduée, puis s'est condensée dans la partie inclinée du système, avant d'être recueillie dans une éprouvette graduée de 50 mL pour la mesure du volume d'eau distillée.



Figure 3.3. Montage de distillation N°2. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Colonne graduée, 4 Pince, 5 Support, 6 Éprouvette graduée (50 mL)

Pour l'étude sous champ magnétique, une configuration spécifique d'aimant permanent a été mise en place afin d'exposer la vapeur d'eau à un champ magnétique statique durant son trajet à travers le dispositif (figure 3.4). Deux aimants circulaires identiques, d'un diamètre de 6 cm et présentant une induction magnétique de 220 mT en surface, ont été positionnés sur les faces externes du ballon à fond rond. Un troisième aimant circulaire ($\varnothing$ 7,5 cm, 229 mT), a été placé à l'interface reliant le ballon et la colonne de distillation. Enfin, un aimant rectangulaire de dimensions 15 cm par 10 cm, générant une induction de 117 mT, a été fixé sur la surface externe de la colonne graduée. Cette configuration spécifique a visé à induire un champ magnétique tout au long du parcours de la vapeur, depuis sa génération dans le ballon jusqu'à sa condensation et sa collecte dans la colonne graduée.



Figure 3.4. Montage de distillation N°2 soumis à un champ magnétique. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Aimant circulaire ($\varnothing$ 6 cm, 220 mT), 4 Pince, 5 Aimant circulaire ($\varnothing$ 7,5 cm, 229 mT), 6 Colonne graduée, 7 Aimant rectangulaire (15 cm $\times$ 10 cm, 117 mT), 8 Support, 9 Éprouvette graduée (50 mL)

❖ Montage de distillation N°3 : Condensation avec colonne de distillation simple et bouteille de lavage de gaz

Ce troisième montage expérimental a également été conçu pour réaliser une distillation simple de l'eau du robinet (figure 3.5). Un ballon à fond rond, contenant l'eau du robinet, a été placé sur un chauffe-ballon électrique qui a fourni l'énergie thermique nécessaire à sa vaporisation. La vapeur d'eau produite s'est élevée et s'est dirigée ensuite vers un condenseur de Liebig incliné, servant de colonne de condensation. L'eau distillée ainsi obtenue s'est écoulée et a été recueillie dans une bouteille de lavage de gaz, utilisée ici à la fois comme collecteur du distillat et prolongement du condenseur. Une petite quantité résiduelle de vapeur a poursuivi son chemin à travers la sortie de la bouteille de lavage de gaz, pour être finalement condensée et collectée goutte à goutte dans une éprouvette graduée de 50 mL. L'ensemble du dispositif a été maintenu stable grâce à un support et des pinces, assurant la continuité du processus de séparation par distillation de l'eau du robinet.

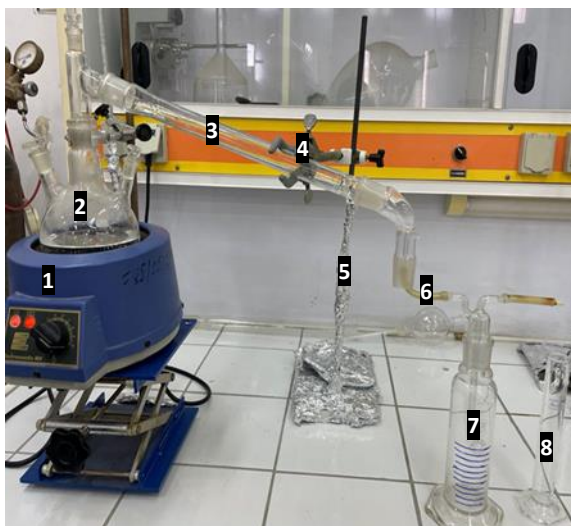


Figure 3.5. Montage de distillation N°3. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Ballon à fond rond, 3 Condenseur de Liebig, 4 Pince, 5 Support, 6 Tuyau en PVC, 7 Bouteille de lavage de gaz, 8 Éprouvette graduée (50 mL)

Dans cette configuration expérimentale illustrée par la figure 3.6, six aimants permanents ont été disposés de manière précise afin de soumettre différentes zones du système de distillation à un champ magnétique. Deux aimants circulaires ($\varnothing$ 6 cm, 220 mT) ont été fixés de part et d'autre du ballon à fond rond, ciblant la phase initiale de vaporisation. Au niveau de la colonne de distillation, deux autres aimants ont été positionnés : un aimant rectangulaire (15 cm $\times$ 10 cm, 117 mT) affectant la zone intermédiaire, et un aimant circulaire ($\varnothing$ 7,5 cm, 292 mT) placé à son extrémité. Un troisième aimant rectangulaire (15 cm $\times$ 10 cm, 117 mT) a été fixé verticalement sur la bouteille de lavage de gaz, afin d'influencer directement la condensation. Enfin, un aimant circulaire ($\varnothing$ 5 cm, 119 mT) a été installé sur le tuyau en PVC reliant la sortie de la bouteille de lavage de gaz, ciblant la dernière portion de vapeur, dont une partie s'est condensée dans cette section avant d'être recueillie dans une éprouvette graduée.

Cette configuration a permis d'évaluer l'effet du champ magnétique sur les différentes étapes du processus de distillation, en particulier sur la dynamique de la vapeur et sur l'efficacité de la condensation.

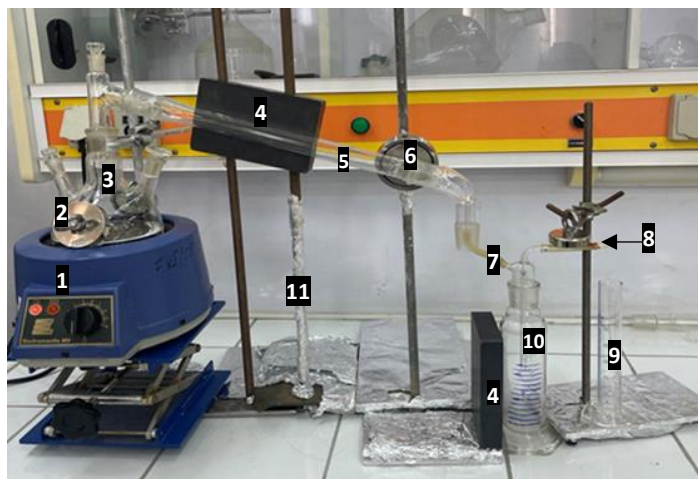


Figure 3.6. Montage de distillation N°3 soumis à un champ magnétique. 1 Chauffe-ballon électrique, 2 Aimant circulaire ($\varnothing$ 6 cm, 220mT), 3 Ballon à fond rond, 4 Aimant rectangulaire (15 cm $\times$ 10 cm, 117 mT), 5 Condenseur de Liebig, 6 Aimant circulaire ($\varnothing$ 7,5 cm, 292 mT), 7 Tuyau en PVC, 8 Aimant circulaire ($\varnothing$ 5 cm, 119 mT), 9 Éprouvette graduée (50 mL), 10 Bouteille de lavage de gaz, 11 Support.

❖ Montage de distillation N°4 : Condensation avec un serpentín plat.

Dans le quatrième montage expérimental, une cocotte de 5000 mL contenant 3000 mL d'eau a été chauffée à l'aide d'un réchaud à gaz jusqu'à ébullition. La vapeur circule à l'intérieur du serpentín plat en entrant par le tube extérieur et en suivant une trajectoire en spirale jusqu'au centre, où elle ressort. L'eau condensée a ensuite été recueillie dans une éprouvette graduée de 500 mL placée à la sortie (figure 3.7).

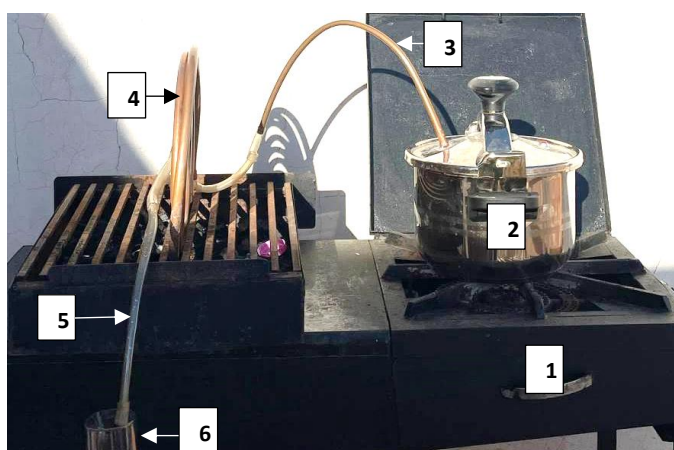


Figure 3.7. Montage de distillation N°4 équipé d'une spirale en cuivre. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Spirale en cuivre, 5 Tuyau en PVC, 6 Éprouvette graduée (500 mL).

Dans le cadre de l'étude comparative, deux aimants circulaires de 7,5 cm de diamètre et d'une intensité magnétique de 292 mT ont été employés. Ces aimants ont été positionnés de manière opposée, l'un placé à l'entrée et l'autre à l'extrémité opposée du serpentin plat (figure 3.8).

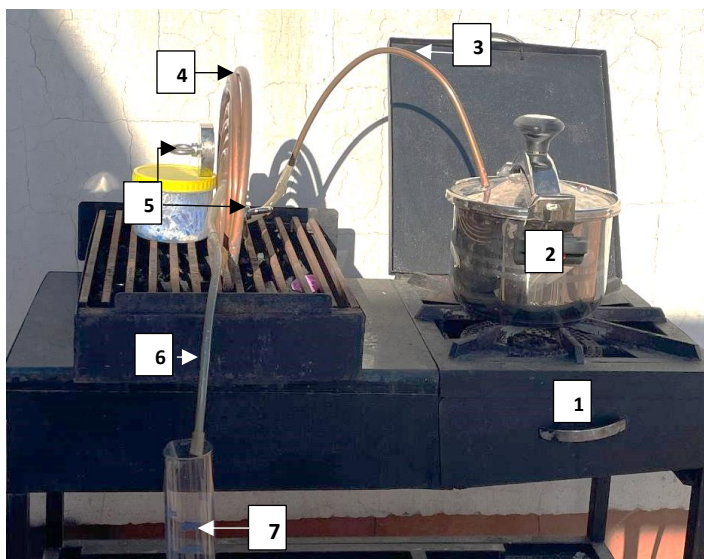


Figure 3.8. Montage de distillation N°4 équipé d'une spirale en cuivre exposée à un champ magnétique. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Spirale en cuivre, 5 Aimant ($\varnothing$ 7,5 cm, 229 mT), 6 Tuyau en PVC, 7 Éprouvette graduée (500 mL)

❖ Montage de distillation N°5 : Condensation avec un serpentin rectangulaire.

Ce cinquième montage expérimental repose sur l'emploi d'une cocotte d'une capacité de 5000 mL, remplie avec 3000 mL d'eau du robinet. Le chauffage a été assuré par un réchaud à gaz jusqu'à l'atteinte de l'ébullition. La vapeur produite a ensuite circulé à travers un tuyau en cuivre vers un serpentin également en cuivre, en bon état, où elle s'est condensée progressivement au contact des parois du serpentin. L'eau condensée a été collectée dans une éprouvette graduée de 500 mL placée à l'extrémité du montage. Ce système de condensation, fondé sur l'utilisation d'un serpentin en cuivre, a été conçu pour assurer une condensation efficace de la vapeur générée par la cocotte. Il a également permis l'application d'un champ magnétique ciblé au niveau du serpentin, en vue d'étudier son influence sur le processus de condensation (figure 3.9).

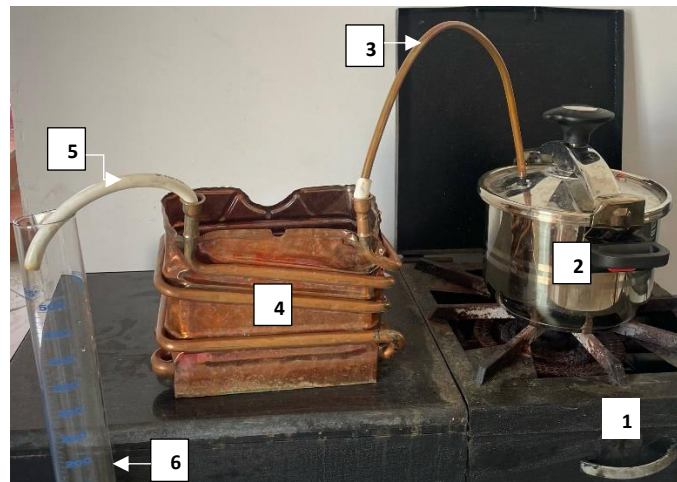


Figure 3.9. Montage de distillation N° 5 équipé d'un serpentín rectangulaire. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín rectangulaire, 5 Tuyau de gaz, 6 Éprouvette graduée (500 mL)

Dans ce montage expérimental (figure 3.10), deux essais distincts ont été réalisés afin d'évaluer l'effet d'un champ magnétique statique sur l'efficacité du processus de condensation au sein du serpentín en cuivre.

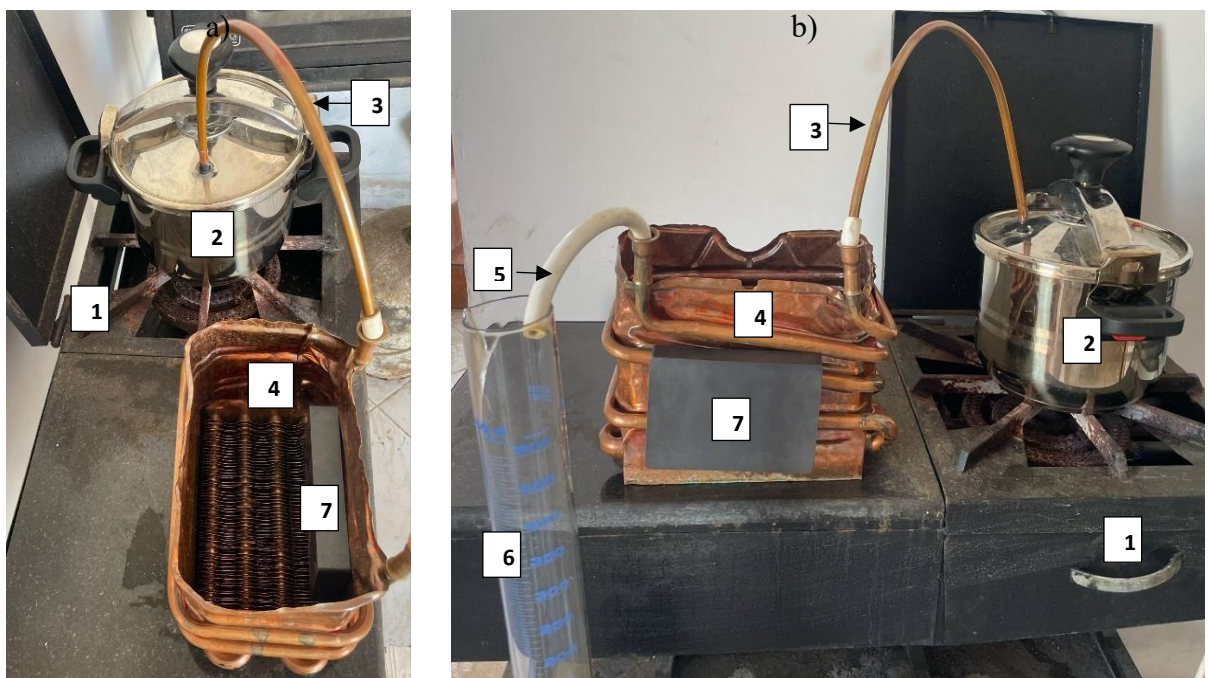


Figure 3.10. Montage de distillation N° 5 équipé d'un serpentín rectangulaire exposé à un champ magnétique a) essai 1 et b) essai 2 avec champ magnétique. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín rectangulaire, 5 Tuyau de gaz, 6 Éprouvette graduée (500 mL), 7 Aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT)

Lors du premier essai (a), un aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT) a été inséré à l'intérieur du serpentin, en contact direct avec la paroi interne, de manière à exposer la zone de condensation à un champ magnétique constant. Dans le deuxième essai (b), deux aimants rectangulaires identiques (15 cm × 10 cm, 117 mT) chacun ont été utilisés simultanément : le premier a été positionné à l'intérieur du serpentin, comme dans l'essai précédent, et le second a été placé à l'extérieur, en vis-à-vis du premier, afin d'intensifier le champ magnétique appliqué sur la zone ciblée. Ces configurations ont eu pour objectif d'analyser l'influence de la présence et de l'intensité du champ magnétique sur la cinétique de condensation de la vapeur d'eau.

❖ Montage N°6 : Condensation avec un serpentin rectangulaire en cuivre corrodé.

Dans le sixième montage expérimental, une cocotte de 5000 mL contenant 3000 mL d'eau a été chauffée à l'aide d'un réchaud à gaz jusqu'à ébullition. La vapeur produite a été dirigée à travers un tuyau en cuivre vers un serpentin en cuivre corrodé, où elle s'est partiellement condensée.

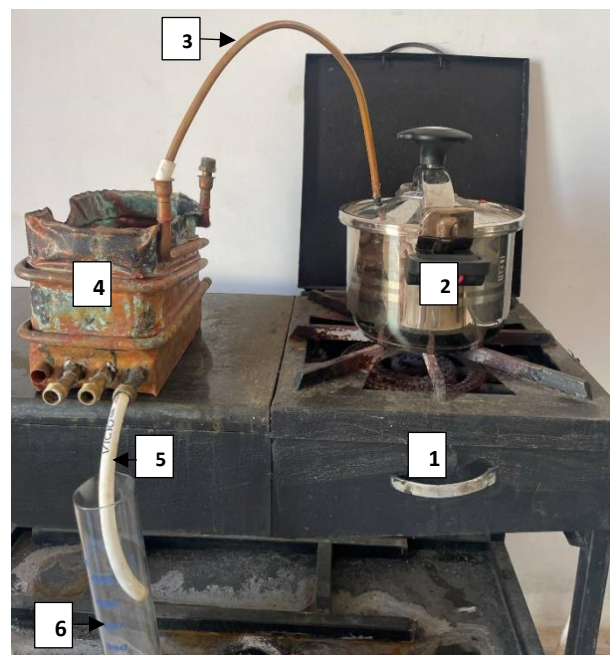


Figure 3.21. Montage de distillation N° 6 équipé d'un serpentin rectangulaire en cuivre corrodé. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentin en cuivre corrodé, 5 Tuyau de gaz, 6 Éprouvette graduée (500 mL)

L'eau condensée a ensuite été récupérée dans une éprouvette graduée de 500 mL placée en sortie. Cette configuration repose sur un serpentín en cuivre détérioré et corrodé de longueur réduite, limitant ainsi le parcours de la vapeur. Cette modification a été réalisée afin d'étudier son influence sur l'efficacité du processus, ce qui en fait un cas pertinent pour une étude comparative (figure 3.11).

Dans cette configuration (figure 3.12), un seul aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT) est utilisé. Il est positionné à l'intérieur du serpentín, directement sur le passage de la vapeur, afin d'appliquer un champ magnétique ciblé sur la zone de condensation.



Figure 3.32. Montage de distillation N°6 équipé d'un serpentín rectangulaire en cuivre corrodé exposé à un champ magnétique. 1 Réchaud à gaz, 2 Cocotte, 3 Tuyau en cuivre, 4 Serpentín en cuivre corrodé, 5 Aimant rectangulaire (15 cm × 10 cm, 117 mT)

❖ Montage N°7 : Condensation par couplage de deux serpentíns différents.

Dans le septième montage expérimental, une cocotte d'une capacité de 5000 mL, contenant 3000 mL d'eau, a été chauffée à l'aide d'un réchaud à gaz jusqu'à ébullition. La vapeur générée a ensuite circulé à l'intérieur du serpentín du montage 4, lequel a été relié à un second serpentín, celui utilisé précédemment dans le montage 5 par un tube en PVC de deux mètres. Par la suite, l'influence d'un champ magnétique sur ce système a été étudiée en utilisant les mêmes conditions expérimentales que celles des montages 4 et 5. L'eau condensée a été recueillie dans une éprouvette graduée de 500 mL placée à la sortie du système

3.4 Démarche expérimentale

Dans cette partie, les protocoles expérimentaux sont décrits et adaptés aux sept montages expérimentaux utilisés dans l'étude. Chaque protocole est présenté de manière à souligner les spécificités techniques de chaque configuration, telles que la disposition des composants, les matériaux utilisés, et les paramètres opérationnels associés.

Les observations effectuées au cours de chaque expérience sont également détaillées, notamment l'apparition de la première goutte de distillat, la durée totale de l'expérience, et le volume d'eau distillée recueilli. Ces éléments sont essentiels pour évaluer la performance de chaque montage dans des conditions spécifiques.

3.5 Mesure des paramètres opératoires

Après l'évaluation de plusieurs configurations expérimentales, le montage ayant permis la plus grande production d'eau distillée a été retenu. Deux grandeurs physiques ont été particulièrement suivies : la température et la pression. Les mesures de température ont été effectuées à l'entrée et à la sortie du système à l'aide de thermomètres, tandis que la pression a été mesurée aux mêmes points à l'aide de manomètres. Ce suivi des deux paramètres a permis de mieux comprendre leur influence sur l'efficacité du processus de condensation étudié.

3.6. Analyse des Performances : Rendement et Consommation Énergétique

La performance du système expérimental est évaluée par plusieurs calculs réalisés à partir des données mesurées. Parmi les différentes formules utilisées dans cette étude, celle du rendement de distillation est présentée ci-dessous :

$$\text{Rendement de distillation (\%)} = \left(\frac{\text{Volume de distillat obtenu}}{\text{Volume théorique de distillat}} \right) 100 \quad (3.1)$$

Par ailleurs, l'expression ci-dessous a servi à déterminer l'amélioration relative de la production d'eau distillée

$$\text{Pourcentage d'amélioration (\%)} = \left(\frac{V_a - V_s}{V_s} \right) 100 \quad (3.2)$$

Ou :

V_a : Volume de distillat obtenu après amélioration du système

V_s : Volume de distillat obtenu dans les conditions initiales

La consommation spécifique d'énergie sensible (SEC sensible) correspond à la quantité d'énergie thermique sensible échangée par un kilogramme de substance lors d'un changement de température. Elle est définie par la formule suivante [73] :

$$SEC_{Sensible} (kJ / kg) = \left(\frac{\text{Chaleur sensible échangée par le distillat}}{\text{Masse du distillat produit}} \right) \quad (3.3)$$

$$SEC_{Sensible} (kJ / Kg) = \left(\frac{Q_{sensible}}{m_{distillat}} \right) \quad (3.4)$$

L'efficacité thermique est une mesure de la performance d'un système thermique à convertir l'énergie thermique fournie en énergie thermique utile, ou à utiliser efficacement la chaleur disponible. Elle représente la proportion de la chaleur totale utile par rapport à la chaleur totale fournie [74] :

$$\eta_{th} (\%) = \left(\frac{\text{Chaleur Utile}}{\text{Chaleur Totale Fournie}} \right) 100 \quad (3.5)$$

$$\eta_{th} (\%) = \left(\frac{Q_{latente}}{Q_{latente} + Q_{sensible}} \right) 100 \quad (3.6)$$

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse comparative des résultats obtenus pour les différents montages expérimentaux, testés à la fois en présence et en l'absence de champ magnétique. Les données recueillies permettent d'évaluer l'impact du champ magnétique sur les performances de condensation, en fonction des configurations étudiées. Une attention particulière est portée sur les variations du taux de condensation et de la quantité d'eau récupérée, ainsi que sur les différences observées entre les matériaux utilisés. L'interprétation des résultats met en lumière les mécanismes physiques potentiellement modifiés par l'application d'un champ magnétique, tout en soulignant les limites et les incertitudes liées aux conditions expérimentales.

4.2 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 1

L'effet du champ magnétique a été étudié à travers deux essais comparatifs de distillation, l'un réalisé en présence de champ magnétique et l'autre en son absence. Les résultats sont présentés dans la figure 4.1, qui illustre l'évolution du volume de distillat en fonction du temps pour les deux configurations. L'analyse comparative des distillations avec et sans champ magnétique montre que la première goutte apparaît à 27 minutes avec champ magnétique, alors qu'elle se manifeste à 30 minutes sans champ magnétique, ce qui indique un déclenchement du processus légèrement plus rapide en présence de champ magnétique.

Entre 30 et 60 minutes, les volumes d'eau distillée évoluent de manière similaire dans les deux cas, avec une légère avance pour la distillation avec champ magnétique jusqu'à environ 50 minutes. Cependant, à partir de 60 minutes, la courbe de la distillation avec champ magnétique commence à dépasser celle sans champ magnétique, bien que de manière modérée.

À 90 minutes, la distillation avec champ magnétique atteint un volume de 127 mL, contre 120 mL sans champ magnétique. Cette différence de 7 mL, soit environ 6 %, reste relativement faible. Ainsi, bien que le champ magnétique semble avoir un effet légèrement positif sur le rendement final, cette influence n'est pas suffisamment significative dans le cadre de cette expérience. On note également une légère augmentation du débit moyen de la vapeur d'eau sous l'effet du champ magnétique, passant de $2,22 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ à $2,35 \times 10^{-8}$

m³/s. On peut donc conclure que la présence du champ magnétique n'améliore pas sensiblement le processus, puisque les deux méthodes expérimentales donnent des résultats très proches sur une durée de 90 minutes.

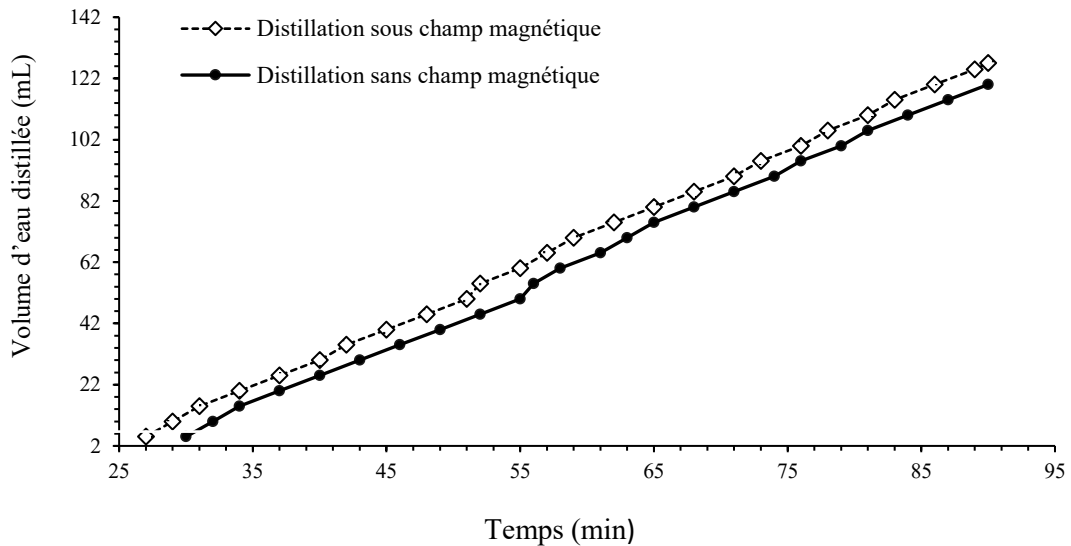


Figure 4.1. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°01)

4.3 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 2

La figure 4.2 représente l'évolution du volume d'eau distillée au fil du temps pour les deux configurations étudiées, à savoir avec champ magnétique et sans champ magnétique. La courbe de distillation sans champ magnétique montre qu'à 25 minutes, le volume d'eau distillée collecté est d'environ 5 mL sans champ magnétique, tandis qu'en présence d'un champ magnétique, ce volume atteint environ 10 mL, suggérant une amélioration du rendement dès les premières phases du processus. À 55 minutes, la différence devient plus significative, avec un volume de 65 mL obtenu sans champ magnétique et de 71 mL avec champ magnétique. À la fin de l'expérience, à 90 minutes, les volumes totaux atteignent respectivement 80 mL sans champ magnétique et 88 mL avec champ magnétique, soit un écart de 8 mL. Cette différence correspond à une augmentation d'environ 10 % du volume distillé en présence du champ magnétique par rapport à l'expérience sans champ magnétique (figure 4.2).

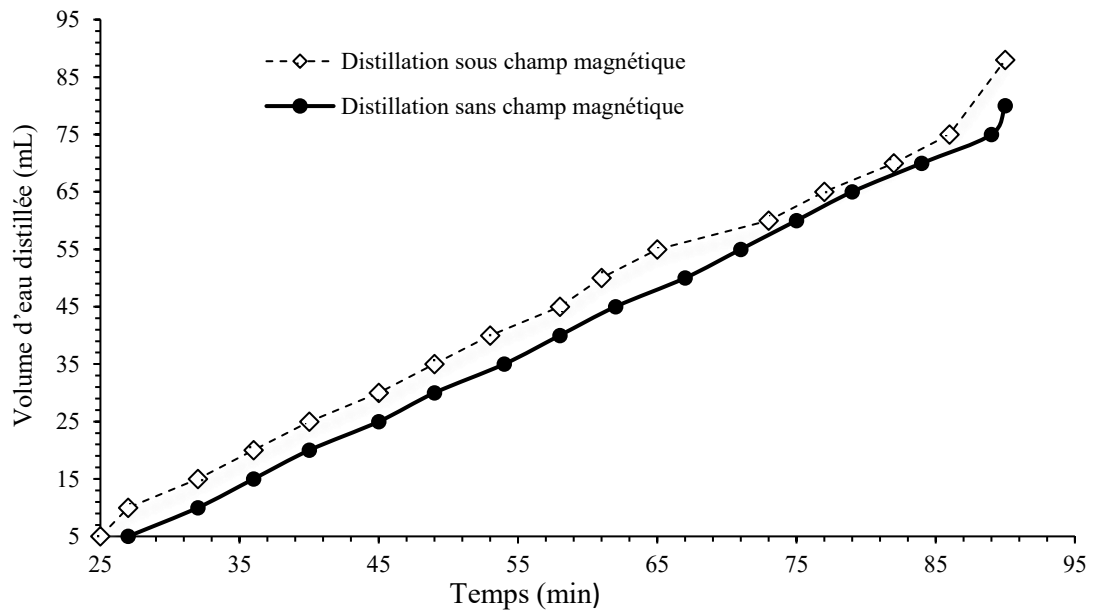


Figure 4.2. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N° 02)

On observe également que le débit moyen est passé de $1,47 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ en l'absence de champ magnétique à $1,62 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ lorsqu'un champ magnétique est appliqué. Ces résultats révèlent un effet modéré mais constant du champ magnétique sur le processus de distillation. Cela suggère une amélioration de la cinétique d'évaporation, probablement due à des modifications des propriétés physico-chimiques de l'eau ou à une interaction favorable avec les transferts thermiques.

4.4 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 3

Les résultats du montage expérimental n° 3, présentés dans la figure 4.3, révèlent qu'aucune amélioration significative de la distillation n'est observée en présence du champ magnétique durant la première heure du processus. Cependant, une augmentation de la production d'eau distillée est constatée à partir de 63 minutes. L'analyse comparative des volumes produits révèle qu'un volume initial de 90 mL passe à 187 mL d'eau distillée sous l'effet du champ magnétique, comparativement à 165 mL en l'absence de champ, sur une période identique. Cette différence correspond à une amélioration de 13,33 % attribuée à la présence du champ magnétique. , tandis que le débit moyen augmente légèrement, passant de $3,10 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ à $3,33 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$.

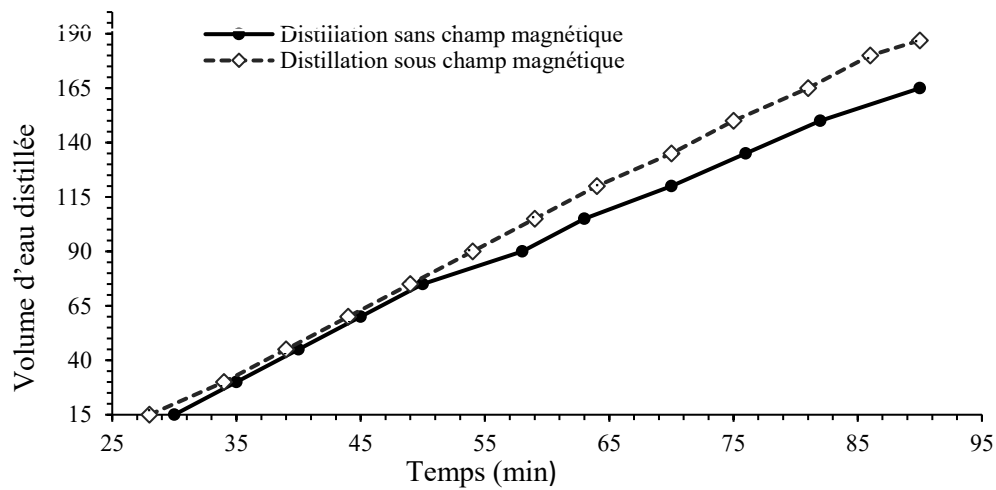


Figure 4.3. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N° 3)

L'amélioration observée est également attribuée à l'effet du champ magnétique sur la vaporisation de l'eau. Cette hypothèse est soutenue par les recherches de Guo et al. (2012) et Wang et al. (2018), qui ont montré comment les champs magnétiques modifient les propriétés thermodynamiques de l'eau, telles que la chaleur spécifique et la vitesse d'évaporation. Guo a démontré qu'un champ magnétique de 8,69 T favorise l'évaporation en microgravité en affaiblissant les liaisons hydrogène et en créant une convection magnétique. Similairement, Wang a observé une augmentation de 39 % du taux d'évaporation à 300 mT, avec une diminution simultanée du point d'ébullition [64, 61]. De plus, les travaux de Seyfi et al. (2017) et Dueñas et al. (2021) confirment que les champs magnétiques peuvent fragmenter les agrégats moléculaires d'eau et augmenter la mobilité moléculaire à l'interface air-eau, accélérant ainsi l'évaporation. Seyfi et al. (2017) ont relevé une augmentation de 18,3 % du taux d'évaporation de l'eau déionisée sous un champ magnétique statique perpendiculaire, attribuée à une modification des liaisons intermoléculaires [58]. Enfin, Dueñas et al. (2021) ont constaté une hausse de la production de vapeur allant jusqu'à 20 % à basse température, expliquée par la fragmentation des clusters moléculaires d'eau sous champ magnétique [59].

4.5 Effet du champ magnétique sur le condenseur du montage N° 4

La figure 4.6 présente les résultats d'une expérimentation portant sur la distillation de l'eau du robinet, réalisée avec une spirale en cuivre, en présence de champ magnétique et en absence de celui-ci. Le volume recueilli après 12 minutes en présence du champ magnétique correspond à celui obtenu après 17 minutes en son absence. Une évolution comparable du volume distillé est observée entre 29 et 34 minutes.

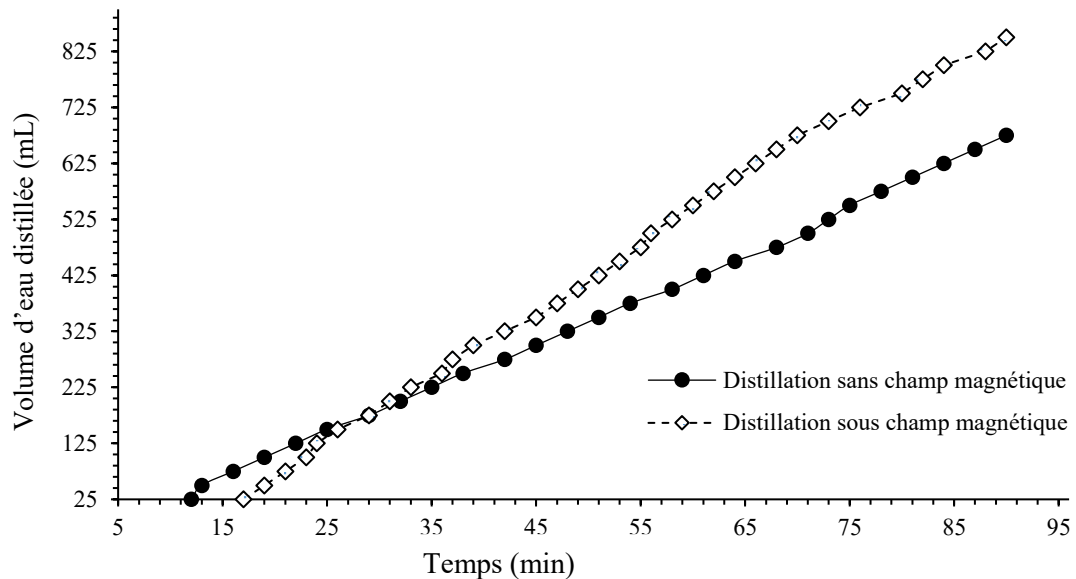


Figure 4.4. Evolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°4).

Au bout de 30 minutes, la quantité d'eau distillée passe de 200 mL à 750 mL avec champ magnétique, alors qu'elle n'atteint que 600 mL sans champ magnétique. Lorsque la distillation est achevée, les volumes totaux collectés s'élèvent à 850 mL en présence d'un champ magnétique, contre 675 mL en son absence. Cette différence met en évidence une amélioration du rendement, estimée à 25,93 %, grâce à l'application du champ magnétique.

Parallèlement, le débit moyen connaît une légère augmentation, passant de $1,25 \times 10^{-7}$ m³/s à $1,57 \times 10^{-7}$ m³/s. Il est important de noter que la pression mesurée à l'entrée et à la sortie du condenseur correspond à la pression atmosphérique, ce qui indique que le système est ouvert.

4.6 Évolution de la température dans le Montage N°4

L'évolution de la température en présence de champ magnétique est présentée dans la figure 4.5. On observe que la température à la sortie est initialement supérieure à celle de l'entrée pendant environ 30 minutes ; ensuite, elle décroît progressivement jusqu'à atteindre

environ 80 °C. Par la suite, une augmentation est constatée, atteignant 90 °C à 75 minutes, probablement en raison d'une faible condensation, puis une nouvelle diminution est enregistrée aux alentours de la 80^e minute. En parallèle, la température d'entrée augmente progressivement jusqu'à 88 °C, avant de se stabiliser autour de 96 °C.

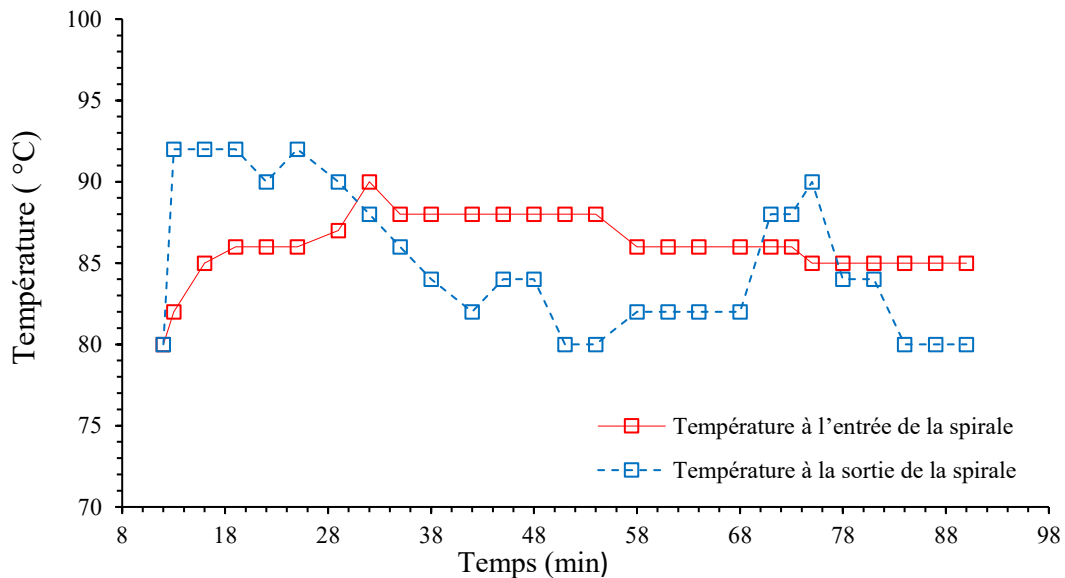


Figure 4.5. Évolution de la température en fonction du temps en absence de champ magnétique (Montage N°4)

Le suivi de la température en fonction du temps en présence d'un champ magnétique est illustré par la figure 4.6. Les résultats indiquent que la température de sortie est initialement supérieure à celle d'entrée, avec une variation comprise entre 92 °C et 82 °C. Par la suite, la température de sortie diminue progressivement jusqu'à atteindre 80 °C, sans toutefois se stabiliser complètement. Des fluctuations sont observées entre 80 °C et 82 °C sur une période allant de 38 minutes à 90 minutes. En comparaison, la température d'entrée reste relativement stable, oscillant légèrement entre 84 °C et 86 °C. L'application d'un champ magnétique dans le système de distillation induit une réduction de 16,3 % de la consommation spécifique d'énergie sensible, celle-ci passant de 20 kJ/kg à 16,74 kJ/kg. Ce gain d'efficacité est particulièrement important pour les processus industriels, où il peut générer des avantages économiques et écologiques substantiels. Une efficacité thermique de 99 %, observée pour les deux configurations et en l'absence de fluide de refroidissement externe, suggère un transfert quasi total de l'énergie thermique issue de la vapeur vers le processus, avec des pertes négligeables vers l'environnement.

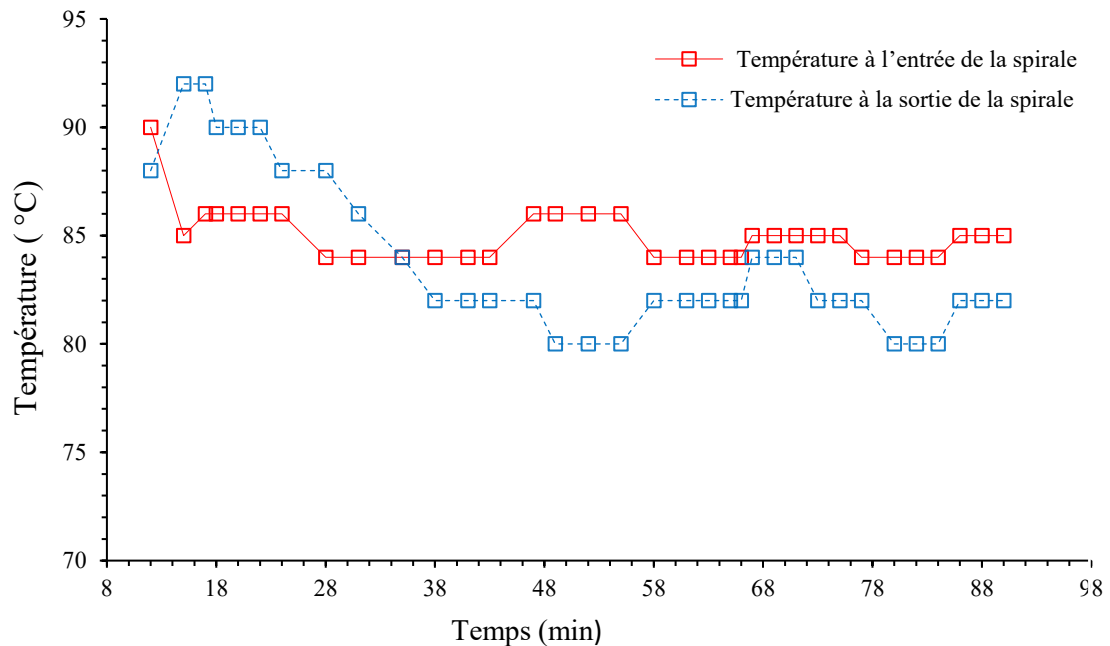


Figure 4.6. Évolution de la température en fonction du temps en présence de champ magnétique (Montage N°4)

4.7 Effet de l'orientation du champ magnétique sur le condenseur du Montage N°5

La figure 4.7 illustre l'évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps pour trois configurations expérimentales correspondant à différentes orientations du champ magnétique appliqué pendant le processus de distillation (Montage N°5). Ces configurations ont été testées en l'absence de champ magnétique, ainsi qu'avec l'application d'un champ magnétique orienté horizontalement ou verticalement. La pression mesurée à l'entrée et à la sortie du condenseur correspond à la pression atmosphérique, en raison du fait que le système est ouvert.

Les résultats expérimentaux mettent en évidence l'impact significatif de l'application d'un champ magnétique sur la cinétique de distillation. En l'absence de champ magnétique, un volume d'environ 25 mL est atteint après 28 minutes de fonctionnement, tandis que le temps nécessaire pour atteindre cette quantité est considérablement réduit sous l'effet du champ magnétique, passant spécifiquement à 14 minutes avec le champ horizontal et à 20 minutes avec le champ vertical, ce qui révèle une nette accélération du processus de distillation.

Après 30 minutes, les volumes de distillat s'élèvent respectivement à 250 mL sous champ magnétique horizontal et à 150 mL sous champ magnétique vertical, tandis qu'un volume nettement plus faible est observé sans application de champ magnétique.

À 50 minutes, les volumes d'eau distillée atteignent respectivement 250 mL en l'absence de champ magnétique, 475 mL en présence d'un champ magnétique horizontal et 375 mL sous l'effet d'un champ magnétique vertical, confirmant l'influence favorable du champ magnétique sur le rendement de distillation, particulièrement lorsque l'orientation est horizontale.

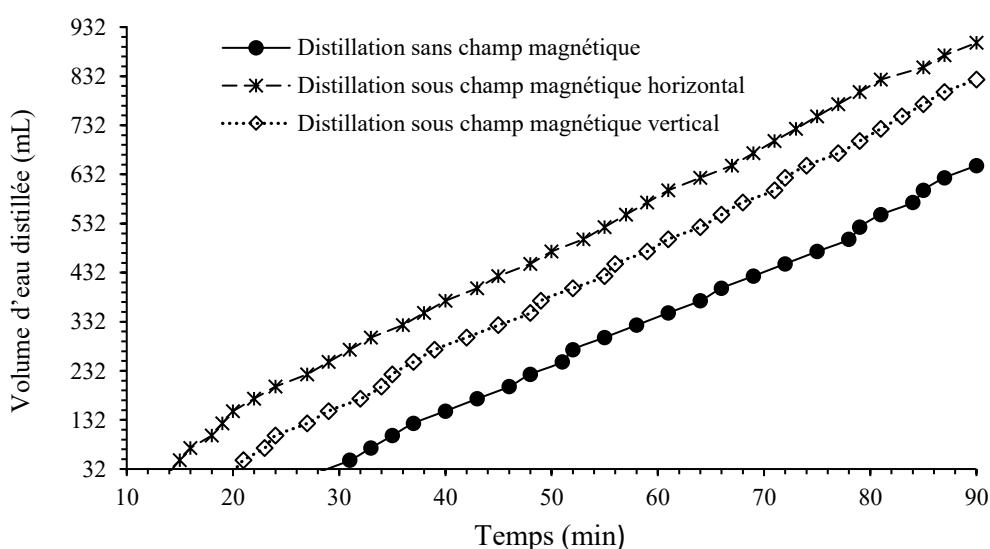


Figure 4.7. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps selon la direction du champ magnétique (Montage N° 5)

À la fin de l'expérimentation, soit après 90 minutes, les volumes d'eau distillée recueillis sont respectivement de 650 mL en l'absence de champ magnétique, 900 mL avec un champ magnétique orienté horizontalement, et 825 mL avec un champ magnétique orienté verticalement. Cela correspond à une augmentation de 38,5 % pour le champ magnétique horizontal et de 26,9 % pour le champ magnétique vertical. Ces résultats indiquent que l'utilisation d'un champ magnétique, quelle que soit son orientation, favorise une production accrue d'eau distillée par rapport à une distillation conventionnelle. De plus, la comparaison entre les deux orientations du champ suggère une légère supériorité du champ magnétique horizontal en termes de rendement global sur la période étudiée.

Ces observations sont cohérentes avec les travaux de Khosravifar et al. (2021), qui ont démontré, à travers une modélisation numérique tridimensionnelle de la condensation de bulles sous l'effet d'un champ magnétique, une dépendance de l'influence magnétique à la taille des bulles et à l'orientation du champ. Leurs résultats montrent que, pour de petites bulles (1,008 mm), l'application d'un champ magnétique vertical ou horizontal améliore la condensation de manière équivalente. En revanche, pour des bulles de plus grand diamètre (4 mm), un champ magnétique horizontal s'est révélé plus efficace qu'un champ vertical, ce dernier pouvant même ralentir le processus de condensation en accélérant la migration des bulles vers des zones de basse pression [65].

Les débits moyens de la vapeur obtenue lors de l'expérience de distillation indiquent une influence notable du champ magnétique sur le processus. En l'absence de champ magnétique, le débit moyen est de $1,20 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$. Avec l'application d'un champ magnétique horizontal, ce débit augmente à $1,57 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, tandis qu'il atteint $1,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ sous l'effet d'un champ magnétique vertical. Ces résultats suggèrent que l'application d'un champ magnétique, quelle que soit son orientation, améliore le rendement de distillation, avec une efficacité légèrement supérieure observée pour l'orientation horizontale.

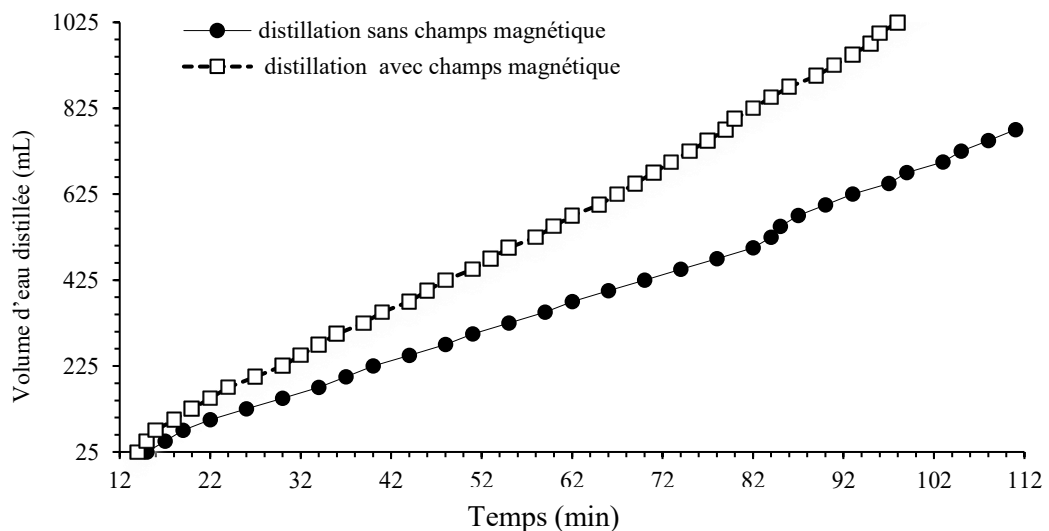


Figure 4.8. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°5)

Les résultats relatifs à l'évolution du volume d'eau distillée à partir de la distillation de 4 litres d'eau du robinet, en présence et en absence d'un champ magnétique, sont présentés dans la figure 4.8. Cette figure permet d'estimer le volume final obtenu dans chaque cas et d'évaluer l'amélioration apportée par le procédé de distillation sous un champ magnétique.

Elle montre qu'un volume de 500 mL est distillé en 55 minutes en présence du champ magnétique, tandis que seulement 325 mL sont obtenus dans les mêmes conditions sans champ magnétique. Par ailleurs, le volume total d'eau récupéré après cette période de distillation atteint 1100 mL lorsqu'un champ magnétique est appliqué, alors qu'il est limité à 775 mL en son absence (Figure 4.8).

Ces résultats démontrent clairement que l'application d'un champ magnétique améliore de manière significative l'efficacité de la distillation, avec une augmentation estimée à environ 41 %. Cette amélioration est notamment visible à travers le rendement de distillation, qui passe de 19,37% sans champ magnétique à 27,51 % en sa présence. Cette augmentation de l'efficacité est attribuée à une modification des propriétés physico-chimiques de l'eau, ce qui favorise une condensation plus efficace.

4.8 Évolution de la température dans le Montage N°5

La figure 4.9 décrit l'évolution de la température dans le Montage N°5 en l'absence de champ magnétique. Lorsque le volume d'eau distillée collecté atteint 25 mL, les températures relevées sont de 92 °C à l'entrée du serpentin et de 71 °C à la sortie. Le réchauffement progressif des parois en cuivre entraîne une montée en température à l'entrée, de 84 °C à 92 °C, avant de se stabiliser durant 52 minutes. Parallèlement, la température de sortie diminue progressivement de 79 °C à 77 °C, puis reste constante sur la même période.

La figure 4.10 présente l'évolution de la température dans le montage N°4 soumis à un champ magnétique horizontal. À 14 minutes, la température mesurée à l'entrée du serpentin est de 86 °C, tandis qu'elle atteint 81 °C à la sortie. Après 18 minutes de distillation, les températures enregistrées varient entre 95 °C à l'entrée et 70 °C à la sortie. Cette fluctuation pourrait être liée à l'influence du champ magnétique sur les mécanismes de transfert thermique dans le serpentin. Aux alentours de 84 minutes, les températures se stabilisent temporairement autour de 78 °C à l'entrée et de 75 °C à la sortie, mais cette stabilité ne persiste que durant environ 4 minutes.

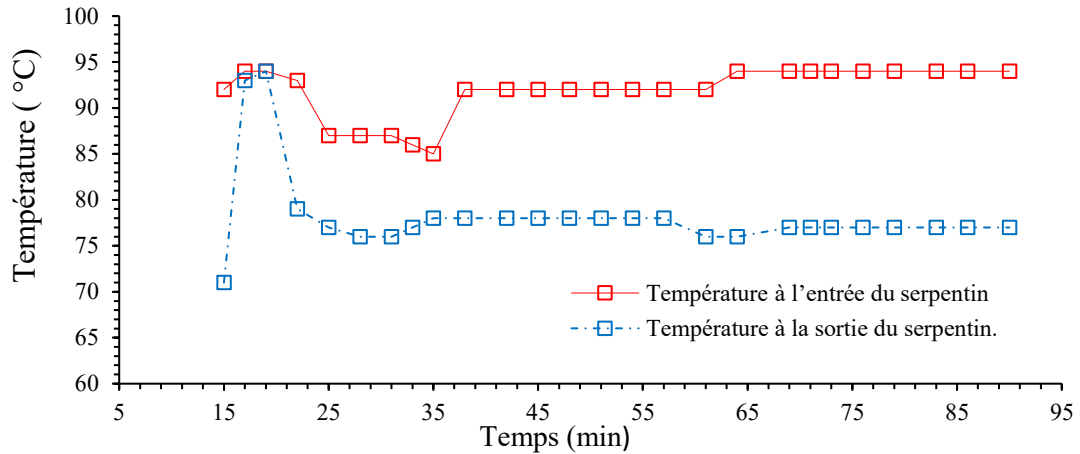


Figure 4.9. Évolution de la température en fonction du temps en absence de champ magnétique (Montage N°5)

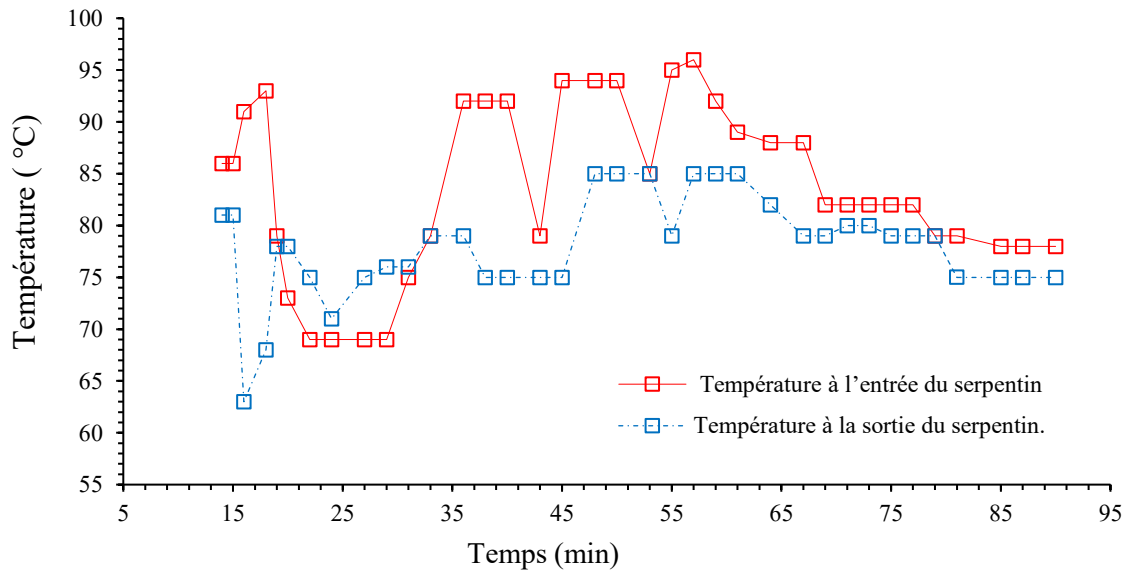


Figure 4. 10. Évolution de la température en fonction du temps en présence de champ magnétique (Montage N°5)

L'application d'un champ magnétique dans le système de distillation apporte une amélioration substantielle de l'efficacité énergétique. On observe une réduction de 25 % de la consommation spécifique d'énergie sensible, celle-ci passant de 62 kJ/kg à 46 kJ/kg. De plus, l'efficacité thermique globale du processus, déjà élevée à 97 % sans champ magnétique, s'améliore encore pour atteindre 98 % en sa présence. L'efficacité thermique du condenseur, très élevée, confirme que la chaleur est presque entièrement transférée, avec des pertes toujours négligeables.

4.9 Effet de l'état du serpentín sur le Montage N°6

La figure 4.11 montre l'évolution du volume d'eau distillée au cours du temps, en comparant les conditions avec et sans champ magnétique, utilisant un serpentín en cuivre corrodé. Les données indiquent que la première goutte d'eau distillée est collectée après 17 minutes sans champ magnétique, tandis qu'elle apparaît dès 11 minutes avec champ magnétique. Après 49 minutes de distillation, les volumes d'eau distillée collectés s'élèvent respectivement à 325 mL en absence de champ magnétique et à 375 mL en présence de champ magnétique. À la fin de l'expérience, après 87 minutes, les volumes atteignent respectivement 675 mL sans champ magnétique et 725 mL avec champ magnétique, indiquant une augmentation de 6,77 % liée à l'application du champ magnétique. De plus, le débit moyen passe de $1,25 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ en l'absence de champ magnétique à $1,34 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ sous l'effet du champ, indiquant une amélioration mesurable de l'efficacité du processus de distillation.

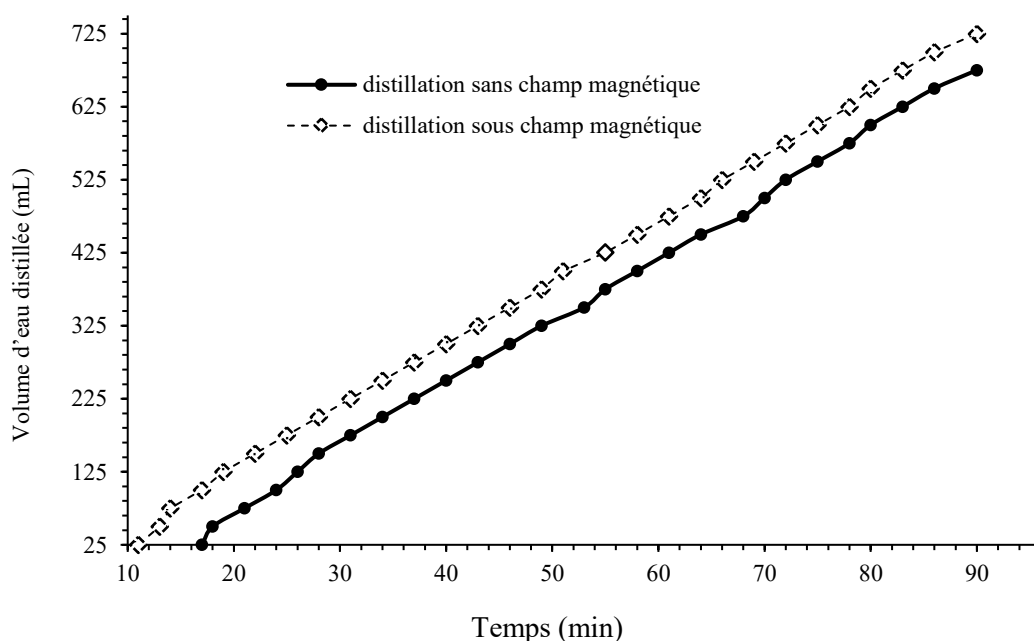


Figure 4.11. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps (Montage N°6)

D'après les données expérimentales, l'application d'un champ magnétique en présence d'un serpentín en cuivre corrodé n'améliore pas le rendement de la distillation de l'eau. Au contraire, elle semble entraîner une diminution du volume d'eau distillée collecté.

4.10 Effet du champ magnétique sur le couplage de deux serpentins différents

Les résultats du couplage de deux serpentins de configurations différentes, illustrés dans la Figure 4.12, révèlent qu'aucune amélioration significative du rendement de distillation de l'eau du robinet n'est observée sous l'effet d'un champ magnétique durant les 55 premières minutes du processus. Cependant, au-delà de cette période initiale de 55 minutes, une augmentation du volume d'eau distillée est mesurée en présence du champ magnétique, révélant un pourcentage d'amélioration variant entre 11 % et 31 %. Ces observations suggèrent que l'efficacité du couplage entre les deux serpentins est retardée. Cela est probablement attribuable à une longueur accrue du parcours entre les deux serpentins, ce qui prolonge le temps nécessaire à l'activation effective de l'influence du champ magnétique sur le processus.

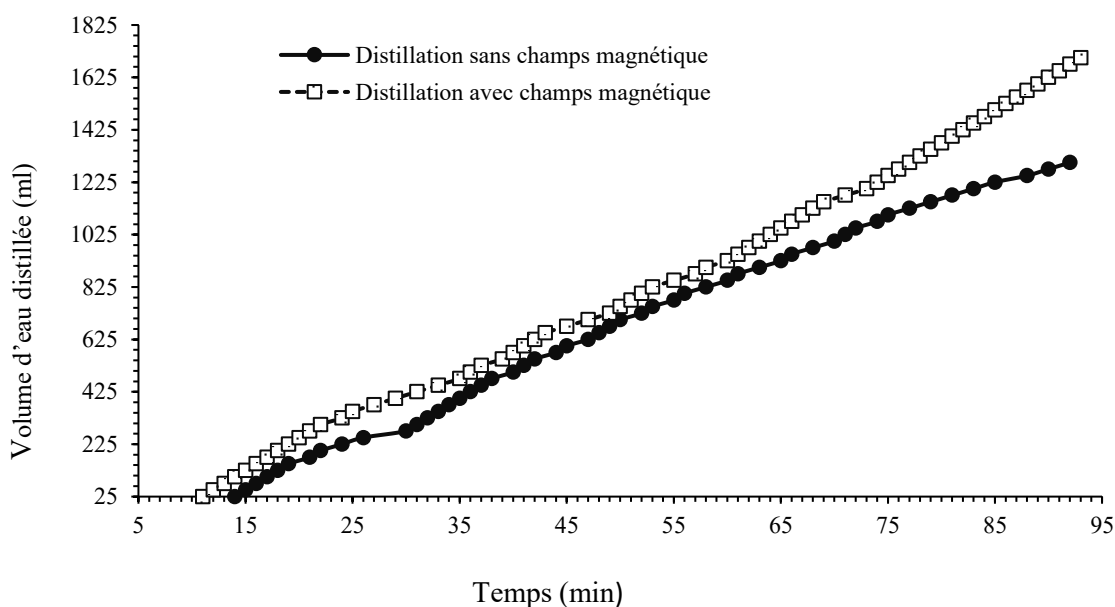


Figure 4.12. Évolution du volume d'eau distillée en fonction du temps par le couplage entre les deux serpentins (Montage N°7)

L'analyse des résultats expérimentaux révèle une amélioration significative du rendement du processus de distillation en présence d'un couplage. Spécifiquement, un rendement de 56.66 % mesuré dans des conditions optimisées intégrant un champ magnétique est comparé à un rendement de 43.33 % obtenu en absence de champ magnétique. Cette différence met en évidence l'effet bénéfique du couplage de deux serpentins en présence d'un champ magnétique sur la performance du système de distillation.

Les résultats expérimentaux obtenus démontrent une amélioration significative des performances du procédé de distillation, avec une augmentation du rendement de condensation pouvant atteindre 41.9 %, particulièrement lors de l'application de champs magnétiques permanents sur des zones spécifiques. Ces observations s'inscrivent en cohérence avec les recherches antérieures mettant en évidence l'influence des champs magnétiques sur les propriétés de l'eau et ses transitions de phase. Les résultats de cette étude s'alignent étroitement avec ceux de Badru et al. (2015), qui ont démontré l'effet accélérateur d'un champ magnétique de 165 mT sur la condensation de la vapeur d'eau ionisée. Leur recherche a mis en évidence une réduction significative du temps de formation du brouillard ainsi que de la durée de coalescence des gouttelettes. Ce phénomène est attribué à l'interaction entre le champ magnétique et les charges électriques des molécules de vapeur, favorisant ainsi la nucléation et la croissance des gouttelettes. Un mécanisme similaire pourrait expliquer la diminution du temps de condensation observée dans notre système, renforçant la compréhension des effets magnétiques sur les transitions de phase [64].

Les travaux de Khosravifar et al. (2021) ont mis en évidence les principales forces influençant la dynamique et la déformation des bulles. La tension superficielle agit vers l'intérieur de la bulle, au niveau de l'interface entre les deux phases, dans le but de maintenir une forme sphérique. Cette force devient plus importante aux zones de forte courbure, notamment lors de l'ascension de la bulle ou de sa déformation sous l'effet d'un champ magnétique. La force de flottabilité, orientée verticalement vers le haut, résulte de la différence de densité entre la phase gazeuse et la phase liquide. En raison de la perméabilité magnétique inférieure de la phase vapeur, la force magnétique est perpendiculaire à l'interface des deux phases et orientée vers l'intérieur de la bulle [65].

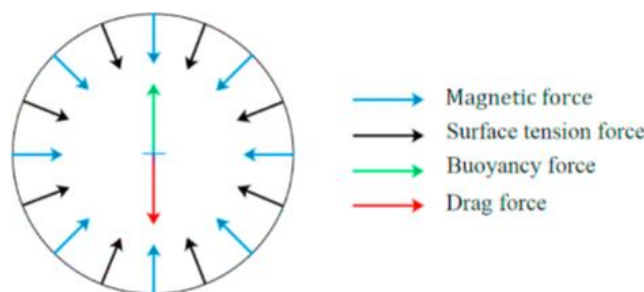


Figure 4.13. Schéma du bilan des forces s'exerçant sur la bulle [65].

L'application d'un champ magnétique horizontal induit un étirement de la bulle dans cette direction. Par conséquent, la force de traînée augmente proportionnellement au mouvement de la bulle, entraînant une réduction de sa vitesse ascensionnelle. Inversement, l'étirement

de la bulle dans la direction verticale, consécutif à l'application d'un champ magnétique vertical, diminue la force de traînée, ce qui a pour effet d'accroître la vitesse de montée de la bulle [64].

En conclusion, cette étude confirme l'intérêt de l'application de champs magnétiques permanents pour améliorer le rendement de la condensation dans les systèmes de distillation. Les effets observés dépendent fortement de la configuration expérimentale, en particulier de la position et de l'intensité du champ. Ces résultats ouvrent la voie à des recherches plus ciblées visant à optimiser les conditions d'application du champ magnétique en fonction des contraintes spécifiques des procédés thermiques industriels.

CONCLUSION

L'exploration d'une approche innovante visant à optimiser le processus de condensation dans les systèmes de distillation a permis de mettre en évidence l'influence significative d'un champ magnétique statique sur les performances thermiques et énergétiques de divers montages expérimentaux. Les essais menés sur plusieurs configurations, avec et sans champ magnétique, ont révélé des résultats probants. Globalement, l'application d'un champ magnétique permanent a conduit à une augmentation du volume d'eau distillée récupérée, à une amélioration de la vitesse de condensation et à une réduction de la consommation spécifique d'énergie sensible. L'amélioration du rendement varie selon les différents dispositifs de montage, la nature des matériaux, et, surtout, l'orientation du champ magnétique.

Les résultats expérimentaux démontrent que les montages en verre offrent des performances nettement inférieures à celles équipées d'un serpentin en cuivre. Plus précisément, les données du montage 5 révèlent qu'après 1h30 de distillation, un volume de 900 mL d'eau est récupéré sous l'influence d'un champ magnétique, comparativement à seulement 650 mL en l'absence de champ, soit une amélioration de 38,45 %. Cette augmentation de rendement s'accompagne d'une réduction de 25 % de la consommation spécifique d'énergie sensible. Dans le cas du montage 4, les volumes d'eau distillée atteignent 850 mL avec champ magnétique. Ce volume est supérieur à celui obtenu en absence de champ magnétique, qui atteint 675 mL, ce qui correspond à une amélioration de 25,93 % et s'accompagne d'une réduction de 16 % de la consommation spécifique d'énergie sensible. Par ailleurs, l'efficacité thermique reste élevée pour les montages 4 et 5, se situant autour de 0,99, ce qui n'empêche pas la condensation de la vapeur d'eau.

Les résultats obtenus avec le montage 4 montrent une amélioration notable de l'efficacité du procédé de distillation après 1h45 de fonctionnement, avec une augmentation estimée à environ 41 %. Cette amélioration est particulièrement marquée lorsque le volume d'eau à distiller et le temps de distillation augmentent. Toutefois, malgré cette progression, le rendement global du processus demeure relativement faible. En revanche, le couplage de deux serpentins de nature différente dans le montage 7 a permis d'atteindre un rendement de 56,66 % dans des conditions optimisées, incluant l'application d'un champ magnétique, contre 43,33 % en son absence. Ces résultats confirment l'effet favorable du champ

magnétique sur les performances thermiques et le rendement global du système de distillation.

Les résultats de cette étude confirment que l'application de champs magnétiques peut améliorer de manière significative les performances des procédés de condensation, en particulier dans les systèmes de distillation. Cette approche présente un potentiel prometteur pour des applications concrètes telles que le dessalement de l'eau, la récupération de condensats, ou encore la production d'eau distillée à faible consommation énergétique et à moindre coût.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriott, P., « Unit Operations of Chemical Engineering », McGraw-Hill, Vol. 7e éd, (2005).
- [2] El-Dessouky, H., Ettouney, H., « Fundamentals of Salt Water Desalination », Elsevier, vol. 1, (2002), 1–380.
- [3] Qureshi, K., Hussain, T., Bhatti, A.A., Batool, S.A., « Advances in water distillation technologies: Design, efficiency and productivity », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 24, (2013), 263–276.
- [4] Fei, Y., Wang, Y., Yu, B., « Heat transfer enhancement in condensation: A review of recent advances », International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 108, (2017), 1051–1065.
- [5] Sadeghi, M.T., Ghazizadeh, M., Amidpour, M., « Performance analysis of vapor compression desalination systems », Applied Thermal Engineering, vol. 148, (2019), 1238–1248.
- [6] Zhang, Y., Tang, G., Qin, M., « Heterogeneous condensation of magnetized water vapor on fine particles », Environmental Research, vol. 167, (2018), 428–435.
- [7] Meunier, J.-L., « Air humide et condensation », Encyclopédie de l'Environnement, (2019).
- [8] Chafi, F.Z., « Cours de physique du bâtiment », Université Salah Boubnider Constantine 3, Institut de Gestion des Techniques Urbaines, Département Génie Urbain.
- [9] Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), « Traitement des gaz dangereux captés sur les lieux de travail : condensation », Paris, (2009).
- [10] Panday, P., « Contribution à l'étude de la condensation en film d'une vapeur pure », Thèse de doctorat, Université Paris 10, Nanterre, (2004), 210.
- [11] Mazouzi, A., « Réalisation d'un mini condenseur de laboratoire », Projet de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Alger, (2015), 65.
- [12] Wen, R., Ma, X., « Advances in dropwise condensation: dancing droplets », 21st Century Surface Science: A Handbook, Intech Open, (2018), 25–42.

- [13] Kožíšek, Z., Sato, K., Demo, P., Sveshnikov, A.M., « Homogeneous nucleation of droplets from supersaturated vapor in a closed system », J. Chem. Phys., (2004), vol. 120, n° 14, 6660–6666.
- [14] Mokshin, A.V., Galimzyanov, B.N., « Steady-State Homogeneous Nucleation and Growth of Water Droplets: Extended Numerical Treatment », preprint, (2012), 1210.0843.
- [15] Wallace, J.M., Hobbs, P.V., « Atmospheric Science: An Introductory Survey (2nd Edition) », Academic Press, (2006).
- [16] Pruppacher, H.R., Klett, J.D., « Microphysics of Clouds and Precipitation (2nd Edition) », Kluwer Academic Publishers, (1997).
- [17] Incropera, F.P., DeWitt, D.P., « Fundamentals of Heat and Mass Transfer », Wiley, (2002).
- [18] Çengel, Y.A., Boles, M.A., « Thermodynamics: An Engineering Approach », McGraw-Hill Education, (2015).
- [19] Rogers, R.R., Yau, M.K., « A Short Course in Cloud Physics », Pergamon Press, (1989).
- [20] Thome, J.R., « Boiling and Condensation Fundamentals », Heat Exchanger Design Handbook, Begell House, (2005).
- [21] Urban, J.J., « Emerging scientific and engineering opportunities within the water-energy nexus », Joule, vol. 1, n° 4, (2017), 665–688.
- [22] Collier, J.G., Thome, J.R., « Convective Boiling and Condensation », Oxford University Press, (1994).
- [23] ASHRAE, « ASHRAE Handbook–HVAC Applications, Chapitre 64: Humidity Control », American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, SI Edition, (2019), 64.1–64.24.
- [24] Dai, X., Sun, N., Nielsen, S.O., Stogin, B.B., Wang, J., Yang, S., et al, « Hydrophilic directional slippery rough surfaces for water harvesting », Science Advances, Vol. 4, n° 3, (2018), 3.

- [25] Ni, G., Li, G., Boriskina, L., Svetlana, V., Li, H., Yang, W., et al., « Steam generation under one sun enabled by a floating structure with thermal concentration », *Nature Energy*, Vol. 1, n° 9, (2016), 16126.
- [26] Miljkovic, N., Enright, R., Nam, Y., Lopez, K., Dou, N., Sack, J., Wang, E.N., « Jumping-droplet-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces », *Nano Letters*, Vol. 13, n° 1, (2013), 179-187.
- [27] Sola Cervera, J.L., Daniel, A., Hoffmann, K., « Optimization of a cooling-condensation tower », *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 69, (2018), 865-870.
- [28] Billet, R., Schultes, M., « Prediction of Mass Transfer Columns with Dumped and Arranged Packings: Updated Summary of the Calculation Method of Billet and Schultes », *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 77, n° 6, (1999), 498–504.
- [29] Veidenbergs, I., Blumberga, D., Viganis, E., Kozhars, G., « Heat and mass transfer processes in scrubber of flue gas heat recovery device », *Scientific Journal of Riga Technical University*, Vol. 4, (2010), 109-115.
- [30] Lehner, M., Hoffmann, K., Geipel, W., « Hydrodynamic and mass transfer characteristic of a novel grid-structured plastic packing », *Heat Mass Transfer*, Vol. 58, n° 8, (2011), 1035-1041.
- [31] Omran, I., « Importance of condensate recovery in industrial operations 'AMOC case' », *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, Vol. 9, n° 9, (2024), 2618-2628.
- [32] Kapustenko, P., Klemeš, J.J., Arsenyeva, O., Tovahznyanskyy, L., « PHE (plate heat exchanger) for condensing duties: recent advances and future prospects », *Energies*, Vol. 16, (2023), 524.
- [33] Sukhatme, S.P., Rohsenow, W.M., « Heat transfer during film condensation of liquid metal vapors », *Journal of Heat Transfer*, Vol. B8, n° 1, (1966), 20-26.
- [34] Shin, Y., Jeong, S., Lee, K.-Y., Woo, S., Hwang, W., « Condensation heat transfer correlation for micro/nanostructure properties of surfaces », *ACS Omega*, Vol. 7, n° 33, (2022), 33837-33844.

- [35] Harby, K., Gebaly, D.R., Koura, N.S., Hassan, M.S., « Performance improvement of vapor compression cooling systems using evaporative condenser: An overview », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, (2016), 347-360.
- [36] Mansourn, K., « Distillation principes et applications », Université des Sciences et Technologies, Département de Génie des Procédés, (2019-2020), 120.
- [37] Abdi, M., « Étude théorique par simulation de la séparation d'un mélange ternaire », École Nationale Polytechnique, Alger, (2017), 89.
- [38] Smith, R., et al. « Chemical Process Design and Integration », Wiley, (2005), 1024.
- [39] Seader, J.D., « Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations », John Wiley & Sons, (2016), 768.
- [40] Coulson, J.M., Richardson, J.F., « Chemical Engineering, Volume 2 (5th ed.) », Butterworth-Heinemann, (2002).
- [41] Treybal, R.E., « Mass-Transfer Operations (3rd ed.) », McGraw-Hill, (1980).
- [42] Mendham, J., Denney, R.C., Barnes, J.D., Thomas, M.J.K., « Analyse chimique quantitative de Vogel », Boeck et Larcier, Paris, (2006), 545-548.
- [43] Tamraz, J., Outin, C., Forjaz, M., Secca Souss, B., « Principe d'imagerie par résonance magnétique de la tête de la base crâne et du rachis », Springer Verlag, France, (2004), 2.
- [44] Rouge, C., « Modélisation du rayonnement ultrasonore par un transducteur EMAT dans une pièce ferromagnétique », Thèse de doctorat, Université Bordeaux, (2013), 210.
- [45] Jufer, M., « Traité d'électricité - Volume IX – Électromécanique », Presses Polytechniques Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, (2004), 65-67.
- [46] Wilidi, T., Sybille, G., « Electrotechnique », 3ème édition, De Boeck Supérieur, Canada, (2003), 163-169.
- [47] Bloch, F., « Source de champ intense 4 Tesla à aimants permanents », Thèse de doctorat, INP, Grenoble, (1992), 180.
- [48] Perez, J., Renvoizé, V., « Physique MPSI-PSI-PTSI : Cours complet et exercices corrigés », Pearson Education, France, (2013), 570-571.

- [49] Nouri, A., « Étude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, INP, Grenoble, (2008), 195.
- [50] Fahidy, T.Z., « Hydrodynamic models in magnetoelectrolysis », *Electrochimica Acta*, Vol. 18, n° 8, (1973), 607-614.
- [51] Fattahi, A., Bahrololoom, M.E., « Investigating the effect of magnetic field on pulse electrodeposition of magnetic and non-magnetic nanostructured metals », *Surface and Coatings Technology*, n° 10, (2014).
- [52] Gerl, M., Issi, J.P., « Physique des matériaux », *Traité des matériaux*, Presses Polytechniques et Universitaires, Lausanne, (1997), 513-516.
- [53] Bécherrawy, T., « Électrostatique et magnétostatique », Lavoisier, Paris, (2011), 293-299.
- [54] Blanchet, C., « Variabilités climatique et océanique du dernier cycle glaciaire-interglaciaire. Propriétés magnétiques et géochimiques des sédiments de la marge nord-ouest américaine subtropicale », Thèse de doctorat, ESE, Aix-Marseille III, (2006), 250.
- [55] Mercier, J.P., Zambelli, G., Kurz, W., « Introduction à la science des matériaux », *Traité des matériaux*, Presses Polytechniques et Universitaires, Lausanne, (1997), 411-413.
- [56] Posener, D.W., « Hyperfine structure in the microwave spectrum of water. II. Effects of magnetic interactions », *Australian Journal of Physics*, Vol. 13, n° 2, (1960), 169-185.
- [57] Nakagawa, J., Hirota, N., Kitazawa, K., Shoda, M., Ogiwara, H., « Effect of a magnetic field on water vaporization, and its mechanism », *Journal of the Magnetics Society of Japan*, Vol. 22, n° 4-2, (1998), 825-828.
- [58] Seyfi, A., Nazari, M., Karimi, M., « Effect of static magnetic field on the evaporation rate of deionized water », *Journal of Molecular Liquids*, Vol. 238, (2017), 105–110.
- [59] Dueñas, C., Becerra, L., Rodríguez, G., « Enhancement of water vapor production under low-temperature magnetic fields: Molecular cluster fragmentation effects », *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, Vol. 13, No. 3, (2021), 031002.
- [60] Guo, Y.-Z., Yin, D.-C., Cao, H.-L., Shi, J.-Y., Zhang, C.-Y., Liu, Y.-M., Huang, H.-H., Liu, Y., Wang, Y., Guo, W.-H., Qian, A.-R., Shang, P., « Evaporation rate of water as

- a function of a magnetic field and field gradient », *International Journal of Molecular Sciences*, Vol. 13, n° 12, (2012), 16916-16928.
- [61] Wang, Y., Wei, H., Li, Z., « Effect of magnetic field on the physical properties of water », *Results in Physics*, Vol. 8, (2018), 262–267.
- [62] Shalatonin, V., « Effect of unipolar magnetic field on macroscopic properties of distilled water », *International Journal of Pharma Medicine and Biological Sciences*, Vol. 6, n° 3, (2017), 89-93.
- [63] Kohno, M., Kamachi, T., Fukui, K., « Intermolecular binding between bulk water and dissolved gases in Earth's magnetic field », *PLoS One*, Vol. 17, n° 5, (2022), e0267391.
- [64] Badru, R.A., Adeniran, S.A., Atijosan, A.O., « Effect of magnetic field on charged water vapour in motion », *European Journal of Engineering and Technology*, Vol. 3, n° 1, (2015), 26–30.
- [65] Khosravifar, P., Ahangar Zonouzi, S., Aminfar, H., Mohammadpourfard, M., « Numerical investigation of the condensation of a rising bubble inside a subcooled liquid under magnetic field », *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 160, (2021), 106674.
- [66] Kadhim, K.N., Alghazali, N.O., « Effect of magnetization on some physical properties of Almasab Alam salty water », *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 856, (2021).
- [67] Chibowski, E., Szczes, A., Holysz, L., « Influence of magnetic field on evaporation rate and surface tension of water », *Colloids and Interfaces*, Vol. 2, n° 4, (2018), 68.
- [68] Tipole, P., Karthikeyan, A., Bhojwani, V., Deshmukh, S., Tipole, B., Shinde, K., Sundare, A., « Performance analysis of vapor compression cycle water chiller with magnetic flux at the condenser exit », *Energy and Buildings*, Vol. 152, (2017), 643–649.
- [69] Sidheshware, R.K., Ganesan, S., Bhojwani, V.K., « Experimental analysis of magnetic field effects on compressor energy saving cooling system », *E3S Web of Conferences*, Vol. 170, (2020), 01020.
- [70] Jathar, L.D., Sonune, A.A., Kharade, P.V., Doke, D.Y., « To study the effect of magnetic field on the performance of vapor compression system by using various

refrigerants », Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), (2018).

- [71] Samin, S.M., Aucoin, S., «Effect of magnetic field on the performance of new refrigerant mixtures », International Journal of Energy Research, Vol. 27, (2003), 203–214.
- [72] Griest, A.J., Libsch, J.F., Conard, G.P., « Effect of magnetic field strength during condensation on the coercivity and form of vapor-deposited iron », Journal of Applied Physics, Vol. 27, (1956), 1022.
- [73] Lawrence, A., Thollander, P., Andrei, M., Karlsson, M., « Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences », Energies, Vol. 12, No. 2, (2019), 247.
- [74] Steffen, V. (Éd.) « Distillation Processes: From Solar and Membrane Distillation to Reactive Distillation – Modelling, Simulation and Optimization », 1^{re} éd., Elsevier, (2022), 90.

APPENDICE A

LISTE DES SYMBOLES

kWh	Kilowattheure
m ³	Mètre cube
L	Litre
°C	Degré Celsius
mg/h•cm ²	Milligrammes par heure par centimètre carré
kW/m ²	Kilowatt par mètre carré
µm :	Micromètre
W/m ² •K	Watt par mètre carré-kelvin
mm	Millimètre
kHz	Kilohertz (10 ³ hertz)
T	Tesla (induction magnétique)
mT	Millitesla (1 mT = 10 ⁻³ T)
J•mol ⁻¹	Joules par mole
mN/m	Millinewton par mètre
kA/m	Kiloampère par mètre
Pa	Pascal (N/m ²)
mL	Millilitre
cm	Centimètre
Ø	Diamètre
h	Heure
min	Minute
V	Volume d'eau distillée
U	Coefficient global de transfert thermique
M	Perméabilité magnétique du matériau
I	Intensité du courant électrique
N	Nombre de spires par unité de longueur (1/m)
$\vec{u}_z$	Vecteur unitaire selon l'axe z
$\vec{E}$	Champ électrique
$\vec{M}$	Aimantation du matériau
$\vec{H}$	Intensité du champ magnétique
$\nabla E_{\text{magnétique}}$	Gradient de l'énergie magnétique

APPENDICE B

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AMOC	Alexandria Mineral Oils Company
PHE	Plate Heat Exchanger
ND	Nano-Dendrite
MD	Micro-Dendrite
MC	Micro-Cubique
MNC	Micro/Nano-Cubique
COP	Coefficient de performance
ELV	Équilibres Liquide-Vapeur
Fe ₂ O ₃	Oxydes et sulfures de fer
Fe ²⁺	Ion ferreux
(Fe, Mg)SiO ₄	Silicate ferromagnésien
NiO	Oxyde de nickel
HDO	Eau semi-lourde (Hydrogène–Deutérium–Oxygène)
D ₂ O	Eau lourde (Deutérium–Deutérium–Oxygène)
3D	Trois dimensions
PH	Potentiel hydrogène (acidité / basicité)
PVC	Polychlorure de vinyle
NdFeB	Néodyme-Fer-Bore (aimant permanent)