



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research  
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم  
Abdel Hamid Ibn Badis University - Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculty of Sciences and Technology  
قسم هندسة الطرائق



Department of Process Engineering

N° d'ordre : M2...../GC/2021

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

**Filière : Génie des procédés**

**Option : Génie Chimique**

**Thème**

### MAXIMISATION DE LA PUISSANCE THERMIQUE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR A PLAQUE PAR LA METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

Présenté par

1-M<sup>elle</sup> SAIDJ Rym

2-M<sup>elle</sup> SAHLELLOU Saliha

Soutenu le 14/07/ 2021 devant le jury composé de :

Président :	M <sup>r</sup> MEROUANI Djilali	Grade Pr	Université de Mostaganem
Examinatrice :	M <sup>me</sup> MELLOUK Sania	Grade MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	M <sup>me</sup> MEZOUAGH Amina	Grade MCB	Université de Mostaganem
Encadrante :	M <sup>me</sup> BOUBEGRA Naima	Grade MCA	Université de Mostaganem
Co-encadrante :	M <sup>me</sup> BESSAD Lila	Doctorante	Université d'Alger.

Année universitaire 2020 – 2021

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents et mes sœurs que je remercie énormément pour leurs sacrifices, leur soutien et leurs encouragements durant toutes ces années d'étude

À ma sœur de cœur Yamna et à tous nos fous rires et nos pleurs ainsi qu'à sa famille, merci de m'avoir fait me sentir comme un membre de votre famille.

À Ikram et à son petit ange qui arrivera bientôt Inchallah et qui nous comble déjà d'énergie positive

À mon binôme Saliha

À tous mes amis qui ont toujours été présents

À Amine, Sofi, Raïd, Djilalli, Fayçal

Je vous aime

SAIDJ Rym

# Dédicace

**T**outes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut.... Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance... C'est tout simplement que je dédie ce mémoire...

**À** ma chérie mère, autant de phrases aussi expressives soient-elles saurées montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma vive reconnaissance et ma profonde estime. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

**À** l'âme de mon cher père toujours présent dans mon cœur, j'espère être toujours à la hauteur de vos espérances Que Dieu lui fasse miséricorde.

**J**e tiens à la dédier à ma sœur et mon frère Mohamed

**À** ma chère binôme « Rym Saïdj » qui m'a partagé tout moment de joie, de bonheur et de prime notre travail c'est le résultat d'une amitié et d'amour.

**À** tous ceux qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce travail.

SAHLELLOU Saliha

# Remerciements

Tout d'abord, Merci au bon Dieu de nous avoir guidé vers le bon chemin, de nous avoir donné la santé, la volonté, la patience et la motivation pour achever ce modeste travail.

Nous remercions principalement notre encadrante M<sup>me</sup> BOUBEGRA Naima de nous avoir encadrés et suivis durant la réalisation de ce travail, qu'elle trouve ici l'expression de toutes nos reconnaissances et nos profonds respects pour la confiance qu'elle nous a accordée durant cette année, merci pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail, merci pour ses précieux conseils. Nous tenons aussi à remercier notre co-encadrante M<sup>me</sup> BESSAD Lila pour votre disponibilité malgré vos multiples responsabilités. Que Dieu la tout-puissant vous protège, et vous garde inchaallah, Je demande à Dieu Tout-Puissant, de parfumer vos jours avec foi et d'éclairer votre cœur avec le Coran et de vous bénir avec obéissance, charité, amnistie et pardon, et d'accepter vos appels, O Seigneur, O Miséricordieux, O Rahman !

Nous tenons également à exprimer toute nos gratitudeux aux membres de jury : M<sup>r</sup> MEROUANI Djilali, M<sup>me</sup> MELLOUK Sania et M<sup>me</sup> MEZOUAGH Amina, pour leurs contributions scientifiques lors de l'évaluation de ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de nos profonds respects et de nos sincères remerciements.

Merci à tous ceux qui ont cru en nous et nous ont encouragé, soutenu et aidé par un geste, un avis, une prière ou un simple sourire.

SAIDJ Rym

SAHLELLOU Saliha

## Résumé :

Les échangeurs de chaleur sont des dispositifs conçus pour transférer de la chaleur entre deux ou plusieurs fluides, ils existent sous plusieurs types. Notre travail a été essentiellement centré sur les échangeurs de chaleur à plaques qui existent eux aussi à leurs tours sous différents types, l'objectif à atteindre est d'arriver à trouver des résultats optimaux qui mènent à transférer le plus de puissance thermique possible et donc avoir une perte d'énergie minimale. À cet objectif et par la méthode des plans d'expérience une simulation d'un totale de 16 expériences a été effectuée par le logiciel nommé Minitab, en prenant en compte 4 facteurs : la dimension caractéristique des canaux, la profondeur de l'échangeur, la vitesse de l'écoulement et la conductivité thermique des ailettes. L'analyse faite nous a permis de déterminer que le facteur le plus significatif sur la puissance thermique était la conductivité thermique des ailettes et nous a aussi permis de mieux savoir d'où venait le problème grâce aux diagrammes de contours et d'interaction pour au final atteindre notre objectif à l'aide de l'option d'optimisation.

**Mots clés :** échangeur à plaque, plan d'expérience, optimisation.

## Abstract :

Heat exchangers are devices designed to transfer heat between two or more fluids, they come in several types. Our work has been mainly focused on plate heat exchangers which also exist in their turn in different types, the objective to be achieved is to find optimal results which lead to transfer as much thermal power as possible and therefore have minimal energy loss. To this end and by the experimental design method, a simulation of a total of 16 experiments was carried out by the software named Minitab, taking into account 4 factors: the characteristic dimension of the channels, the depth of the exchanger, flow velocity and thermal conductivity of the fins. The analysis made allowed us to determine that the most significant factor on the thermal power was the thermal conductivity of the fins and also allowed us to better know where the problem came from thanks to the contour and interaction diagrams for au final achieve our goal using the optimization option.

keywords: plate heat exchanger, design of experiment, optimization.

## ملخص:

المبادلات الحرارية هي أجهزة مصممة لنقل الحرارة بين سائلين أو غازين أو صلبين أو أكثر، و هي تأتي في عدة انواع ركز عملنا بشكل أساسي على المبادلات الحرارية للالواح والتي توجد بدورها ايضا في انواع مختلفة والهدف الذي يجب تحقيقه هو العثور على النتائج المثلى التي تؤدي الى نقل اكبر قدر ممكن من الطاقه الحرارية وبالتالي تقليل الطاقة الى الحد الادنى تحقيقا لهذه الغاية من خلال البعد : طريقة الخطط التجريبية تم اجراء محاكاة مجموعه ستة عشر تجربة بواسطة البرنامج المسمى مينيتاب مع مراعاة اربعة عوامل المميز للفتوات المبادل و سرعة التدفق والتوصيل الحراري للزعانف سماح لنا التحليل الذي تم اجراؤه لتحديد ان العامل الاكثر اهمية في الطاقه الحرارية هو التوصيل الحراري للزعانف كما اتاح لنا معرفه افضل من اين جاءت المشكله بفضل المخططات الكنتورية والتفاعلية في تحقيق هدفنا النهائي باستخدام خيار التحسين

**الكلمات المفتاحية:** مبادل حراري لوحي ، تصميم تجريبي، التحسين

## Sommaire

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité sur les échangeurs de chaleur</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. Définition de l'échangeur de chaleur .....	3
I.3. Classification des échangeurs.....	3
I.3.1. Type de contact .....	3
I.3.1.1. Échangeurs de chaleur à contact direct.....	3
I.3.1.2. Échangeurs de chaleur à contact indirect .....	4
I.3.2. La disposition des écoulements .....	4
I.3.2.1. À co-courant .....	4
I.3.2.2 À contre-courant .....	4
I.3.2.3. À courant croisés .....	4
I.3.3. Les types d'échange .....	5
I.3.3.1. Échangeur sans changement de phase .....	5
I.3.3.2. Échangeur avec changement de phase .....	5
I.4. Les modes de transfert de chaleur .....	5
I.4.1.La Conduction .....	6
I.4.2. La convection .....	6
I.4.3. Le Rayonnement .....	7
I.5. Les différents types d'échangeur de chaleur .....	8
I.5.1. Echangeurs à tubes (monotubes, coaxiaux ou multitubulaires) .....	8
a. Échangeur monotube .....	8
b. Échangeur coaxial .....	9
c. Échangeur multitubulaire .....	10
c.1. Échangeur à tubes séparés .....	10
c.2. Échangeur à tubes rapprochés .....	10
c.3. Échangeur à tubes ailettes .....	11
c.4. Échangeur à tubes et calandre .....	11
I.5.2. Échangeurs à plaques .....	12
<b>Chapitre II : Les échangeurs à plaques</b>	
II.1. Introduction .....	13

II.2. Définition .....	13
II.3. Principe de fonctionnement .....	13
II.4. Classification des échangeurs de chaleur à plaques .....	14
II.4.1. Échangeurs de chaleur à plaques et joints .....	14
II.4.2. Échangeurs de chaleur à plaques soudées .....	15
II.4.3. Échangeurs de chaleur à plaques en spirale .....	16
II.4.4. Échangeurs de chaleur à plaques brasées .....	17
II.4.5. Échangeurs de chaleur à lamelles .....	18
II.5. Utilisation des échangeurs de chaleur à plaques .....	18
II.6. La maintenance d'un échangeur de chaleur à plaques .....	19
II.6.1. Le nettoyage avec l'échangeur fermé .....	19
II.6.2. Le nettoyage manuel des plaques .....	19
II.6.3. Le nettoyage dans une cuve.....	20
II.7. Avantages des échangeurs de chaleur à plaques .....	20
II.8. Inconvénients des échangeurs de chaleur à plaques .....	21
II.9. Conclusion .....	22
<b>Chapitre III : Les plans d'expériences</b>	
III .1 Introduction .....	23
III.2 Qu'est ce que le plan expérimental statique .....	23
III.2.1 La réponse .....	23
III.2.2 Les facteurs .....	24
III.2.3 Les niveaux .....	25
III.2.4 L'effet .....	25
III.2.5 L'interaction .....	25
III.2.6 Modélisation mathématique .....	26
III.3 Principe des plans d'expériences .....	26
III.4 Les étapes d'une étude par les plans d'expériences .....	26
III.4.1 Définition des objectifs et des réponses .....	26
III.4.2 Choix des facteurs et du domaine expérimental .....	26
III.4.3 Proposition d'un modèle .....	26
III.4.4 Estimation des coefficients du modèle .....	27
III.4.5 Validation du modèle .....	27
III.4.6 Mise en œuvre et suivi .....	27
III.5 Différents types des plans d'expériences .....	27

III.5.1 Plans factoriels.....	27
III.5.1.1 Plans factoriels complets .....	27
III.6 Conclusion .....	28
<b>CHAPITRE IV : Optimisation d'un échangeur à plaque</b>	
IV.1. Description du problème.....	29
IV.2. Récapitulatif du modèle.....	30
IV.3. L'équation de régression.....	30
IV.4. Diagramme de Pareto des effets.....	31
IV.4.1. Interprétation du diagramme.....	31
IV.5. Analyse des variances.....	31
IV.6. Graphique des effets principaux.....	32
IV.7. Diagramme des interactions.....	33
IV.8. Les graphiques de contour.....	34
IV.9. Optimisation des réponses.....	40
IV.10. La comparaison entre les réponses prédites et les réponses réelles.....	41
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>43</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Différents modes de circulation .....	4
<b>Figure I.2 :</b> Transfert thermique par conduction .....	5
<b>Figure I.3 :</b> Transfert thermique par convection .....	6
<b>Figure I.4:</b> Transfert thermique par rayonnement .....	7
<b>Figure I.5:</b> Échangeur monotube en serpentin .....	8
<b>Figure I.6 :</b> Échangeur coaxial .....	8
<b>Figure I.7:</b> Échangeur coaxial .....	8
<b>Figure I.8 :</b> Échangeur multitubulaire .....	9
<b>Figure I.9 :</b> Échangeur à tube séparés .....	9
<b>Figure I.10 :</b> échangeur à tubes rapprochés .....	10
<b>Figure I.11 :</b> Batterie à ailettes .....	10
<b>Figure I.12 :</b> Échangeur à tubes ailettes .....	10
<b>Figure I.13 :</b> Échangeur à tubes et calandre .....	11
<b>Figure II.1 :</b> Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques .....	13
<b>Figure II.2 :</b> Echangeur à plaques à joints .....	14
<b>Figure II.3 :</b> Section à plaques d'un échangeur de chaleur à plaques soudées .....	15
<b>Figure II.4 :</b> Échangeur de chaleur à plaques soudées .....	15
<b>Figure II.5 :</b> Échangeur de chaleur à plaques en spirale .....	16
<b>Figure II.6 :</b> Échangeur de chaleur à plaques brasées .....	17
<b>Figure II.7 :</b> Coupe transversale de l'échangeur de chaleur à lamelles montrant les lamelles .....	18
<b>Figure II.8 :</b> échangeur à lamelle .....	18
<b>Figure III. 1:</b> la surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.....	24
<b>Figure III. 2 :</b> le domaine et les niveaux d'un facteur .....	24
<b>Figure III. 3:</b> la disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude .....	25
<b>Figure IV.1 :</b> Diagramme de Pareto des effets.....	30
<b>Figure IV.2 :</b> Graphique des effets principaux (en fonction de la dimension des canaux)	

.....	32
<b>Figure IV.3 :</b> Graphique des effets principaux (en fonction de la vitesse d'écoulement)	32
.....	32
<b>Figure IV.4 :</b> Graphique des effets principaux (en fonction de la conductivité thermique)	33
.....	33
<b>Figure IV.5 :</b> Graphique des effets principaux (en fonction de la profondeur de l'échangeur)	33
.....	34
<b>Figure IV.6 :</b> Diagramme des interactions	34
<b>Figure IV.7 :</b> Graphique de contour de la puissance thermique, de la profondeur de l'échangeur et de la dimension des canaux	35
<b>Figure IV.8 :</b> Graphique de contour de la puissance thermique, de la vitesse de l'écoulement et de la dimension des canaux	36
<b>Figure IV.9 :</b> Graphique de contour de la puissance thermique de la conductivité thermique des ailettes et de la dimension des canaux	37
<b>Figure IV.10 :</b> Graphique de contour de la puissance thermique, de la vitesse d'écoulement et de la profondeur de l'échangeur	38
<b>Figure IV.11 :</b> Graphique de contour de la puissance thermique de la conductivité thermique des ailettes et de la profondeur de l'échangeur	39
<b>Figure IV.12 :</b> Graphique de contour de la puissance thermique, de la conductivité et de la vitesse d'écoulement	40
<b>Figure IV.13 :</b> Diagramme d'optimisation des réponses	41
<b>Figure IV.14 :</b> Diagramme de comparaison entre les réponses prédites et les réponses réelles	42

## Liste des tableaux

<b>Tableau II. 1 :</b> Comparaison entre l'échangeur de chaleur à plaque et tube et calandre.	21
<b>Tableau IV.1 :</b> Tableau des facteurs étudiés.....	29
<b>Tableau IV.2 :</b> L'analyse des variances.....	31

## Liste des abréviations :

**Dim** : Dimension caractéristique des canaux.

**P** : Profondeur de l'échangeur.

**V** : Vitesse de l'écoulement.

**C** : Conductivité thermique des ailettes.

**Puissance ther** : Puissance thermique.

**Y** : Les réponses prédites.

**Y'** : Les réponses expérimentale.

### Introduction générale

Avec l'augmentation de la consommation de l'énergie mondiale, la législation stricte en matière de protection de l'environnement et les réglementations de sécurité dans les pays industrialisés, les économies d'énergie ont été soumise à de forte priorité. L'un des moyens les plus efficaces pour réduire l'énergie consiste à améliorer le transfert de chaleur pour une récupération de chaleur supplémentaire.

Le processus de transfert de chaleur entre deux ou plusieurs flux de fluide à différentes températures est réalisé par un équipement conçu, spécialisé, connu sous le nom d'échangeur de chaleur et existant sous plusieurs types.

Ce travail porte sur les échangeurs de chaleur à plaques, ce sont des équipements fréquemment utilisés dans les industries de fabrication et de transformation. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les performances optimales d'un échangeur de chaleur à plaque en prenant en considération des paramètres liés à cela : la dimension caractéristique des canaux, la profondeur de l'échangeur, la vitesse de l'écoulement et la conductivité thermique des ailettes. Pour atteindre l'objectif de cette étude, une méthode connue sous le nom de plan d'expérience est utilisée.

Une grande partie de nos connaissances sur les produits et les processus dans les disciplines de l'ingénierie et scientifique et dérivée de l'expérimentation est une série de tests menés de manière systématique pour accroître la compréhension d'un procédé existant ou pour explorer un nouveau produit ou procédé. Le plan d'expérience est donc l'outil pour développer une stratégie d'expérimentation qui maximise l'apprentissage en utilisant un minimum de ressources. Il est largement utilisé dans de nombreux domaines avec une large application dans toutes les sciences naturelles et sociales et est largement utilisé par les ingénieurs et les scientifiques impliqués dans l'amélioration des processus de fabrication pour maximiser le rendement et réduire la variabilité. Avec les avancées technologiques modernes, les produits et les processus deviennent extrêmement compliqués. Comme le coût de l'expérimentation augmente rapidement, il devient de plus en plus difficile pour l'analyste, qui est déjà limité par les ressources et le temps, d'étudier les nombreux facteurs qui affectent ces processus complexes en utilisant des méthodes d'essai et d'erreur. Au lieu de cela, une technique est nécessaire qui identifie les facteurs de la manière la plus efficace, puis dirige le processus vers son meilleur réglage pour répondre à la demande toujours croissante d'une qualité améliorée

## **Introduction générale**

---

et d'une productivité accrue. Les techniques de plan d'expérience fournissent des méthodes puissantes et efficaces pour atteindre ces objectifs.

Notre mémoire est structuré comme suit :

Dans une première partie une généralité sur les échangeurs de chaleur est présentée, vient ensuite un deuxième chapitre qui sera réservé à une description détaillée des échangeurs de chaleur à plaques et leurs types, le troisième chapitre sera consacré aux plans d'expériences et évoquera les différents types de ceux-ci. Le quatrième chapitre présentera notre problème et la stratégie expérimentale suivie pour le résoudre, il englobera aussi les résultats de modélisation qui seront interprétés par la suite.

Nous avons achevé notre mémoire par une conclusion générale et les perspectives qui peuvent être dégagées de cette étude.

**Chapitre I :**  
**Généralité sur les échangeurs de chaleur**

**I.1. Introduction :**

Dans l'industrie, l'échangeur de chaleur est un élément essentiel de toute politique de maîtrise de l'énergie et donc, par voie de conséquence et de protection de l'environnement, une grande part de l'énergie thermique utilisée dans les procédés industriels transite au moins une fois par un échangeur de chaleur, aussi bien dans les procédés eux-mêmes que dans les systèmes de récupération de l'énergie thermique de ceux-ci. Ils sont utilisés principalement dans les secteurs de l'industrie (chimie, pétrochimie, sidérurgie, agro-alimentaire, production d'énergie, ... etc.), du transport (automobile, aéronautique) et dans le secteur résidentiel et tertiaire (chauffage, climatisation, ...etc.). Ils constituent donc un dispositif clé, et sont un composant quasi inévitable dans la maîtrise de l'énergie.

Les échangeurs thermiques doivent présenter une grande surface d'échange de chaleur sous un volume externe le plus réduit possible.

**I.2. Définition de l'échangeur de chaleur :**

Les échangeurs de chaleur comme leur nom l'indique sont des dispositifs qui consiste à faire circuler deux fluides à travers des conduits qui les mettent en contact thermique, de manière générale les deux fluides sont mis en contact thermique à travers une paroi.

En sachant que les échangeurs de chaleur doivent présenter une grande surface d'échange de chaleur pour une grande efficacité thermique. Il est donc primordial que les matériaux composant l'échangeur de chaleur doivent être les plus conducteurs possibles afin de favoriser l'échange thermique [1].

**I.3. Classification des échangeurs :****I.3.1. Type de contact :**

Il existe deux principaux types d'échangeurs de chaleur :

- Type de contact direct.
- Type de contact indirect.

**I.3.1.1. Échangeurs de chaleur à contact direct :**

Dans ces types de dispositifs d'échange de chaleur, les deux fluides considérés ne sont pas séparés par une paroi. Par conséquent, ils entrent en contact l'un avec l'autre, la chaleur est donc échangée ou plutôt transférée, puis les fluides sont séparés. La plupart des tours de refroidissement et des épurateurs sont de bons exemples pour ce type d'échangeurs de chaleur.

**I.3.1.2. Échangeurs de chaleur à contact indirect :**

Les fluides dans ces types d'échangeurs de chaleur sont séparés. Le processus de transfert de chaleur dans ces derniers se produit en continu à travers la paroi divisée/séparée.

**I.3.2. La disposition des écoulements :**

Il est défini qu'il existe trois modes principales de disposition des flux dans un échangeur de chaleur typique utilisé dans l'industrie, ces modes sont :

- À co-courant.
- À contre-courant.
- À courant croisés.

**I.3.2.1. À co-courant :**

Ce type d'échangeurs de chaleur a une disposition d'écoulement dans laquelle les deux fluides considérés s'écoulent parallèlement dans la même direction.

Ce type d'agencement d'écoulement n'est pas largement utilisé dans l'industrie puisqu'il a une efficacité inférieure lors de l'examen de l'agencement à contre-courant, bien qu'il soit nécessaire si l'un des éléments suivants est requis pour une certaine application.

- Si la température du fluide plus chaud atteint son point de fusion particulier.
- Si l'application permet une tuyauterie qui s'adapte uniquement au flux parallèle. [16]

**I.3.2.2 À contre-courant :**

Dans ce mode de circulation, l'écoulement des deux fluides en considération est parallèle.

Cependant, ils s'écoulent en sens inverse. Ceci est considéré comme le plus efficace des trois flux ci-dessus pour les mêmes paramètres que le reste des trois flux. La raison étant que la variation de température à travers la paroi de l'échangeur à la section transversale donnée est à la valeur la plus faible. Bien que dans certains cas, il soit un peu difficile d'obtenir un contre-courant parfait en raison des difficultés liées à la fabrication de l'échangeur de chaleur. [16]

**I.3.2.3. À courant croisés :**

Au lieu d'un écoulement parallèle et de direction opposée dans ce type d'agencement d'écoulement, les fluides s'écoulent perpendiculairement les uns aux autres. Pour ce type d'arrangement de flux, les combinaisons suivantes sont considérées :

- Les deux fluides sont mélangés.
- Les deux fluides peuvent être non mélangés.
- L'un des fluides est mélangé, tandis que l'autre ne l'est pas.

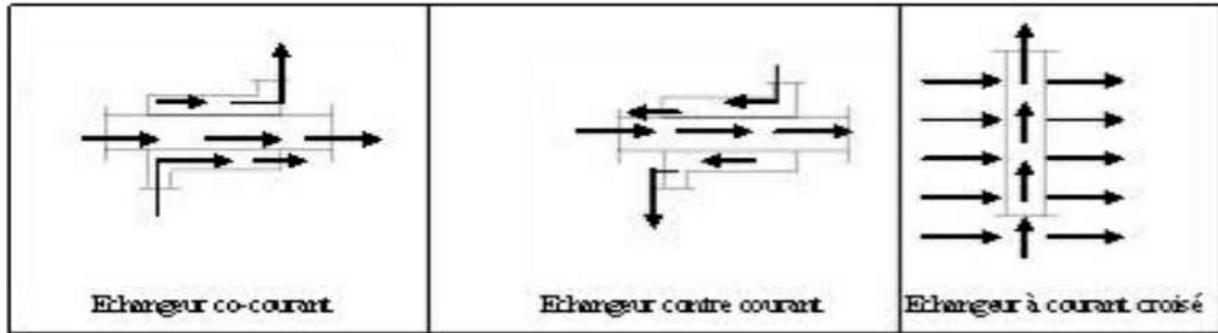


Figure I.1 : Différents modes de circulation.

### I.3.3. Type d'échange :

#### I.3.3.1. Échangeur sans changement de phase :

Les échangeurs de chaleur sans changement de phase correspondent aux échangeurs dans lesquels l'un des fluides se refroidit pour réchauffer le deuxième fluide sans qu'il y ait changement de phase. Les températures des fluides sont donc variables, tout le long de l'échangeur. [13]

#### I.3.3.2. Échangeur avec changement de phase :

Les échanges avec changement de phase sont caractérisés par trois cas différents :

- L'un des fluides se condense alors que l'autre se vaporise : ces échangeurs sont rencontrés dans les machines frigorifiques.
- Le fluide secondaire se vaporise en recevant de la chaleur du fluide primaire, qui ne subit pas de changement d'état. Ils sont appelés évaporateurs.
- Le fluide primaire se condense en transférant sa chaleur latente au fluide secondaire plus froid, tandis que le fluide secondaire ne subit aucune transition d'état.

### I.4. Les modes de transfert de chaleur :

On définit un transfert de chaleur ou transfert thermique entre deux corps comme une interaction énergétique provoquée par la différence de température entre les deux corps. On distingue trois modes de transfert de chaleur :

- La conduction thermique.
- La convection.
- Le rayonnement thermique.

Ces trois modes sont régis par des lois spécifiques, seuls la conduction et le rayonnement sont les modes fondamentaux de transmission de la chaleur, sachant que la convection est très importante et ne fait que combiner la conduction avec un déplacement de fluide [15].

### I.4.1. Conduction :

Est définie comme étant le mode de transmission de la chaleur provoquée par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux au repos, ou encore entre deux milieux en contact physique (Les atomes transfèrent la chaleur de l'un à l'autre). Le transfert de chaleur par conduction caractérise tout transfert de chaleur qui se produit dans la paroi séparant deux corps à des températures différentes. C'est le cas de la surface d'échange de l'échangeur de chaleur [3].

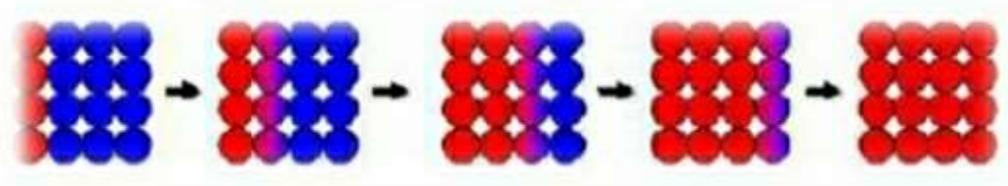


Figure I.2 : Transfert thermique par conduction.

Le flux de transfert de chaleur dépend de la conductivité thermique du produit. La loi fondamentale de la conduction est la loi de Fourier qui s'écrit comme suit : [1]

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} \cdot S \cdot \Delta T \quad (\text{I.1})$$

$\Phi$  : Quantité de chaleur échangée [W].

$\lambda$  : Coefficient de conduction [W/m. °C].

$S$  : Surface d'échange [m<sup>2</sup>].

$\Delta T$  : Différence de température [°C].

### I.4.2. La convection :

Comprend la chaleur transférée par le mouvement réel des molécules causé par les différences de température. C'est un processus caractéristique des liquides et des gaz : les particules proches de la source de chaleur ont une température plus élevée et donc une densité plus faible que les autres particules. Ces particules s'élèvent à l'intérieur du fluide et sont remplacées par des particules plus froides. Par conséquent, le transfert de chaleur se produit par l'intermédiaire du mouvement de différentes particules. [14]

Les applications du transfert de chaleur par convection sont beaucoup trop nombreuses. Elles interviennent chaque fois que l'on chauffe ou que l'on refroidit un liquide ou un gaz. La convection s'applique même si la surface d'échange n'est pas matérialisée par une paroi, ce

qui est le cas des condenseurs par mélange ou des réfrigérants atmosphériques.

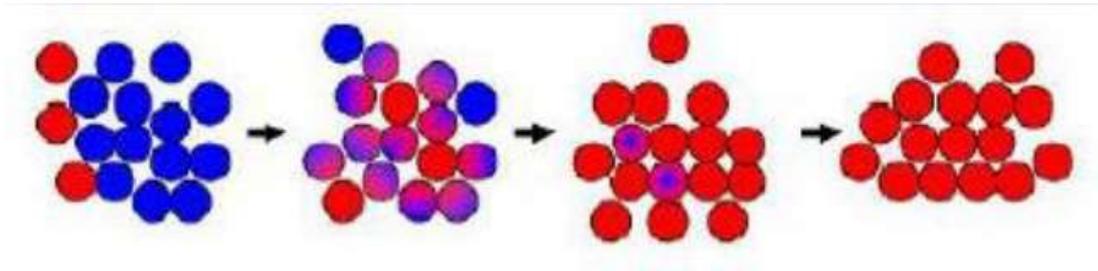


Figure I.3 : Transfert thermique par convection

Il y a deux types de transmission de chaleur par convection : la convection naturelle due à une différence de densité et la convection forcée due à l'action d'appareils mécaniques, tels que pompes ou compresseurs.

- Le flux du transfert de chaleur dépend de la nature chimique du produit.
- Plus la surface d'échange est importante, plus le transfert de chaleur est important.
- Plus l'écoulement est turbulent, plus le transfert de chaleur est rapide [3].

La loi fondamentale de la convection est la loi de NEWTON s'écrit comme suit :

$$\Phi = h \cdot S \cdot \Delta T_{LM} \quad (I.2)$$

Avec :

$\Phi$  : Quantité de chaleur échangée [W].

$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ].

$S$  : Surface d'échange [ $m^2$ ].

$\Delta T_{LM}$  : Différence de température logarithmique moyenne [ $^\circ C$ ] [1].

#### I.4.3. Le Rayonnement :

Un corps chauffé émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit « thermique » est qu'il peut se propager dans le vide. Le rayonnement thermique est caractérisé par une densité d'énergie et un spectre (répartition de l'énergie suivant la longueur d'onde), il se déplace vers les courtes longueurs d'ondes quand la température du corps augmente. Il s'agit du seul mode pouvant se propager dans le vide ; il trouve son origine dans le mouvement des charges électriques présentes dans la matière. Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser. Cependant, dans la pratique, un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu qui l'entoure et, par

conséquent, il reçoit lui-même de l'énergie et sa température atteint un équilibre (exemple : terre et soleil).

Le soleil réchauffe la terre par un rayonnement d'une longueur d'onde ( $\gamma = 400 \text{ nm}$ ) et la terre remet un rayonnement de manière à assurer son équilibre à une température de l'ordre  $300 \text{ K}$  [4].



Figure I.4 : Transfert thermique par rayonnement.

L'équation de base utilisée pour exprimer le rayonnement est la loi de Stefan Boltzmann : [1]

$$\Phi = \sigma \cdot \epsilon \cdot T_p^4 \quad (\text{I. 4})$$

Avec :

$\Phi$  : Quantité de chaleur échangée [W].

$\sigma$  : Constante de Stefan Boltzmann [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ].

$\epsilon$  : Emissivité thermique du matériau.

$T$  : Température du corps [K].

### I.5. Les différents types d'échangeur de chaleur :

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants :

#### I.5.1. Echangeurs à tubes : (monotubes, coaxiaux ou multitubulaires) :

Pour des raisons économiques, les échangeurs qui utilisent des tubes comme composant principal de la paroi d'échange sont les plus courants. On peut distinguer trois catégories selon le nombre de tubes, leur disposition et le fait de toujours faire en sorte que l'utilisation donnée ait la meilleure efficacité :

##### a. Échangeur monotube :

Échangeurs à tube unique ; il est placé à l'intérieur d'un réservoir, généralement, prend la forme d'un serpent [2].

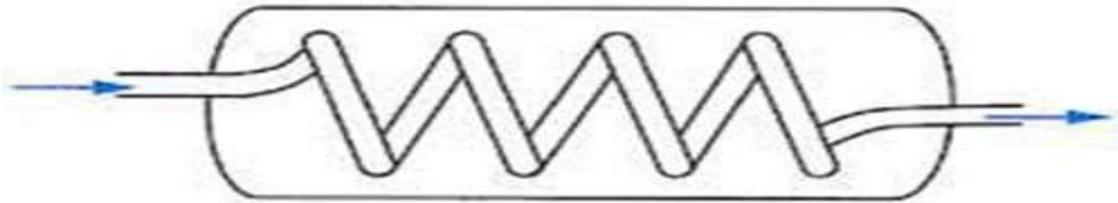


Figure I.5: Échangeur monotube en serpentin.

### b. Échangeur coaxial :

L'échangeur à deux tubes coaxiaux est l'échangeur le plus simple (à sens unique). Le premier fluide s'écoule à travers le tube interne, tandis que l'autre fluide s'écoule dans l'espace annulaire entre les deux tubes. Ces appareils sont intéressants en raison des facilités de démontage et d'entretien qu'ils offrent. Ils peuvent fonctionner à contre-courant pur, ce qui permet d'obtenir de bons rendements. En revanche, ils présentent les inconvénients suivants : risque de fuites aux raccords – flexion du tube intérieur si la longueur est importante -surface d'échange faible. Cet échangeur convient aux produits sales, pour des débits faibles, des températures et des pressions élevées pour les liquides visqueux [3].

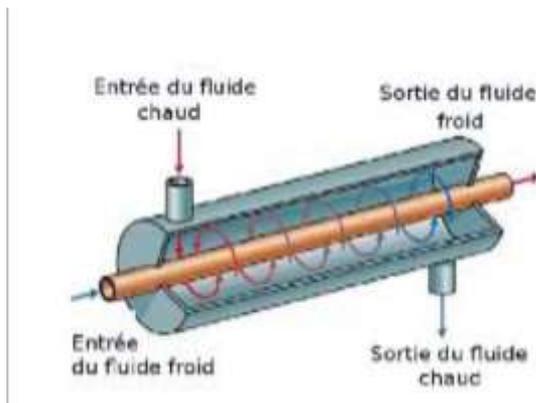


Figure I.6 : Échangeur coaxial.



Figure I.7: Échangeur coaxial.

### c. Échangeur multitubulaire :

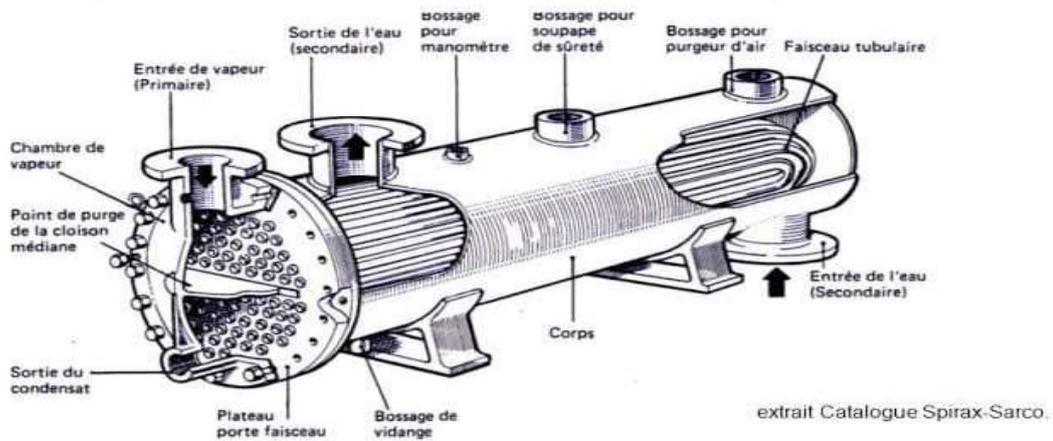


Figure I.8 : Échangeur multitubulaire.

Il existe sous quatre formes :

### c.1. Échangeur à tubes séparés :

À l'intérieur d'un tube de diamètre suffisant se trouvent placés plusieurs tubes de petit diamètre maintenus écartés par des entretoises [2].



Figure I.9 : Échangeur à tube séparés.

### c.2. Échangeur de chaleur à tubes rapprochés :

Échangeur de chaleur à tubes rapprochés : Afin de fixer les tubes entre eux et de fournir des canaux suffisants pour le fluide extérieur au tube, du ruban enroulé en spirale est placé autour de certains d'entre eux.

- Les tubes s'appuient les uns sur les autres par l'intermédiaire des rubans [3].

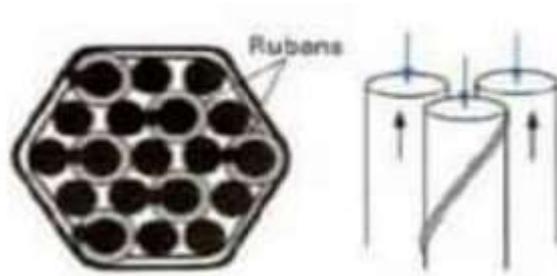


Figure I.10 : échangeur à tubes rapprochés.

### c.3. Échangeur à tubes ailettes :

Il s'agit d'un échangeur de chaleur de type échange liquide-gaz, qui est constitué d'un faisceau de tubes, le liquide à chauffer circule dans le faisceau de tubes, et les gaz d'échappement refroidis s'écoulent au-dessus du faisceau de tubes. Les ailettes fixées sur le tube augmentent la surface d'échange. Il est utilisé pour chauffer de l'eau à diverses fins (eau d'alimentation de chaudière ou eau propre) [3].

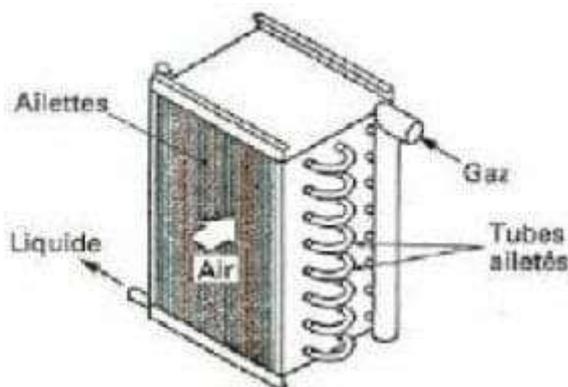


Figure I.11 : Batterie à ailettes.

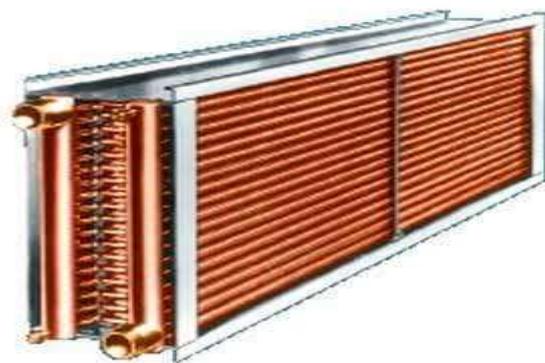


Figure I.12 : Échangeur à tubes ailettes.

### c.4. Échangeur à tubes et calandre :

Un échangeur de chaleur multi-passes peut être comparé à un empilement de plusieurs échangeurs de chaleur à double tube. Il est constitué d'un faisceau de tubes, qui sont enfermés dans une enveloppe cylindrique appelée "calandre". Un des fluides s'écoule à travers le tube et l'autre fluide s'écoule à travers l'enveloppe au-dessus du faisceau de tubes.

L'installation des chicanes permet de mieux rincer tous les tuyaux. Cela facilite le nettoyage de l'échangeur, bien que les tubes eux-mêmes demeurent encore difficile à nettoyer.

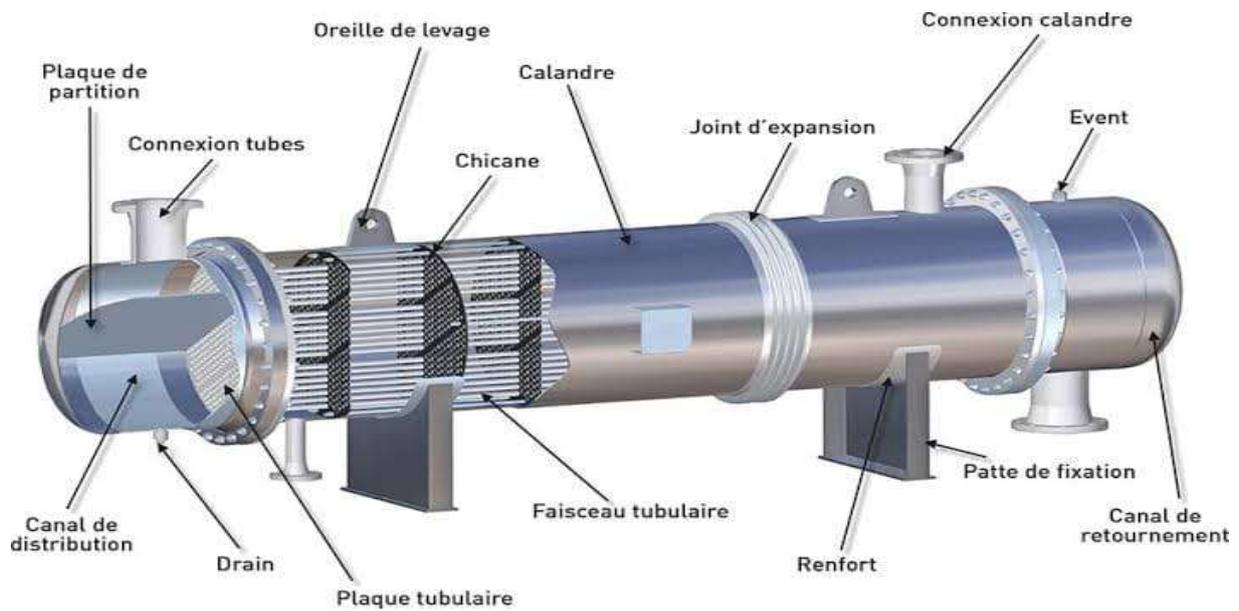


Figure I.13 : Échangeur à tubes et calandre.

### I.5.2. Échangeurs à plaques :

Un échangeur de chaleur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui utilise des plaques métalliques pour transférer la chaleur entre deux fluides.

Ce type d'échangeur fera l'objet de notre étude dans le prochain chapitre.

# **Chapitre II :**

## **Les échangeurs à plaques**

**II.1. Introduction :**

Basé sur le document Plate and Frame Heat Exchanger (1986) ; Gary Hulbert a déclaré que l'idée du premier échangeur de chaleur à plaques connu a été inventé par le Dr Richard Seligman de l'usine d'aluminium et entreprise de navires (La société est maintenant connue dans le monde entier sous le nom d'APV). Le premier développement de l'échangeur de chaleur à plaque était pour la pasteurisation du lait. L'objectif était de pasteuriser le lait pour ralentir la croissance microbienne, ce qui limite encore la propagation des maladies infectieuses. C'est une opération qui nécessite des équipements de transfert de chaleur très efficaces. Cela a conduit à l'invention innovante des échangeurs de chaleur à plaques dans les années 1920 qui a révolutionné le chauffage et le refroidissement indirects des fluides dans le monde manufacturier d'aujourd'hui.

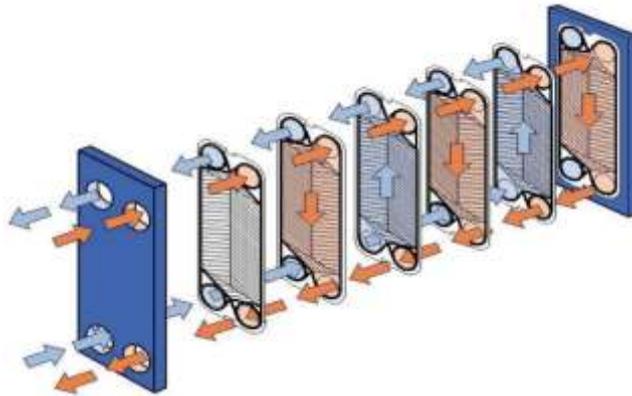
Le développement commercial de l'échangeur de chaleur à plaques résultait essentiellement de la capacité d'obtenir des taux de transfert de chaleur élevés à de faibles températures différentielles ; c'est exactement la caractéristique qui rend l'échangeur de chaleur à plaques si célèbre dans les applications géothermiques [6].

**II.2. Définition :**

Les échangeurs de chaleur à plaques sont des dispositifs qui utilisent des plaques métalliques pour transférer de la chaleur entre deux fluides à différentes températures [5].

**II.3. Principe de fonctionnement :**

Les échangeurs de chaleur à plaques fonctionnent avec le même principe de fonctionnement de base que toute autre échangeur de chaleur dans lequel il y a un transfert de chaleur entre deux ou plusieurs courants de fluide à travers un mur de séparation. Dans le cas d'un échangeur de chaleur à plaques, le transfert de chaleur se fait par la paroi ou plaque de séparation sans mélange des liquides circulant à travers les plaques ou fuites vers l'environnement à l'aide de joints placés sur les bords des plaques, qui scelle chaque unité. De plus, la nature ondulée des plaques fournit un passage approprié à l'écoulement des fluides entre les plaques, il y a donc une efficacité maximum de transfert de chaleur.



**Figure II.1** : Principe de fonctionnement d'un échangeur à plaques.

La figure II.1 ci-dessus montre le principe d'écoulement des échangeurs de chaleur à plaques selon lequel les flux des fluides chauds et froids s'écoulent dans des voies différentes en sens opposé sans se mélanger les uns aux autres. L'échangeur de chaleur à plaque se compose d'un ensemble de plaques métalliques ondulées à joint, pressées ensemble dans un cadre. Les joints sur les coins des plaques forment une série de canaux d'écoulement parallèles, où les fluides s'écoulent alternativement et échangent de la chaleur à travers les minces plaques métalliques. Le nombre de plaques, leur perforation, le type et la position des joints et l'emplacement des raccords d'entrée et de sortie caractérisent la configuration de cet échangeur, qui définit en outre la répartition du flux à l'intérieur du paquet de plaques.

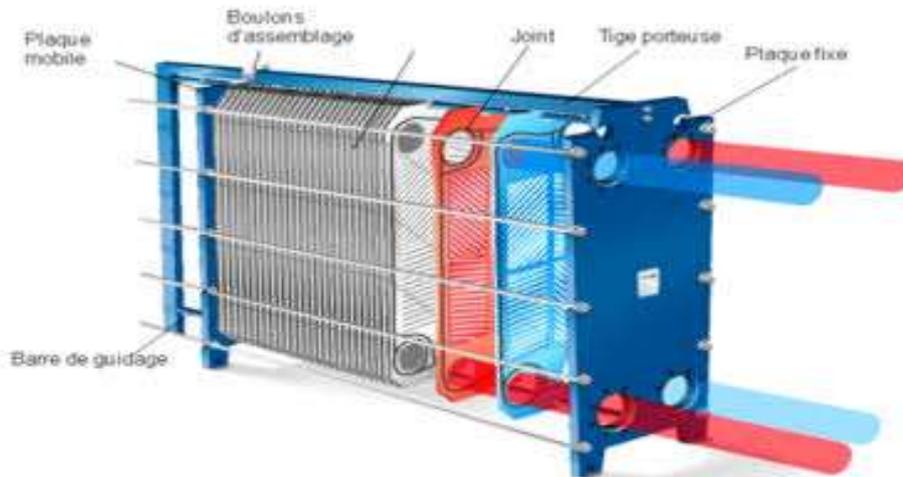
#### **II.4. Classification des échangeurs de chaleur à plaques :**

Les échangeurs de chaleur à plaques peuvent être classés en fonction de leur structure et en particulier de la manière dont les plaques sont fixées ensemble. Cela comprend respectivement les échangeurs de chaleur à plaques scellées, soudées, en spirale, brasées et à lamelles.

##### **II.4.1. Échangeurs de chaleur à plaques et joints :**

Les échangeurs de chaleur à plaques et joints sont constitués d'une série de plaques rectangulaires en métal ondulé ou en alliage, dont les bords sont spécifiquement scellés par des joints et maintenus fermement ensemble dans un cadre, comme illustré dans la figure II.2 ci-dessous. La conception est bien adaptée de telle sorte que le cadre a un couvercle d'extrémité fixe qui est équipé d'orifices de connexion et un couvercle d'extrémité mobile qui peut être une plaque de pression. Les plaques sont généralement suspendues dans le cadre à partir d'une barre de vis de transport supérieure qui est solidement guidée par une barre de transport inférieure, qui soutient et permet un alignement correct de l'ensemble de

l'équipement.



**Figure II.2 :** Echangeur à plaques et joints.

De plus, en raison de la conception de l'échangeur de chaleur à plaques et joints qui a plusieurs pièces mobiles, l'inspection et le nettoyage des plaques sont facilement accessibles, ce qui peut être fait aussi fréquemment que possible étant nécessaires pour optimiser la fonctionnalité de l'équipement. Les joints sont bien imbriqués et intégrés dans les plaques pour empêcher l'éclatement à une différence de pression élevée, car la conception des joints montre qu'ils peuvent comprimer environ 25 % d'épaisseur dans un échangeur de chaleur à plaques boulonnées, ce qui fournit en outre un joint étanche sans aucune distorsion des plaques minces.

Les ports sur chaque coin de la plaque servent de collecteurs dont le joint dirige le flux du fluide tout en servant également de joint principal du système.

#### **II.4.2. Échangeurs de chaleur à plaques soudées :**

Les échangeurs de chaleur à plaques soudées sont construits en soudant les plaques de transfert de chaleur sur les flux de fluide chaud et froid de l'équipement, ce qui réduit

considérablement le coût du soudage de l'ensemble de la plaque. Ce dernier est généralement effectué au laser.



**Figure II.3 :** Section à plaques d'un échangeur de chaleur à plaques soudées.



**Figure II.4 :** Échangeur de chaleur à plaques soudées

La conception de l'échangeur de chaleur à plaques soudées favorise l'utilisation de flux de fluides corrosifs comme fluides chauds ou froids, car le fluide corrosif ne peut pas user et déchirer les plaques de métal ondulé soudées utilisées comme fluides de transfert de chaleur dans ce cas. Ces échangeurs de chaleur sont compacts, très durables et sans joint, ils sont donc capables de fonctionner dans des conditions de température et de pression très élevées. Les matériaux utilisés dans la fabrication des plaques sont l'acier inoxydable, l'hastelloy, les alliages à base de nickel, le titane et cuivre [7].

#### **II.4.3. Échangeurs de chaleur à plaques en spirale :**

L'échangeur de chaleur à plaques en spirale se compose de deux longues bandes de métal ou de tôle d'alliage qui sont généralement soudées avec des goujons pour l'espacement des plaques, qui sont enroulées en hélice pour former une paire de canaux en spirale pour deux flux de fluide. Les matériaux utilisés dans la conception sont l'acier au carbone, l'inox, le titane, l'hastelloy, l'incoloy et les alliages à haute teneur en nickel.



**Figure II.5 :** Échangeur de chaleur à plaques en spirale.

L'échangeur de chaleur à plaques en spirale est largement utilisé lors de l'utilisation de flux de fluide visqueux, de boue et d'encrassement, car les deux plaques métalliques ou en spirale incurvées créent un écoulement turbulent extrêmement élevé dans un modèle à contre-courant. Le taux d'encrassement de l'échangeur de chaleur à plaques en spirale est très faible par rapport aux autres types d'échangeurs de chaleur à plaques utilisés dans les industries manufacturières. La pression de fonctionnement maximale est de 0,6 à 2,5 MPa et la température est limitée à 500°C mais dans certains cas, ils sont conçus pour fonctionner avec une température de 200°C.

#### II.4.4. Échangeurs de chaleur à plaques brasées :

L'échangeur de chaleur à plaques brasées est une conception robuste d'échangeurs de chaleur à plaques, qui se compose de plaques ondulées brasées sous vide à très haute température. La conception crée un équipement compact et étanche, qui n'utilise pas de joints. Elle est très simple car elle est généralement plus petite que les autres types d'échangeurs de chaleur à plaques, ce qui implique que la plus petite taille réduit la teneur en matériau et en fait l'un des équipements de transfert de chaleur les plus économiques.

La conception très compacte de l'échangeur de chaleur à plaques brasées le rend extrêmement efficace, facile à installer et à gérer par rapport aux autres types d'échangeurs de chaleur. L'échangeur de chaleur à plaques brasées a une très haute résistance à la corrosion et peut fonctionner avec une température comprise entre -195°C et 400°C avec une pression de fonctionnement de près de 50 bars.



Figure II.6 : Échangeur de chaleur à plaques brasées.

Les échangeurs de chaleur à plaques brasées sont généralement nettoyés chimiquement en raison de leur conception compacte, ce qui rend difficile le démontage des plaques pour l'inspection et le nettoyage. Ils sont largement utilisés dans les systèmes de chauffage urbain de l'eau, les installations d'équipement de centrales électriques comme les refroidisseurs et les compresseurs.

**II.4.5. Échangeurs de chaleur à lamelles :**

L'échangeur de chaleur à lamelles est composé d'un ensemble de plaques minces soudées parallèlement, qui forment un canal rectangulaire lorsqu'elles sont placées longitudinalement dans une coque. Les lamelles sont des paires de fines plaques plates généralement équipées de joints pour éviter les fuites. Ce type d'échangeur de chaleur à plaques est fréquemment utilisé par les industries de la pâte à papier et des procédés chimiques pour récupérer la chaleur de procédé. Les pressions de fonctionnement vont jusqu'à 3,45 MPa et les limites de température sont comprises entre 200 °C et 500 °C.

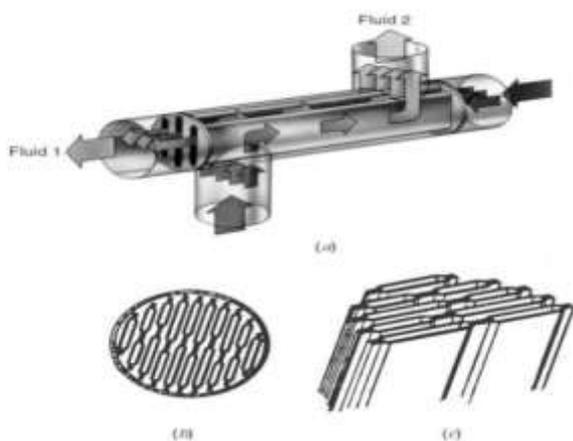


Figure II.7 : Coupe transversale de l'échangeur de chaleur à lamelles montrant les lamelles.



Figure II.8 : Echangeur à lamelles.

**II.5. Utilisation des échangeurs de chaleur à plaques : [5]**



Nourriture et boissons :

Laitier	Boisson non-alcoolisée	Traitement des jus/fruits
Pasteurisation du lait ou de la crème	Pasteurisation du sirop	Pasteurisation de jus
Réception du lait	Chauffage à l'eau	Pasteurisation du nectar
Traitement du lait de culture (traitement à la crème glacée ou au fromage)	Dissolution du sucre	Pasteurisation des concentrés



### Pétrole / Traitement chimique :

Raffinerie	Gaz de pétrole	Déshydratation	Désulfuration
Refroidissement de saumure	Refroidisseurs d'eau de mer	Refroidissement/échange de pétrole brut	Échangeur et refroidisseur de fluide pauvre/riche
Échangeur de pétrole brut/eau	Traitement thermique du pétrole brut	Échangeur de pétrole brut/eau	Condenseur de gaz acide



### Traitement des hydrocarbures :

Méthanol	Oxyde de propylène	Éthylène-Propylène	Formaldéhyde
Préchauffage de l'eau	Refroidissement à l'hydroxyde de sodium	Refroidissement et chauffage par eau	Préchauffage du méthanol
Eau froide	Refroidissement du mélange réactionnel	Condenseurs et refroidisseurs de propylène	Refroidissement au formol
Refroidissement de produit liquide	Récupération de la chaleur	Préchauffage du naphta	Eau froide

## **II.6. La maintenance d'un échangeur de chaleur à plaques :**

Elle repose principalement sur l'entretien de ces derniers, afin de conserver un niveau de performance énergétique intéressant.

Il existe trois manières de nettoyer les plaques de l'échangeur de chaleur à plaque :

### **II.6.1. Le nettoyage avec l'échangeur fermé :**

Dans ce cas, il suffit de faire circuler une solution de nettoyage (il en existe plusieurs types) dans le circuit échangeur, à la place des fluides de fonctionnement habituels. La solution doit circuler dans l'échangeur, puis faire circuler de l'eau jusqu'à ce que le produit de nettoyage soit complètement éliminé [7].

### **II.6.2. Le nettoyage manuel des plaques :**

Nettoyer les plaques sorties de l'échangeur en utilisant de l'eau tiède et une brosse en nylon. Si cela ne suffit pas, utiliser un jet haute pression en limitant la pression à 30 bars et en

veillant à ce que le jet soit perpendiculaire à la plaque [7].

### II.6.3. Le nettoyage dans une cuve :

Parfois, l'entretien de l'échangeur de chaleur à plaques nécessite que les plaques soient immergées dans le réservoir d'eau. S'il est nécessaire d'éliminer le tartre, il est possible d'utiliser de l'acide nitrique à 4 % et une température de 60°C ou de la soude caustique à 4% pour éliminer les graisses ou les croûtes bactériennes [7].

### II.7. Avantages des échangeurs de chaleur à plaques :

- **Compacité :** Les unités d'un échangeur de chaleur à plaques occupent moins d'espace et de charge au sol en ayant une grande surface formée à partir d'un petit volume. Ceci produit à son tour un coefficient de transfert de chaleur global élevé en raison du transfert de chaleur associé aux passages étroits et aux surfaces ondulées.
- **Flexibilité :** Des modifications peuvent être apportées aux performances de l'échangeur de chaleur en utilisant une large gamme de fluides et de conditions qui peuvent être modifiées pour s'adapter aux différentes spécifications de conception. Ces spécifications peuvent être adaptées à différentes ondulations des plaques.
- **Faibles coûts de fabrication :** Les plaques soudées sont relativement plus chères que les plaques pressées. Les échangeurs de chaleur à plaques sont fabriqués à partir de plaques pressées, ce qui permet une plus grande résistance à la corrosion et aux réactions chimiques.
- **Facilité de nettoyage :** L'échangeur de chaleur peut être facilement démonté pour l'inspection et le nettoyage et les plaques sont également facilement remplaçables car elles peuvent être retirées et remplacées individuellement.
- **Contrôle de la température :** L'échangeur de chaleur à plaques peut fonctionner avec des différences de température relativement faibles. C'est un avantage lorsque les températures élevées doivent être évitées. La surchauffe locale et la possibilité de zones stagnantes peuvent également être réduites par la forme du passage d'écoulement.

Pour plus définir les avantages de l'échangeur à plaque le tableau ci-dessous montre une comparaison entre ce dernier et l'échangeur de chaleur à tube et calandre.

	A plaque	Tube et calandre
Croix de température	Impossible	Possible
Devoir multiple	Possible	Impossible
Détection de fuite	Facile à détecter	Difficile à détecter
Temps de démontage	15min	60-90min

**Tableau II.1** : Comparaison entre l'échangeur de chaleur à plaque et tube et calandre [8].

### II.8. Inconvénients des échangeurs de chaleur à plaques :

- La principale faiblesse de l'échangeur de chaleur à plaques est la nécessité de longs joints qui maintiennent les plaques ensemble. Bien que ces joints soient considérés comme un inconvénient, les échangeurs de chaleur à plaques et châssis ont été utilisés avec succès à des températures et des pressions élevées. Il y a un risque de fuite. Les fuites qui se produisent sont envoyées dans l'atmosphère et non entre les flux de processus.
- La chute de pression qui se produit à travers un échangeur de chaleur à plaques est relativement élevée et les coûts de fonctionnement et le capital du système de pompage doivent être pris en compte.
- Lorsqu'une perte de confinement ou une perte de pression se produit, le nettoyage et la réinitialisation de ce type d'échangeur peuvent être longs car des centaines de plaques sont courantes dans les grandes constructions.
- L'espacement étroit entre les plaques peut être bloqué par des contaminants particuliers dans le fluide, par exemple des particules d'oxyde et de boue trouvées dans les systèmes de chauffage central.
- Pour la raison ci-dessus, la plupart des fabricants ne garantissent leurs unités que pendant 12 mois. De plus, les ensembles de plaques et de joints de remplacement peuvent représenter autant que la plaque à acheter initialement.

**II.9. Conclusion :**

Les échangeurs de chaleur à plaques utilisent des plaques métalliques pour transférer de la chaleur entre deux fluides. Ces plaques en métal créent une plus grande surface de transfert de chaleur, augmentant ainsi la capacité d'échange de chaleur.

Les échangeurs de chaleur à plaques sont toujours considérés comme une meilleure option que les autres types d'échangeurs de chaleur en raison de leur efficacité, leur conception compacte et robuste ce qui rend l'inspection, la maintenance et le nettoyage facile.

# **Chapitre III :**

## **Les plans d'expériences**

**III.1 Introduction :**

Le plan d'expérience est une technique puissante qui a été initialement développé par Sir RA Fisher à Rothamsted Agricultural Station en Angleterre au début des années 1920. Son émergence a marqué un changement significatif de la vieille tradition « scientifique » consistant à faire varier un seul paramètre à la fois à l'examen simultané des paramètres étudiés afin d'évaluer leurs divers effets d'interaction. Il permet d'améliorer la qualité des produits ou des processus et réduire la variabilité de leurs mesures de performance autour du niveau ciblé de manière efficace. C'est une bonne approche pour explorer, comprendre et établir la relation causale entre les paramètres du système et leurs mesures de performance. L'exécution d'une expérience implique de modifier délibérément les paramètres connus ou du moins supposés affecter les performances d'un processus étudié afin que les connaissances sur leurs performances puissent être obtenues, étendues ou vérifiées. Depuis son évolution le plan d'expérience a connu un développement remarquable concernant ses aspects de conception et d'analyse de données [8].

**III.2. Qu'est-ce que le plan expérimental statistique ?**

Le plan d'expériences est défini comme une branche des statistiques appliquées qui traite de la planification, de l'analyse et de l'interprétation de tests contrôlés pour évaluer les facteurs qui contrôlent la valeur d'un paramètre ou d'un groupe de paramètres. Le plan d'expérience est un puissant outil de collecte et d'analyse de données qui peut être utilisé dans diverses situations expérimentales. Il permet de manipuler plusieurs facteurs d'entrée, en déterminant leur effet sur un résultat souhaité (réponse). En manipulant plusieurs entrées en même temps, le plan d'expérience peut identifier les interactions importantes qui peuvent être manquées lors de l'expérimentation d'un facteur à la fois. Toutes les combinaisons possibles peuvent être étudiées (factorielle complète) ou seulement une partie des combinaisons possibles (factorielle fractionnaire).

Comme c'est inévitable pour tout sujet, certains termes sont utilisés pour parler du plan d'expérience. Puisque ceux-ci seront utilisés tout au long du reste de cette thèse, les plus importants seront maintenant expliqués [9].

**III.2.1. La réponse :** est le résultat expérimental correspondant à la mise en place du paramètre du processus [11].

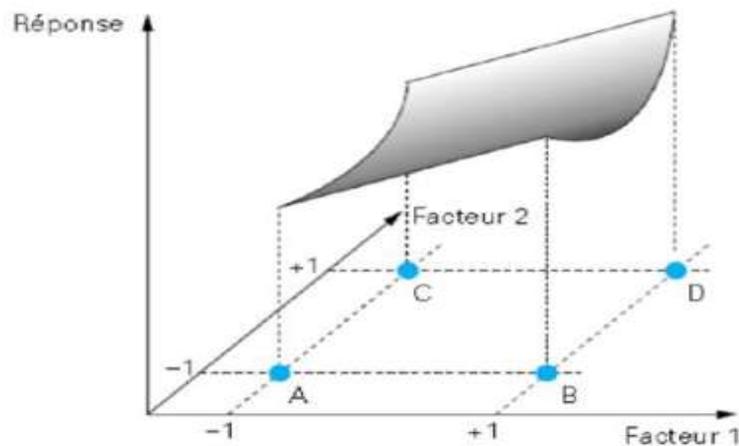


Figure III. 1 : la surface de réponse correspondant à tous les points du domaine d'étude.

**III.2.2. Les facteurs :** sont les paramètres du processus qui devraient avoir une certaine influence sur la réponse. Ils peuvent être quantitatifs ou mesurables (par exemple, température, pression, temps, etc.) ou qualitatifs ou catégoriels (par exemple, différents fournisseurs de matériaux, ou présence/absence d'un attribut, etc.). Les facteurs peuvent être classés comme conception/contrôle ou nuisance/bruit. Les premiers sont ceux qui peuvent être facilement contrôlés non seulement lors de l'expérimentation mais aussi dans les opérations quotidiennes, tandis que les seconds sont ceux qui sont difficiles ou impossibles à contrôler ou ceux qui varient au cours de l'utilisation du produit ou du processus, tels que la température et l'humidité ambiantes. Dans ce travail, les termes facteur et paramètre seront utilisés de manière interchangeable [10].

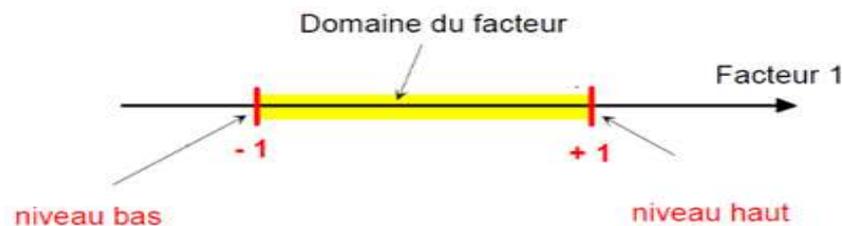
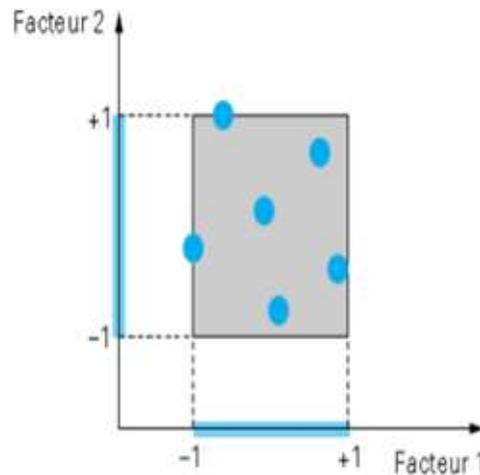


Figure III. 2 : le domaine et les niveaux d'un facteur.

La combinaison du champ de chaque facteur définit le "domaine d'étude". Ce domaine de recherche fait partie de l'espace expérimental réservé par les expérimentateurs aux tests. Une étude, un ensemble d'expériences clairement définies, est représentée par une série de points

disposés dans la zone d'étude. Cette façon de représenter une expérience avec un ensemble de points dans l'espace cartésien est une représentation géométrique de la recherche.



**Figure III.3:** la disposition des points expérimentaux dans le domaine d'étude.

Chaque point du champ de recherche correspond à une réponse. L'ensemble de tous les points du domaine de recherche correspond à un ensemble de réponses situées sur une surface appelée « surface de réponse ».

**III.2.3. Les niveaux :** sont les valeurs qu'un facteur peut assumer ou prendre ; ils sont parfois appelés traitements, en particulier dans les expériences agricoles, médicales et biologiques. Les plans les plus simples n'utilisent que deux niveaux de chaque facteur. En l'absence de réponses non linéaires, cela fournira généralement les informations nécessaires de la manière la plus efficace. Les niveaux peuvent être fixes, c'est-à-dire des niveaux d'intérêt spécifiques ; ce qui signifie que les inférences statistiques faites sur les facteurs sont confinées à ces valeurs spécifiques, ou elles peuvent être aléatoires, c'est-à-dire choisies au hasard parmi une population plus large de niveaux possibles. Dans ce cas, l'expérimentateur peut tirer des conclusions sur l'ensemble de la population de niveaux, pas seulement ceux qui ont été utilisés dans la conception expérimentale [10].

**III.2.4. L'effet :** est la variation de la réponse moyenne rendue par une variation des niveaux d'un facteur. Ceci est souvent appelé un effet principal car il fait référence aux principaux facteurs d'intérêt dans l'expérience [10].

**III.2.5. L'interaction :**

Est la différence de réponse entre les niveaux d'un facteur qui n'est pas le même à tous les niveaux des autres facteurs [10].

### III.2.6. Modélisation mathématique :

Afin de corréler la réponse de l'expérience avec les facteurs, un modèle mathématique de type polynomial est utilisé. Il existe plusieurs autres modèles, mais l'avantage du modèle polynomial est qu'il peut être résolu en utilisant l'algèbre matricielle. Le modèle polynomial est un outil d'approximation de la fonction de réponse dans le domaine de la recherche [9].

La relation mathématique polynomiale s'écrit sous la forme suivante :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots$$

### III.3. Principe des plans d'expériences :

La conception de la technique expérimentale consiste à modifier le niveau d'un ou plusieurs facteurs (variables, discrets ou continus) en même temps dans chaque test. En détectant l'interaction entre le facteur et la réponse optimale, cela réduira considérablement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés et rendre les résultats faciles à modéliser. Par conséquent, la subtilité de l'utilisation de la conception expérimentale est de réduire autant que possible le nombre d'expériences à effectuer sans sacrifier la précision des résultats [9].

### III.4. Les étapes d'une étude par les plans d'expériences :

Toute expérience doit faire l'objet d'un plan précis sous la forme d'un plan expérimental ou d'un protocole expérimental. Son étude peut être décomposée en différentes étapes.

#### III.4.1. Définition des objectifs et des réponses :

Compte tenu de l'objectif à atteindre, nous devons d'abord lister les réponses expérimentales qui peuvent être étudiées. Cette étape peut également déterminer les moyens et le budget nécessaires à la recherche.

#### III.4.2. Choix des facteurs et du domaine expérimental :

C'est de loin l'étape la plus importante dans la gestion du plan, Il va falloir :

- ❖ Sélectionner les paramètres, ainsi que les modes et interactions à étudier.
- ❖ Identifier les paramètres qui peuvent affecter la réponse.
- ❖ Identifier les interactions qui peuvent être recherchées.
- ❖ Étudier chaque facteur [11].

#### III.4.3. Proposition d'un modèle :

Le plan le mieux adapté à la situation sera retenu. La conception doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ❖ Il doit être hautement représentatif de la réponse expérimentale étudiée dans le domaine expérimental d'intérêt.
- ❖ Considérez la valeur de réponse de l'étude dans une estimation de qualité acceptable.

#### **III.4.4. Estimation des coefficients du modèle :**

La valeur de la réponse expérimentale doit être de qualité acceptable en tout point du domaine expérimental d'intérêt.

#### **III.4.5. Validation du modèle :**

Il y a deux possibilités : Soit le modèle est validé, ce qui voudrait dire qu'il représente assez bien le phénomène étudié dans le domaine expérimental, dans ce cas, le but est atteint : on peut utiliser ce modèle pour faire des prédictions à n'importe quel point du domaine expérimental.

Soit le modèle n'a pas été validé et donc son utilisation est impossible. Par conséquent, il faudrait procéder à la proposition d'un modèle différent [10].

#### **III.4.6. Mise en œuvre et suivi :**

- ❖ La réponse peut être calculée dans le domaine expérimental.
- ❖ A partir du modèle de calcul, on peut prédire le résultat correspondant à la meilleure configuration du produit ou du procédé.

### **III.5. Différents types des plans d'expériences :**

Le plan expérimental est principalement divisé en trois séries : le plan mélanges, le plan de modélisation (surface de réponse) et le plan factoriel [10].

#### **III.5.1. Plans factoriels :**

Le but de ces plans est de révéler les facteurs qui ont le plus d'impact sur une réponse donnée. Parmi les plans proposés : plan factoriel complet [11].

##### **III.5.1.1. Plans factoriels complets :**

Le plan factoriel complet en tant que plan expérimental est dérivé des travaux de R.A. Fischer. Les avantages de la conception factorielle complète sont nombreux :

- Seuls deux niveaux sont requis pour chaque facteur, le test est facile à contrôler et le risque d'erreur est minimisé.
- Un plan factoriel complet est le meilleur plan d'expérience. Il traite toutes les combinaisons possibles de niveaux de facteurs et garantit que nous obtenons les meilleurs résultats.

- La modélisation mathématique est instantanée [10].

**III.6. Conclusion :**

La méthode du plan d'expérience qui est composé de plusieurs types, est proposée pour améliorer l'étude et gagner du temps. Elle nécessite quelques essais d'expériences en faisant varier les paramètres d'entrée et en mesurant les facteurs de sortie concernés pour chaque cas.

**Chapitre IV :**  
**Optimisation d'un échangeur à plaque**

### IV.1. Description du problème : [12]

Nous souhaitons améliorer les performances d'un échangeur de chaleur. L'échangeur est composé d'un grand nombre de parties élémentaires aussi bien situées les unes à côté des autres que les unes au-dessus des autres. Pour simplifier la compréhension du problème nous nous restreignons à qu'une seule partie élémentaire. On distingue donc deux parties :

- Une plaque supérieure dont la température est imposée à  $T=350\text{K}$ . il s'agit de la température du premier fluide.
- Un canal situé entre les deux plaques. Il s'agit des canaux où circule l'air à une température également imposé de  $T=300\text{K}$ .

Le but de l'étude est de maximiser la puissance thermique échangée entre les deux fluides tout en imposant une perte de charge fixe (perte de charge suite au passage de l'air dans les canaux).

Pour cela nous allons étudier l'influence de plusieurs paramètres de l'échangeur. Le but étant de les faire varier afin de trouver la combinaison permettant l'optimisation de l'échangeur.

Notre réponse est donc la puissance thermique. Les facteurs sont :

Facteur	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Dimension caractéristique des canaux	1 mm	2 mm
Profondeur de l'échangeur	9 mm	18 mm
Vitesse de l'écoulement	1 m/s	2 m/s
Conductivité thermique des ailettes	PVC : 0.2 W/mK	Aluminium : 237 W/mK

**Tableau IV.1** : Tableau des facteurs étudiés

Pour faire notre étude, on a utilisé le logiciel nommée Minitab

**Minitab** : est un logiciel qui fournit une approche simple pour saisir des données statistiques, identifier leurs modèles et les analyser [11].

La matrice est représentée comme suit :

N	X1	X2	X3	X4
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

#### IV.2. Récapitulatif du modèle :

La valeur du coefficient de détermination  $R^2$  qui est le pourcentage de variation de la variable de réponse qui est expliqué par un modèle linéaire est de 100 % ce qui signifie que le modèle explique toute la variabilité des données de réponse autour de sa moyenne, il n'y a pas de manque d'ajustement.

#### IV.3. L'équation de régression :

L'équation de régression obtenu est la suivante :

$$\begin{aligned}
 \text{Puissance} &= -0,02481 + 0,01210 \text{ Dim} + 0,004774 \text{ P} + 0,009701 \text{ V} + 0,000063 \text{ C} \\
 \text{ther} &- 0,001499 \text{ Dim*P} - 0,003598 \text{ Dim*V} + 0,000012 \text{ Dim*C} - 0,001066 \text{ P*V} \\
 &+ 0,000018 \text{ P*C} - 0,000006 \text{ V*C} + 0,000300 \text{ Dim*P*V} - \\
 &0,000007 \text{ Dim*P*C} \\
 &- 0,000010 \text{ Dim*V*C} - 0,000004 \text{ P*V*C} + 0,000001 \text{ Dim*P*V*C}
 \end{aligned}$$

## IV.4. Diagramme de Pareto des effets :

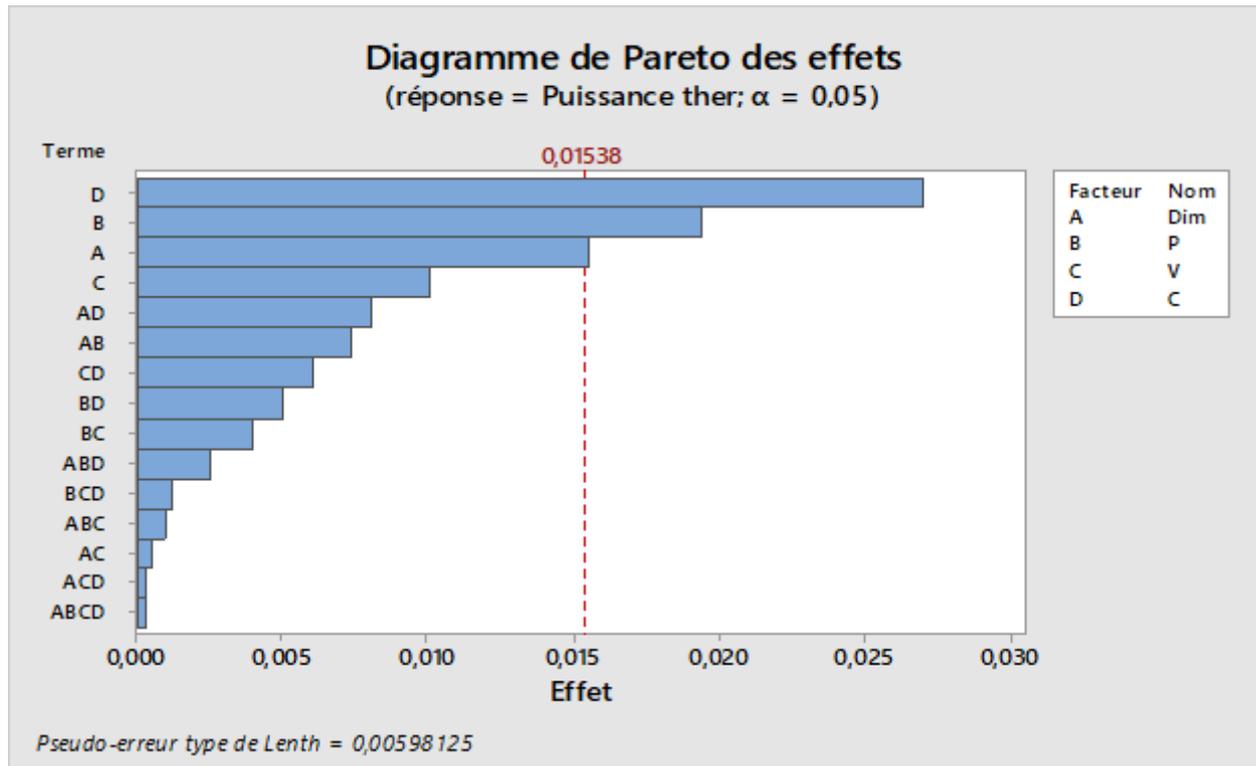


Figure IV.1 : Diagramme de Pareto des effets

## IV.4.1. Interprétation du diagramme :

Le diagramme de Pareto qui est l'un des moyens simples pour classer les paramètres par ordre d'importance, indique que conductivité thermique des ailettes est le facteur le plus significatif au seuil 0.05, vient ensuite la profondeur de l'échangeur ainsi que la dimension caractéristique des canaux. Ces derniers coupent la ligne de référence à 0.01538.

## IV.5. Analyse des variances :

	P	F	Remarque
Dimension caractéristique des canaux	0.144	2.39	Non significatif
Profondeur de l'échangeur	0.061	4.14	Non significatif
Vitesse de l'écoulement	0.353	0.92	Non significatif
Conductivité thermique des ailettes	0.005	10.94	Significatif

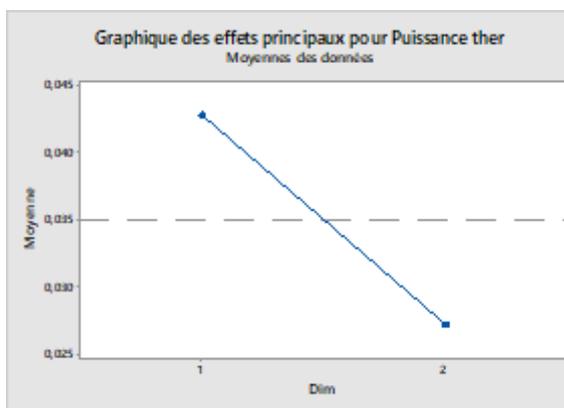
Tableau IV.2 : l'analyse des variances

**Remarque :** l'analyse de variance des quatre facteurs indique que le facteur le plus significatif est la conductivité thermique ( $p < 0.05$ ).

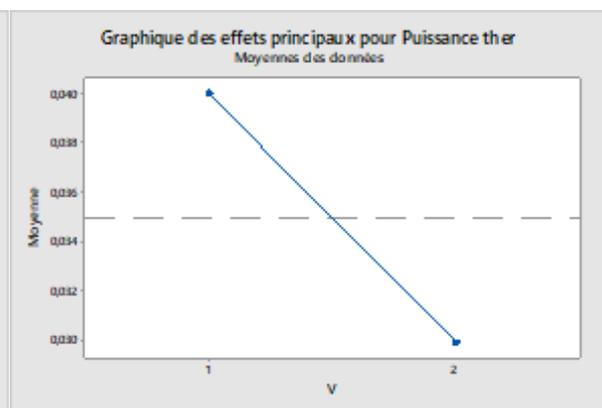
- Cette analyse ne fait que confirmé le résultat obtenu grâce au diagramme de Pareto.

#### IV.6. Graphique des effets principaux :

Un graphique des effets principaux est un graphique des valeurs de réponse moyennes à chaque niveau d'un paramètre de conception ou d'une variable de processus. On utilise ce graphique pour déterminer l'influence des facteurs sur la réponse.

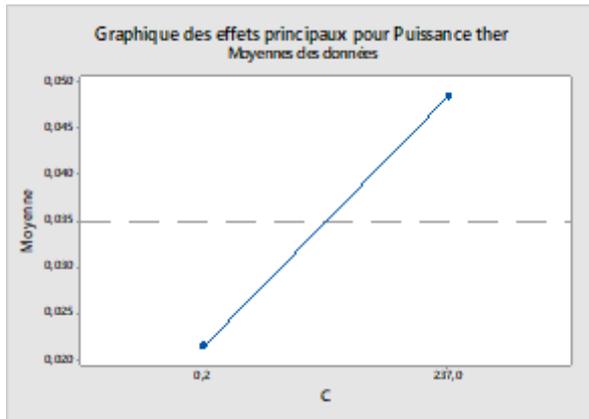


**Figure IV.2 :** Graphique des effets principaux  
(en fonction de la dimension des canaux)

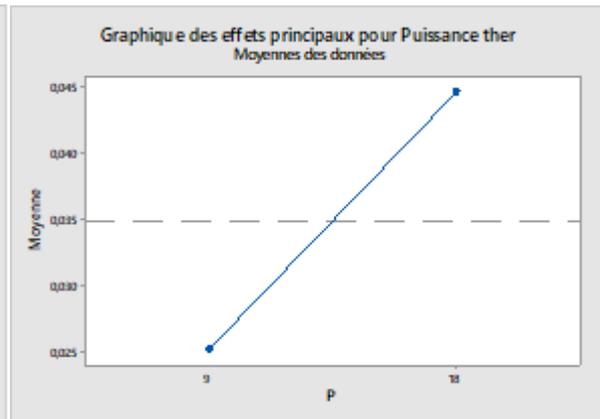


**Figure IV.3 :** Graphique des effets principaux  
(en fonction de la vitesse d'écoulement)

En observant les deux graphiques des effets principaux ci-dessous (**Figure IV.2**, **Figure IV.3**) de la moyenne en fonction de la dimension caractéristique des canaux ainsi qu'en fonction de la vitesse de l'écoulement, on constate que ces deux derniers ont un effet global négatif, ce qui signifie qu'en utilisant une grande dimension caractéristique des canaux ou en augmentant la vitesse de l'écoulement, la puissance thermique diminue.



**Figure IV.4 :** Graphique des effets principaux  
(en fonction de la conductivité thermique)

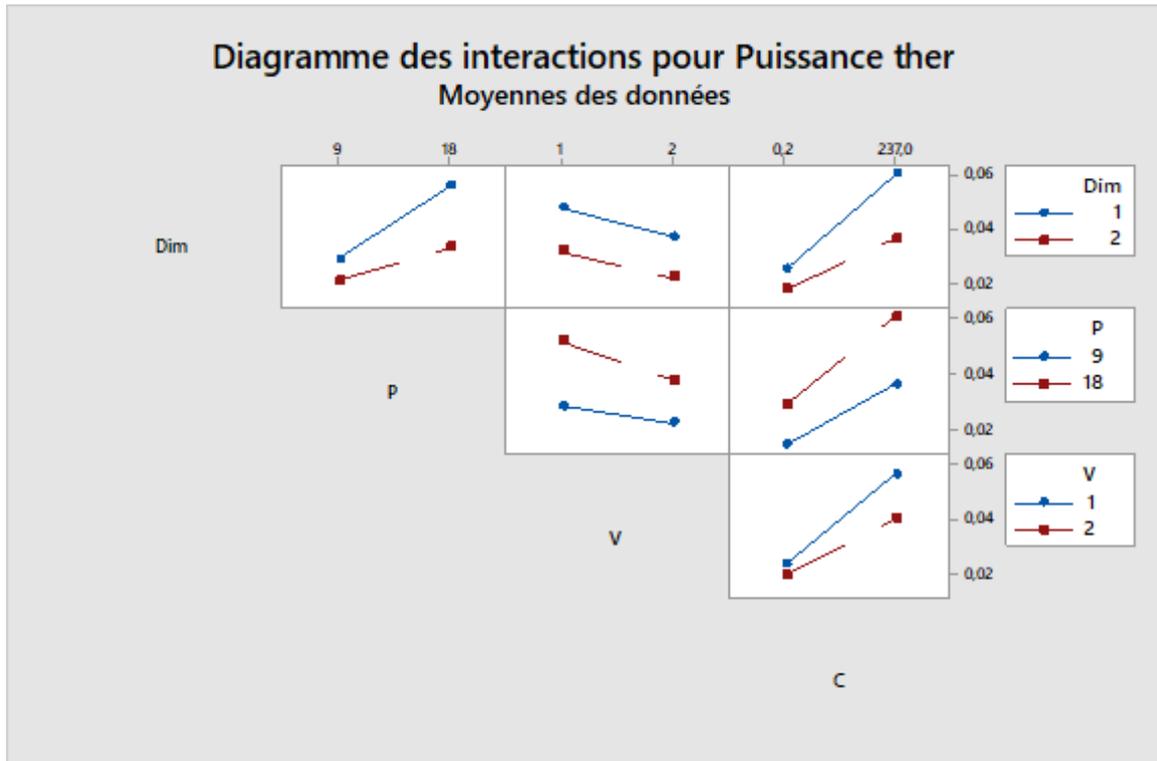


**Figure IV.5 :** Graphique des effets principaux  
(en fonction de la profondeur de l'échangeur)

Tandis que les deux graphiques représentant la moyenne, l'un en fonction de la conductivité thermique des ailettes et l'autre en fonction de la profondeur de l'échangeur figurant ci-dessous (**Figure IV.4**, **Figure IV.5**) montre que ces deux derniers ont un effet globale positif, ce qui signifie qu'en augmentant la profondeur de l'échangeur ou la conductivité thermique des ailettes, la puissance thermique augmente à son tour.

#### **IV.7. Diagramme des interactions :**

Le diagramme des interactions permet de déterminer comment la relation entre un facteur et une réponse continue dépend de la valeur du deuxième facteur.



**Figure IV.6 :** Diagramme des interactions

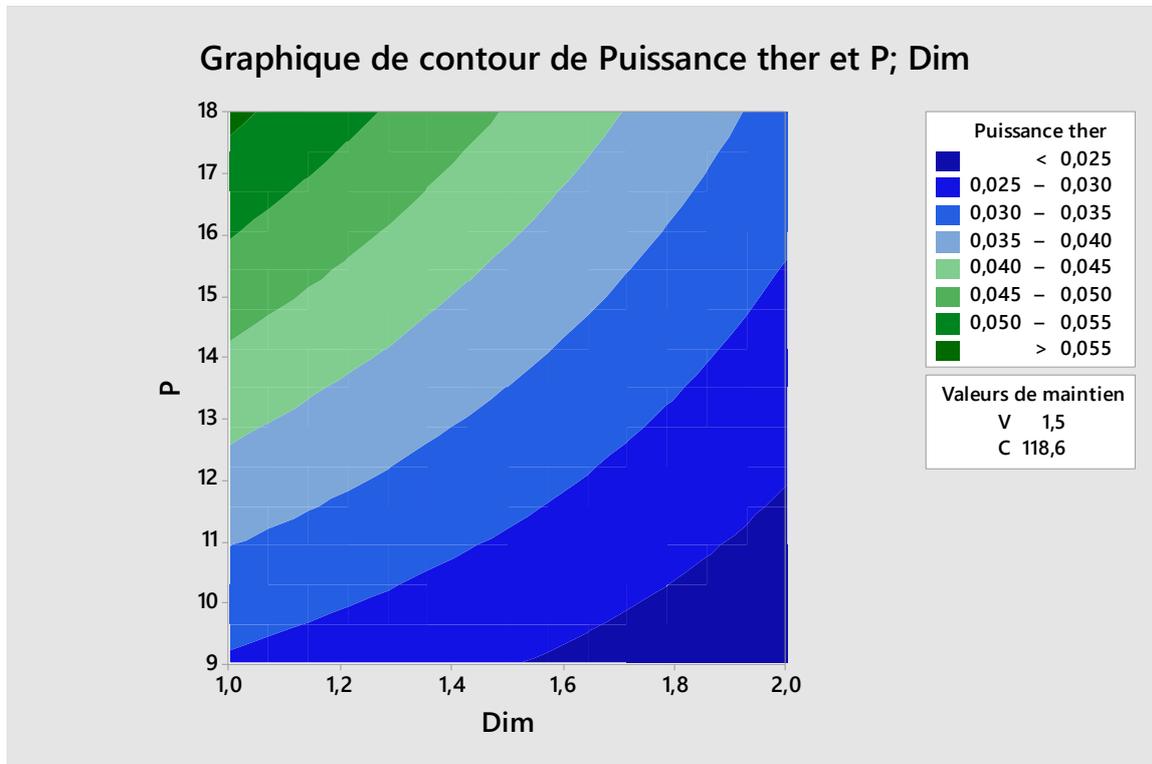
Il ressort clairement du graphique des interactions illustré dans la figure IV.6 qu'il y a une interaction entre la profondeur de l'échangeur et la dimension caractéristique des canaux (si la profondeur est de 18 mm, la dimension caractéristique des canaux d'un mm est associée à la plus forte valeur de la puissance thermique), la conductivité thermique des ailettes et la dimension caractéristique des canaux, et de même qu'entre la conductivité thermique des ailettes et la vitesse de l'écoulement, une légère interaction aussi est observée entre la profondeur de l'échangeur et la vitesse de l'écoulement, ainsi qu'entre la conductivité thermique des ailettes et la profondeur de l'échangeur (si on utilise une conductivité à 237 W/mK, la profondeur de 18 mm est associée à la plus forte valeur de la puissance thermique), tandis qu'il n'y a aucune interaction entre la vitesse de l'écoulement et la dimension caractéristique des canaux.

**Remarque :** le modèle général indique que là où il y a interaction entre les facteurs, celle-ci est significative.

#### IV.8. Les graphiques de contour :

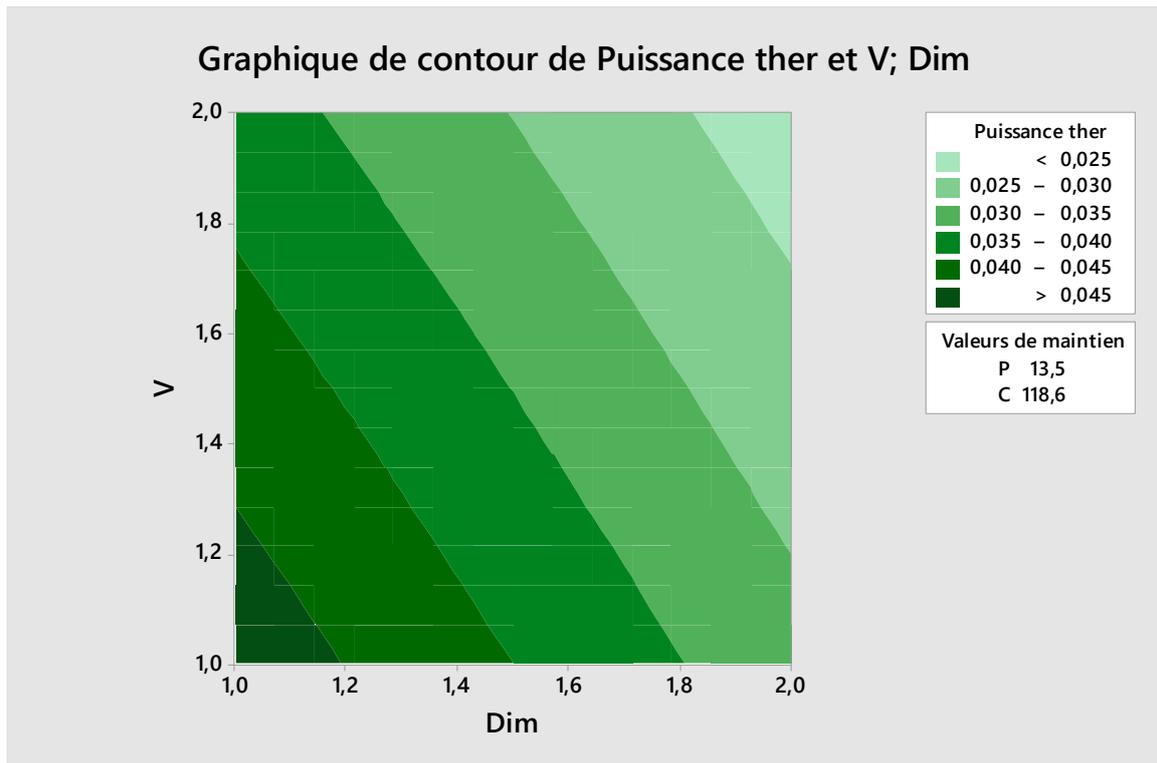
Le graphique de contour montre comment une variable de réponse se rapporte à deux variables continues basées sur une équation de modèle, autrement dit le tracé de contour

représente, en deux dimensions, la relation fonctionnelle entre la réponse et les variables. Les points qui ont la même réponse sont connectés pour produire des lignes de contour de réponses constantes.



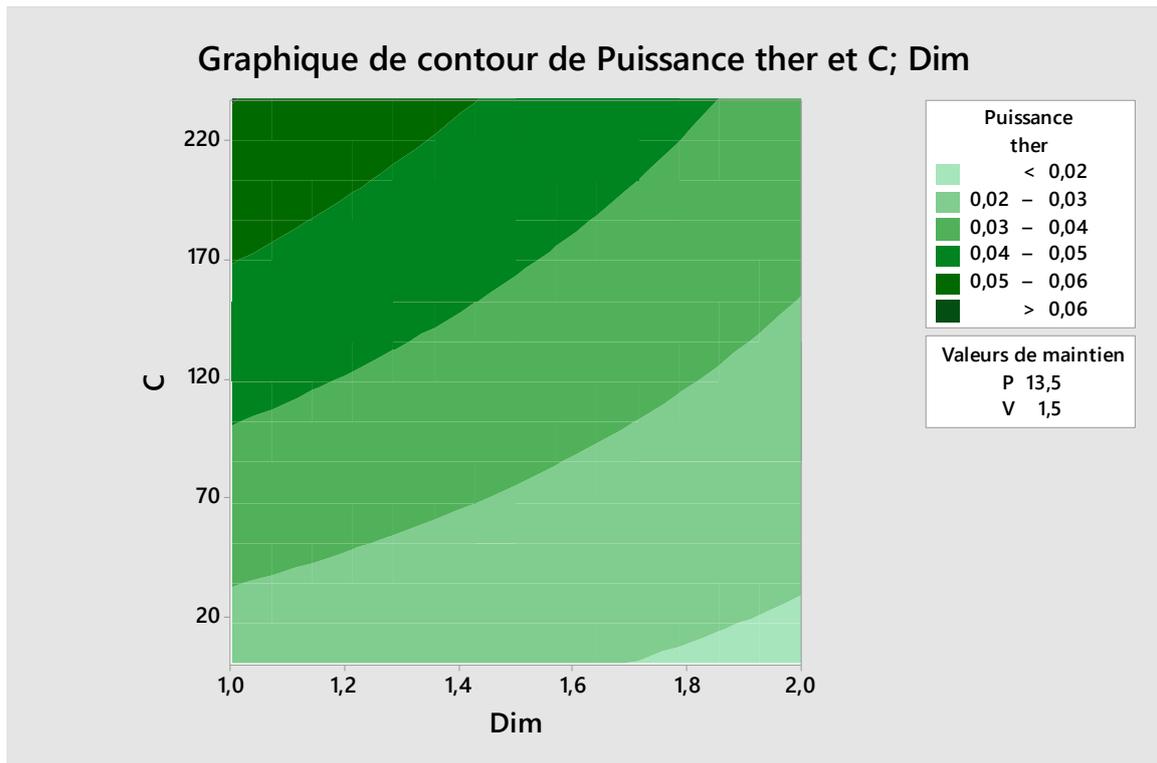
**Figure IV.7 :** Graphique de contour de la profondeur de l'échangeur, de la dimension caractéristique des canaux en fonction de la puissance thermique

Ce graphique (**Figure IV.7**) indique comment la profondeur de l'échangeur et la dimension caractéristique des canaux sont liées à la puissance thermique : plus la profondeur est grande et plus la dimension caractéristique des canaux diminue, plus la puissance thermique augmente.



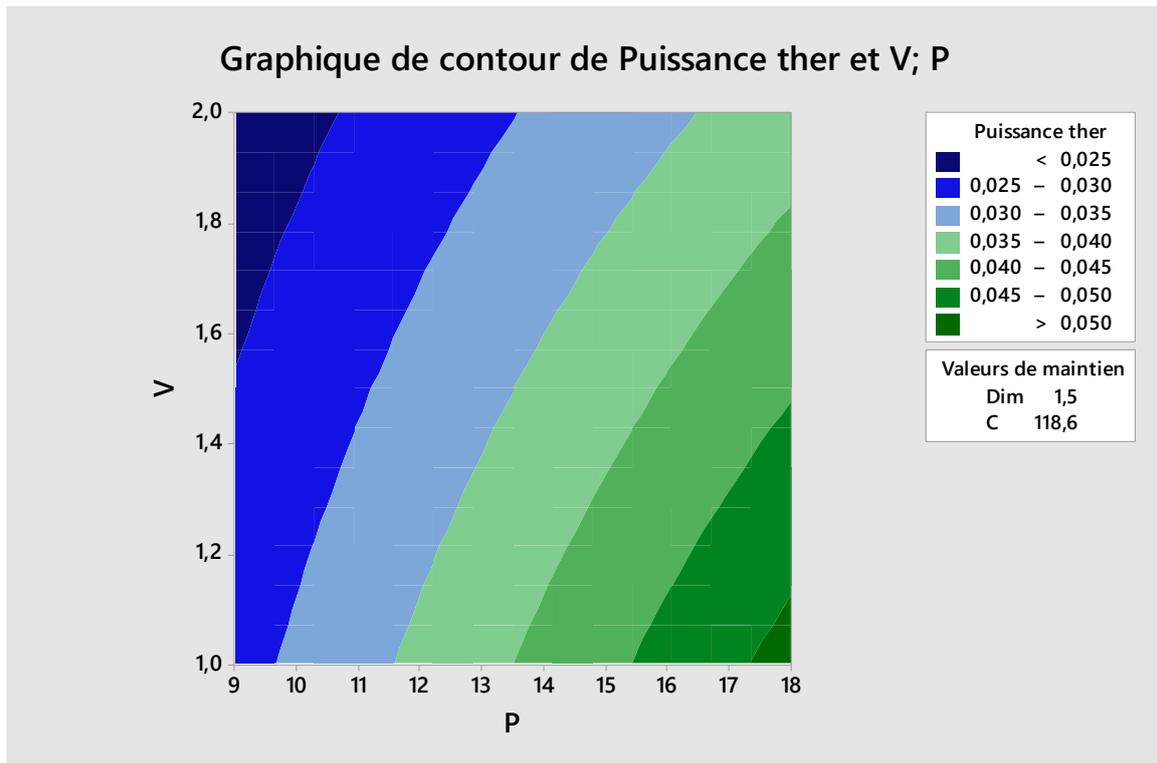
**Figure IV.8 :** Graphique de contour de la dimension caractéristique des canaux, de la vitesse d'écoulement en fonction de la puissance thermique

Ce graphique (**Figure IV.8**) dévoile comment la vitesse de l'écoulement et la dimension caractéristique des canaux sont liée à la puissance thermique : plus la vitesse de l'écoulement diminue et plus la dimension diminue, plus la puissance thermique est élevée.



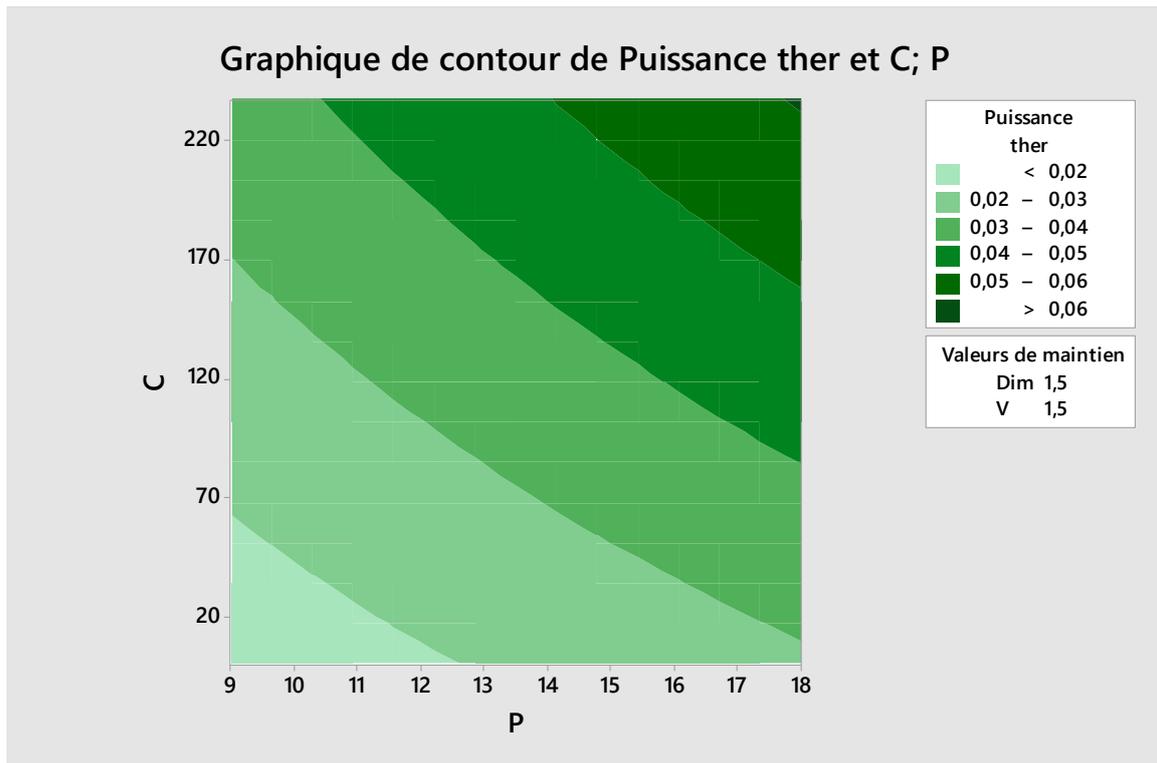
**Figure IV.9 :** Graphique de contour de la dimension caractéristique des canaux, de la conductivité thermique des ailettes en fonction de la puissance thermique

Ce graphique (**Figure IV.9**) révèle comment la conductivité thermique des ailettes et la dimension caractéristique des canaux sont liées à la puissance thermique : la puissance thermique augmente quand la conductivité est élevée et que la dimension est réduite.



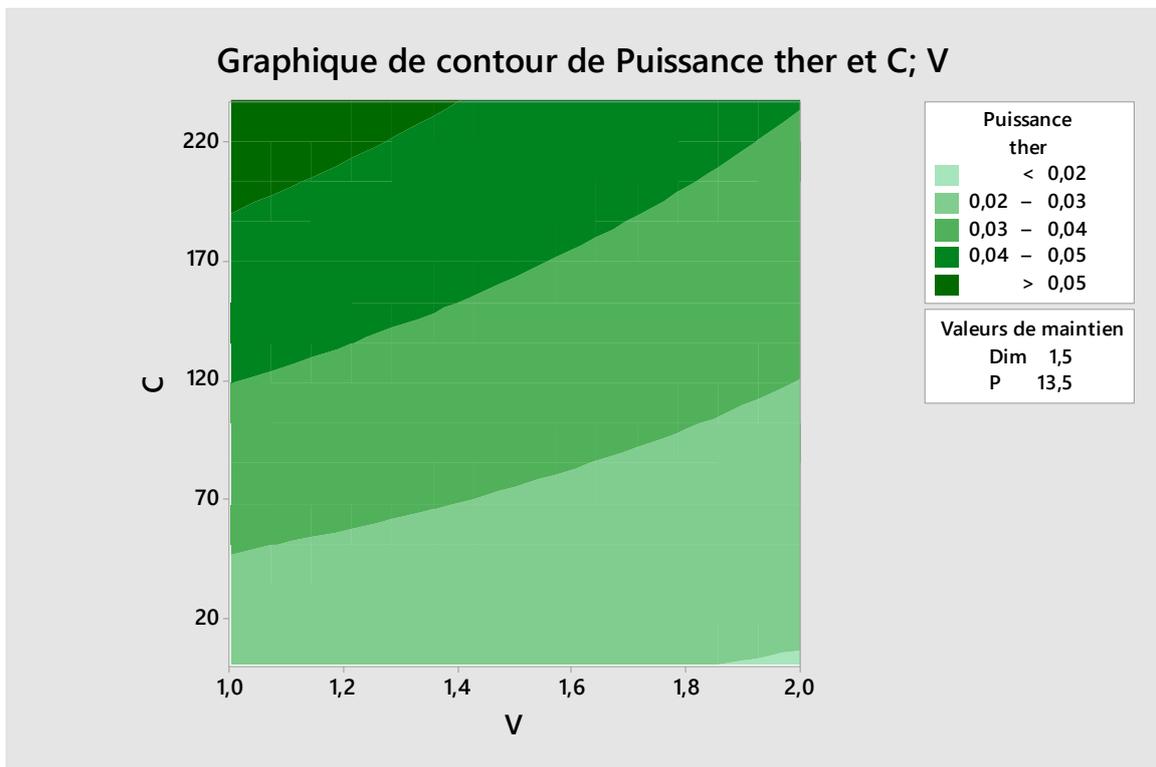
**Figure IV.10 :** Graphique de contour de la profondeur de l'échangeur, de la vitesse d'écoulement en fonction de la puissance thermique

Ce graphique (**Figure IV.10**) démontre la liaison de la vitesse d'écoulement et la profondeur de l'échangeur à la puissance thermique, plus la vitesse diminue et la profondeur s'agrandit, plus la puissance thermique est élevée.



**Figure IV.11** : Graphique de contour de la profondeur de l'échangeur, de la conductivité thermique des ailettes en fonction de la puissance thermique

Ce graphique (**Figure IV.11**) représente la liaison de la conductivité thermique des ailettes et de la profondeur de l'échangeur à la puissance thermique, moins la profondeur et la conductivité augmente moins la puissance thermique est élevée.



**Figure IV.12 :** Graphique de contour de la vitesse de l'écoulement, de la conductivité thermique des ailettes en fonction de la puissance thermique

Ce graphique (**Figure IV.12**) montre la liaison de la conductivité thermique des ailettes et de la vitesse d'écoulement à la puissance thermique : quand la conductivité augmente et que la vitesse d'écoulement diminue, on observe une hausse de puissance thermique.

#### **IV.9. Optimisation des réponses :**

Cette option permet de trouver une solution optimale à notre problème ce qui signifie qu'elle permet d'identifier une combinaison de paramètres de variables d'entrée qui optimisent une seule réponse ou un ensemble de réponses.

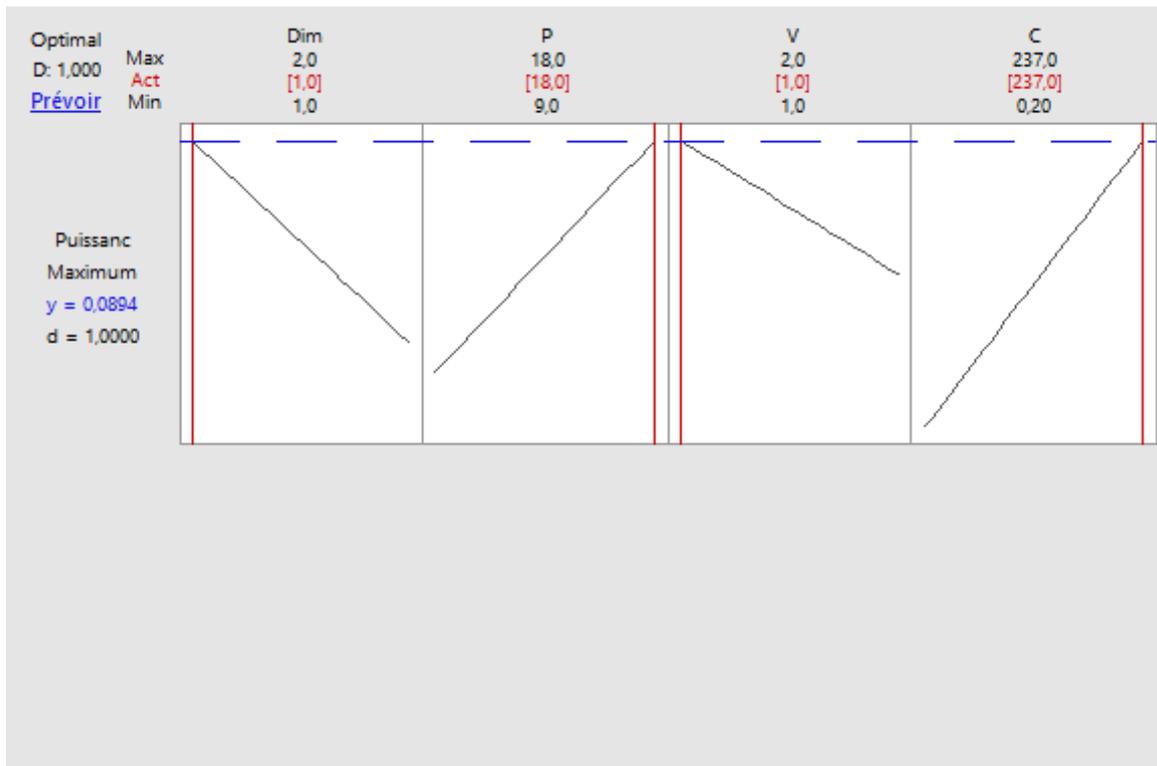


Figure IV.13 : Diagramme d'optimisation des réponses

Les conditions optimales pour obtenir un maximum de puissance thermique sont :

- Une dimension caractéristique des canaux de 1 mm.
- Une profondeur de l'échangeur de 18mm.
- Une vitesse d'écoulement à 1 m/s.
- Une conductivité à 237 W/mK.

La densité a un score de désirabilité parfait qui est de 1 car la réponse prédite est égale à la cible désiré qui est de 0.0894.

#### IV.10. La comparaison entre les réponses prédites et les réponses réelles :

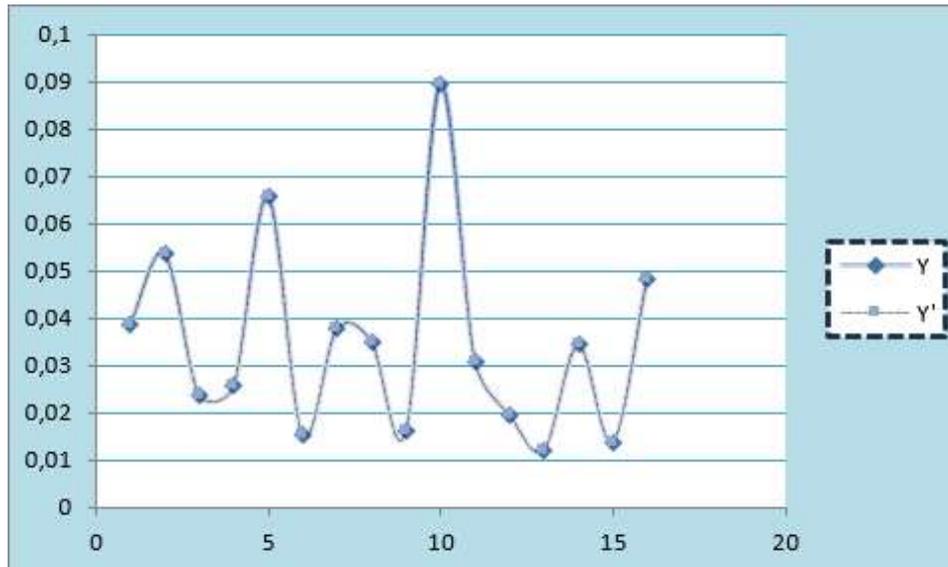


Figure IV.14 :Diagramme de comparaison entre les réponses prédites et les réponses expérimentale

Le graphique (**Figure IV.14**) montre qu'il n'y a aucune différence entre les réponses prédites et les réponses réelles. Cette représentation est logique vu qu'il n'y a pas de manque d'ajustement, le résultat est donc parfait.

### Conclusion générale

Un échangeur de chaleur est un dispositif utilisé pour transférer de la chaleur entre deux ou plusieurs fluides. Les fluides peuvent être monophasés ou biphasés, selon le type d'échangeur et peuvent être séparé ou en contact direct. Afin, de discuter des échangeurs de chaleur, il est nécessaire de fournir une certaine forme de classification. Il existe plusieurs types d'échangeurs de chaleur notre étude a été centré sur l'échangeur de chaleur à plaque.

L'échangeur de chaleur à plaque est un échangeur très efficace, compact et robuste dans les applications industrielles, dans ce dernier des plaques métalliques sont utilisées pour séparer les deux flux l'un perdant et l'autre gagnant de la chaleur, le transfert de chaleur se produit à travers ces plaques-là. Les échangeurs à plaques se compose eux aussi de plusieurs types.

Le plan d'expérience est une technique de planification d'expérience et d'analyse des informations obtenues. La technique permet d'utiliser un certain nombre d'expériences dans lesquelles plusieurs paramètres expérimentaux sont varié systématiquement et simultanément pour obtenir des informations suffisantes. Sur la base des données obtenues, un modèle mathématique du processus étudié est créé. Le modèle peut être utilisé pour comprendre l'influence des paramètres expérimentaux sur le résultat et pour arriver à une optimisation.

Dans ce travail une étude d'optimisation d'un échangeur de chaleur à plaque est présentée, Cette optimisation a été réalisée par la méthode des plans d'expériences à travers une simulation, en utilisant le logiciel Minitab. L'objectif principal de cette étude était l'évaluation de la performance de la puissance thermique pour une maximisation de cette dernière.

Les résultats obtenu mènent à constater qu'après avoir découvert que le facteur le plus significatif était la conductivité thermique des ailettes, et après avoir observé l'interaction des facteurs et leurs liaison avec la puissance thermique, on conclut que pour avoir un résultat optimale pour obtenir un maximum de puissance thermique, les conditions optimales nécessaire sont :

- Une dimension caractéristique des canaux de 1 mm.
- Une profondeur de l'échangeur de 18mm.
- Une vitesse d'écoulement à 1 m/s.
- Une conductivité à 237 W/mK.

## Références bibliographiques

- [1] OUGANA ABDEL MOUMENE, Etude et dimensionnement d'un système de refroidissement d'un system de refroidissement Tchín-lait, Candia. Thèse de master. Université Abderrahmane MIRA BEJAIA, Algérie.2019.
- [2] Bouhalili Saliha et Boualem Fouzia, Etude thermique de condenseurs à tubes et à calandre. Thèse de master. Université de Mostaganem, Algérie. 2019.
- [3] Benayad Nada, Etude et optimisation des échangeurs de chaleur. Thèse de master. Université de Constantine, Algérie. 2008.
- [4] Mounir Bennajah, Naoil Chaouni « Echangeurs de chaleur : Technologie, calcul et design », 2014.
- [5] Site web: <https://www.wcrhx.com/plate-heat-exchanger-applications>.
- [6] R. Vidil, J.M Grillot, C. Marvillet, P. Mercier, G. Ratel « Les échangeurs à plaques : description et éléments de dimensionnement, 2<sup>e</sup> édition », 1990.
- [7] Site web: <https://www.factoryfuture.fr/maintenance-echangeur-chaleur/?amp>.
- [8] Kexin Xu, « Design and optimization of plate heat exchanger networks ». Thèse de doctorat. Université de Manchester, Anglettere. 2019.
- [9] Dr.Mohamed Skander DAAS, Plan experiences. Cour. Université de Constantine, Algérie. 2020.
- [10] M<sup>me</sup> BOUDJENIBA et BOUZAOUIT NADIA, Etude par simulation numérique de la réactivité dans la réaction d'acylation enzymatique de substrats osidique. Thèse de magister. Université BADJI MOKHTAR –ANNABA, Algérie.2012.
- [11] Site web: <https://www.minitab.com/fr-fr/>.
- [12] ROBERTO BARROS MOLINA, YANNICK PARADIS, LAURA SALEZ.  
Détermination des performances optimales d'un échangeur de chaleur par la méthode des plans d'expériences. Ecole des Mines de Douai. 2012.

[13] J.F. Sacadura, Transferts thermiques – Initiation et approfondissement, Ed. Lavoisier, 2015.

[14] Introduction aux transferts thermiques, Cours et exercices corrigés ; J.-L. Battaglia, A. Kusiak, J.-R. Puiggali, 2<sup>ème</sup> Eds. DUNOD, 2014.

[15] Leontiev, Théorie des échanges de chaleur et de masse – Édition Mir-Moscou.

[16] F. P. Incropera, D. P. Dewitt - Fundamentals of Heat and Mass Transfer - Wiley, N.Y. – 2002.