

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Génie Mécanique et Electromécanique



N° Ref :

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : Energétique

Conception et optimisation d'un système de
pasteurisation du lait

Réalisé par :

- Boualita Fodil
- Amira Mouhand
- Saadi Dhiyaeddine
- Benmouhoub Abderrahim
- Boucheloukh Charif

Soutenu devant le jury :

M. TOUAHRIA Abdeldjouad
M. HAMIDANE Abbas
M. AZIZI Mohamed Walid

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

On remercie, avant tout, le Bon Dieu de nous avoir donné la patience, le courage et de nous avoir facilité le chemin pour achever ce fruit de nos longues années d'études.

Nous adressons notre vif remerciement à notre encadreur Dr. AZIZI Mohamed Walid pour son compréhension et son conseil et son aide. Pour son gentillesse et son orientation efficace.

D'autre part, je voudrais inclure mes parents qui m'ont soutenu pendant la réalisation de ce projet de fin de cycle et toutes mes études.

Je saisis cette occasion pour remercier les enseignants de l'Institut des Sciences et de Technologie du centre Universitaire Abdelhafid Boussouf –Mila.

Enfin, je remercie tous mes amis sans les nommer, car ils se reconnaîtront d'eux-mêmes.

Dédicaces

JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL:

À MON TRES CHER PERE

À MA TRES CHERE MERE

À MES TRES CHER FRERES

À MES TRES CHERES SŒURS

À MES CHERS ET FIDELES AMIS

À TOUTE LA PROMOTION GENIE

MECANIQUE ENERGETIQUE

Nomenclatures

Qv	Débit volumétrique	[m ³ /s]
ρ	Densité	[kg/m ³]
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
Pr	Nombre de Prandtl	-
P_{lait}	Pression de l'ait	[Pa]
n_{hp}	Nombre de tubes (n _{hp})	-
λ_s	Conductivité thermique du fluide (λ _s)	[W/(m.K)]
λ_{ss}	Conductivité thermique de l'acier inoxydable (λ _{ss})	[W/(m.K)]
L_{hp}	Longueur du tube (L _{hp})	[m]
T₁	Température à la sortie du régénérateur (T ₁)	[°C]
U_x	Coefficient de transfert thermique global	[W/m ² .K]
Δp	Pertes de charge	[Pa]
A_t	Surface totale de transfert	[m ²]
A_i	Surface de transfert du tube interne	[m ²]
R_w	Résistance de la paroi du tube	[K.m ² .W ⁻¹]

Sommaire

Introduction générale.....	XVI
----------------------------	-----

CHAPITRE I : Généralités sur la pasteurisation du Lait

I.1	Aperçu de la filière laitière en Algérie	1
I.2	Définition Lait	1
I.3	Différents types de laits	1
I.3.1	Lait cru (sans traitement thermique).....	2
I.3.2	Laits traités thermiquement	2
I.4	Définition de lait pasteurisé	3
I.5	Procédé de pasteurisation	3
I.5.1.	Reconstitution du lait	4
I.5.2.	Recombinaison	4
I.6	Pasteurisation	4
I.7	Diagramme général de fabrication du lait	5
I.8	Les Échangeurs	6
I.8.1.	Définitions d'un échangeur de chaleur.....	6
I.8.2.	Fonctionnement d'un échangeur thermique	6
I.8.3.	Modes de transferts thermiques	6
I.8.4.	Modes d'écoulement des deux fluides	7
I.8.5.	Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange.....	9
I.8.6.	Classement technologique	9
I.9	Types des échangeurs de chaleur	9
I.9.1.	Échangeur de chaleur tubulaire.....	9
I.9.2.	Échangeur de chaleur à plaque.....	10
I.10	Les caractéristiques.....	10
I.11	L'efficacité de l'échangeur thermique	10
I.11.1.	Rendement.....	10
I.11.2	Température... ..	11
I.12	Équipements couramment utilisés dans un pasteurisateur de lait.....	11

CHAPITRE II : Méthodologie des plans d'expérience

II.1	Introduction.....	13
II.2	La méthodologie des plans d'expériences.....	13
II.2.1	Historique	13
II.2.2	Principe.....	14
II.2.3	Expérimentations.....	15
II.2.4	Modélisation de la réponse.....	16
II.2.5	Intérêt du codage des variables.....	17
II.2.6	Principales composantes de la méthodologie des plans d'expériences	18
II.2.7	La Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR).....	19
II.2.7.1	Régression multilinéaire.....	20
II.2.7.2	Recherche globale de l'ajustement du modèle.....	21
II.2.7.3	Le R^2 ajusté.....	22
II.2.7.4	Stratégie de sélection du meilleur sous-modèle.....	22

II.2.7.5 Plans Composite Centraux.....	23
II.2.7.6 Propriétés des plans composites centrés.....	24
II.2.7.7 Utilité des points au centre du domaine d'étude.....	26
II.3 L'optimisation multicritères.....	26
II.3.1 Introduction.....	26
II.3.2 Méthode de Ch'ng.....	26

CHAPITRE III : Calculs et simulations

III .1. Introduction	31
III.2 Les données.....	31
III .2.1 Conception d'un prototype de pasteurisateur de lait	31
III .2.2 Variables initiales	32
III.3 Échangeur tubulaire à simple passage en mode co-courant	33
III .3.1 Les coefficients de film	33
III .3.2 Les pertes de pression	34
III.4 Logiciel EES	34
III .4.1 Description de logiciel EES	34
III .4.2 Information générale	35
III.4.3 Exploration du menu principal.....	38
III.4.4 Fenêtres de EES.....	38
III.5 Simulations.....	42
III.5.1 Étude l'efficacité de pasteurisation et la consommation d'énergie	42
III.5.2 Résultats de simulation.....	44
III.5.3 Étude du comportement de l'échangeur à tubulaire	44
III.5.4 Résultats de simulation.....	46

CHAPITRE VI : Modélisation et optimisation par MSR

IV.1	
Introduction.....	47
IV.2 Les données de départ.....	47
IV.3 Planification la simulation.....	48
IV.4 Interprétation des résultats.....	51
IV.4.1 Sensibilité du U_x en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1	51
IV.4.2 Analyse de régression pour U_x en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1	53
IV.4.3 Évolution des pertes de charge (Δp) en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1	54
IV.4.4 Analyse de régression pour Δp en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1	56
IV.4.5 3D Surfaces de réponses.....	56
IV.5 Optimisation les caractéristiques de l'échangeur de chaleur.....	61
IV.6 Conclusions.....	65

Conclusions Générale.....	66
---------------------------	----

Références bibliographique.....	68
---------------------------------	----

Liste des tableaux

Tableau II.1	Calcul des niveaux des facteurs
Tableau II.2	Valeurs de δ fonction du nombre de points au centre du domaine.
Tableau IV.1	Principaux paramètres l'échangeur de chaleur tubulaire
Tableau IV.2	Plan composite centrée avec cinq (05) points centré (21 essais)
Tableau IV.3	Variables et niveaux du modèle de conception
Tableau IV.4	Résultats de simulation le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)
Tableau IV.5	Analyse de la variance ANOVA le coefficient de transfert thermique global (U_x)
Tableau IV.6	Analyse de la variance ANOVA pour les pertes de charge (Δp)
Tableau IV.7	Les contraintes du processus d'optimisation
Tableau IV.8	Les solutions optimales
Tableau IV.9	Les intervalles de prévision optimale des réponses (U_x et Δp)

Liste des Figures

Figure I.1	Circulation des fluides (eau chaude, froide, ait)
Figure I.2	Diagramme de fabrication du lait (pasteurisé; fermenté)
Figure I.3	Échangeur de chaleur à Co-courant
Figure I.4	Échangeur à tube à contre-courant
Figure I.5	Schéma d'un échangeur de chaleur tubulaire
Figure I.6	Schéma d'un échangeur à plaques
Figure II.1	La boîte noire du processus
Figure II.2	Plan de régression pour deux variables
Figure II.3	Surface de Réponse
Figure II.4	Plan composite centré pour 3 facteurs
Figure III.1	Conception d'un prototype de pasteurisateur de lait
Figure III.2	Fenêtre des Informations général
Figure III.3	Les commands de EES
Figure III.4	Interface du logiciel EES
Figure III.5	Façade de la fenêtre de solution
Figure III.6	Interface de La fenêtre Tableaux
Figure III.7	Fenêtre de la table paramétrique
Figure III.8	Interface de la fenêtre de mise en forme d'équations
Figure III.9	Fenêtre Résiduelle
Figure III.10	Fenêtre 'Lookup Table'
Figure IV.1	Échangeur de chaleur tubulaire
Figure IV.2	Probabilités normales des résidus du coefficient de transfert thermique global
Figure IV.3	Corrélation des valeurs mesurés et estimés du U_x
Figure IV.4	Probabilités normales des résidus des pertes de charge (Δp)
Figure IV.5	Corrélation des valeurs mesurés et estimés des pertes de charge (Δp)
Figure IV.6	Effet du débit volumétrique (Q_v) et la longueur des tubes (L_{hp}) sur le coefficient de transfert thermique global (U_x)
Figure IV.7	Effet du débit volumétrique (Q_v) et la température de sortie de l'échangeur (T_1) sur du coefficient de transfert thermique global (U_x)
Figure IV.8	Effet du débit volumétrique (Q_v) et le nombre de tubes (n_{hp}) sur les pertes de charge (Δp)
Figure IV.9	Effet du débit volumétrique et la température de sortie de l'échangeur sur les pertes de charge (Δp)
Figure IV.10	Diagramme d'optimisation de réponses multiples du coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)
Figure IV.11	Diagramme de désirabilité du coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)

Résumé

Ce travail consiste en une analyse thermodynamique détaillée des performances d'un échangeur de chaleur tubulaire durant le processus de pasteurisation du lait. L'optimisation des paramètres de conception est réalisée à l'aide de la méthodologie des surfaces de réponse (RSM). Des simulations numériques thermodynamiques sont effectuées à l'aide du logiciel EES pour explorer différents paramètres de fonctionnement.

L'objectif principal de ce travail est d'une part, il vise à modéliser et développer des équations de prédiction des performances de l'échangeur de chaleur, en se concentrant sur le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp). Ces performances sont étudiées en fonction de diverses caractéristiques, notamment le débit volumétrique (Q_v), le nombre de tubes (n_{hp}), la longueur des tubes (L_{hp}) et la température de sortie de l'échangeur (T_1), en utilisant un plan composite centré.

D'autre part, le travail porte sur l'optimisation multi-réponses afin de déterminer les valeurs optimales des caractéristiques de l'échangeur de chaleur en tenant compte des objectifs de performance fixés. Cette optimisation permet de trouver un équilibre entre les différents paramètres pour maximiser l'efficacité et la performance globale du système. Les résultats obtenus permettent d'améliorer la performance des échangeurs de chaleur, tout en réduisant les coûts énergétiques et en augmentant la durabilité des installations.

Mots clés : pasteurisation du lait, échangeur de chaleur, transfert thermique, pertes de charge, modélisation, optimisation

Abstract

This work consists of a detailed thermodynamic analysis of the performance of a tubular heat exchanger during the milk pasteurization process. The optimization of design parameters is carried out using the Response Surface Methodology (RSM). Thermodynamic numerical simulations are performed using the EES software to explore different operating parameters.

The primary objective of this work is twofold. On one hand, it aims to model and develop predictive equations for the performance of the heat exchanger, focusing on the overall heat transfer coefficient (U_x) and pressure losses (Δp). These performances are studied based on various characteristics, including volumetric flow rate (Q_v), the number of tubes (n_{hp}), the length of the tubes (L_{hp}), and the outlet temperature of the exchanger (T_1), using a central composite design.

On the other hand, the work involves multi-response optimization to determine the optimal values of the heat exchanger characteristics, considering the set performance objectives. This optimization helps find a balance between the different parameters to maximize the efficiency and overall performance of the system. The results obtained enable the improvement of heat exchanger performance while reducing energy costs and increasing the durability of the installations.

Keywords: milk pasteurization, heat exchanger, heat transfer, pressure losses, modeling, optimization

ملخص

يتناول هذا العمل تحليلًا حراريًا ديناميكيًا تفصيليًا لأداء مبادل حراري أنبوبي خلال عملية بسترية الحليب. يتم تحقيق تحسين معايير التصميم باستخدام منهجية استجابة السطح. تُجرى محاكاة حرارية لاستكشاف مختلف معايير التشغيل رقمية باستخدام برنامج EES.

الهدف الرئيسي من هذا العمل ذو شقين. من ناحية، يهدف إلى نمذجة وتطوير معادلات تنبؤية لأداء المبادل الحراري، مع التركيز على معامل انتقال الحرارة الكلي وفقدان الضغط. تتم دراسة هذه الأداءات بناءً على خصائص مختلفة، بما في ذلك معدل التدفق الحجمي، عدد الأنابيب، طول الأنابيب، ودرجة حرارة خروج المبادل، باستخدام تصميم مركزي مركب.

من ناحية أخرى، يتناول العمل تحسين الاستجابة المتعددة لتحديد القيم المثلى لخصائص المبادل الحراري، مع مراعاة أهداف الأداء المحددة. يساعد هذا التحسين في إيجاد توازن بين المعايير المختلفة لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة والأداء العام للنظام. تمكن النتائج المحصلة من تحسين أداء المبادلات الحرارية، مع تقليل تكاليف الطاقة وزيادة متانة المنشآت.

الكلمات المفتاحية: بسترية الحليب، المبادل الحراري، انتقال الحرارة، فقدان الضغط، النمذجة، التحسين

Introduction générale

La pasteurisation est un procédé thermique essentiel dans l'industrie laitière, visant à éliminer les agents pathogènes et à prolonger la durée de conservation du lait tout en préservant ses qualités nutritionnelles et organoleptiques. Ce processus repose sur le chauffage du lait à une température spécifique pendant un temps déterminé, puis sur son refroidissement rapide. L'efficacité et la fiabilité de la pasteurisation dépendent de nombreux paramètres, notamment la température, le débit volumétrique et les propriétés thermophysiques du lait.

Cette étude vise à utiliser logiciel EES pour modéliser et simuler le processus de pasteurisation du lait, en mettant en évidence les échanges de chaleur et les variations de température tout au long du cycle. Les résultats obtenus permettront d'identifier les points critiques et d'optimiser les conditions de fonctionnement afin d'assurer l'efficacité énergétique de l'installation. En outre, cette simulation fournira des résultats importants pour la conception et l'amélioration des systèmes de pasteurisation existants, permettant aux ingénieurs de développer des solutions plus innovantes et durables.

Ces constatations nous ont conduits à développer des travaux de recherche ayant pour objectifs :

- La simulation du comportement thermique d'une installation de pasteurisation du lait inclut l'analyse détaillée des différents composants tels que les échangeurs de chaleur, les réservoirs de stockage et les tubes de circulation.
- La modélisation mathématique pour l'optimisation des performances de l'échangeur de chaleur, le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp) en fonction des caractéristiques de l'échangeur de chaleur tubulaire, sont le débit volumétrique (Q_v), nombre de tubes (n_{hp}), longueur du tube (L_{hp}) et température de sortie de l'échangeur (T_1) en utilisant la Méthodologie des Surfaces de Réponses (MSR).

Ainsi, ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre présente le processus de pasteurisation et de fabrication du lait, en détaillant les différents types de laits disponibles. Il aborde ensuite le principe de fonctionnement d'un échangeur thermique, les modes de transfert thermique et l'efficacité de l'échangeur. Enfin, ce chapitre se conclut par une description des équipements couramment utilisés dans une installation de pasteurisation du lait.

Le second chapitre s'intéressera à l'aspect Mathématique reste encore notre préoccupation durant ce chapitre. Nous présentons ici la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) qui est un outil d'analyse privilégié pour les ingénieurs du fait qu'on réalise d'abord un minimum d'expériences afin d'obtenir les facteurs influents de l'échangeur de chaleur tubulaire étudiée, le coefficient de transfert thermique global et les pertes de charge en fonction les caractéristiques de l'échangeur de chaleur tubulaire et par la suite la modélisation de surface des réponses.

Dans **le troisième chapitre** nous avons présenté La simulation sur un échangeur de chaleur tubulaire en utilisant le code EES tels que le débit volumétrique ($0.5 \leq Q_v \leq 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$), nombre de tubes ($4 \leq n_{hp} \leq 14$), Longueur du tube ($1 \leq L_{hp} \leq 15\text{m}$), et la température de sortie de l'échangeur ($35 \leq T_1 \leq 45 \text{ }^\circ\text{C}$). Cette étude théorique suivi d'une simulation sur de l'échangeur de chaleur, afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'échangeur de chaleur étudié.

Le quatrième chapitre présente l'étude et l'analyse statistique de la variance (ANOVA) des résultats de simulation afin de développer les modèles mathématiques des facteurs de réponse (le coefficient de transfert thermique global et les pertes de charge) en fonction les caractéristiques de l'échangeur de chaleur, débit volumétrique (Q_v), nombre de tubes (n_{hp}), longueur du tube (L_{hp}) et température de sortie de l'échangeur (T_1) en utilisant la méthodologie des surfaces de réponse (MSR).

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :Généralités Sur la Pasteurisation du Lait

I.1 Aperçu de la filière laitière en Algérie

La filière laitière en Algérie occupe une place essentielle dans l'économie en contribuant de manière significative à la croissance du pays. En effet, le secteur de la consommation de produits laitiers se distingue par sa vitalité, largement favorisée par la politique de subvention des prix mise en place. Par ailleurs, l'État joue un rôle déterminant dans la supervision du marché laitier, en cherchant à équilibrer l'offre et la demande à travers diverses stratégies. Malgré l'engouement croissant pour l'élevage laitier, cette dynamique n'a toutefois pas eu d'impact significatif sur la partie amont de la filière [1]. La politique laitière mise en place par le Ministère de l'Agriculture, dans le cadre du Plan National de Développement de l'Agriculture (PNDA) entre 2000 et 2006, puis du Programme de Renouveau Agricole et Rural (PRAR) de 2006 à 2014, a eu un impact significatif sur le secteur laitier. Grâce à ces initiatives, on a observé des améliorations notables à la fois en termes de production et de collecte de lait. En effet, la production laitière a connu une augmentation remarquable, passant de 1,5 milliard de litres en 2000 à 2,2 milliards de litres en 2007, avec un taux de croissance annuel de 6 % depuis le début des années 2000. Cette tendance haussière s'est poursuivie pour atteindre 3,08 milliards de litres en 2012 [2].

I.2 Définition Lait

Le lait est un liquide alimentaire de couleur blanche, qui est opaque et possède une saveur légèrement sucrée. Il a une odeur peu marquée et un goût douceâtre. Ce liquide constitue un aliment complet et équilibré, étant sécrété par les glandes mammaires de la femme ainsi que par celles des mammifères femelles dans le but de nourrir les jeunes [3]. Le lait est un liquide blanc opaque d'origine animale, principalement produit par les mammifères femelles pour nourrir leurs petits. Sa structure complexe en fait une source essentielle de nutriments pour l'être humain, lui fournissant à la fois de l'énergie et des éléments nécessaires à son bon fonctionnement. Le lait est une boisson essentielle pour le corps humain en raison de sa teneur élevée en calories. En effet, un litre de lait contient environ 750 calories, ce qui en fait une source précieuse de calcium, de graisses et de vitamines bénéfiques pour la santé [4].

I.3 Différents types de laits

Il existe plusieurs types de lait, chacun ayant des caractéristiques et des avantages spécifiques. Les laits destinés à la consommation humaine peuvent être classés en deux catégories distinctes en fonction du mode de traitement qu'ils ont subi. Ces deux catégories répondent aux divers

besoins nutritionnels, aux préférences alimentaires, et aux restrictions alimentaires des consommateurs.

I.3.1 Lait cru (sans traitement thermique)

Le lait cru, qui est du lait non pasteurisé et non traité, est considéré comme un produit nutritionnellement intéressant en raison de sa composition naturelle préservée. Cependant, étant donné qu'il n'a pas été soumis à des procédés d'assainissement pour garantir sa conservation, il est essentiel de mettre en place des mesures strictes de contrôle tout au long de sa production et de sa commercialisation. En effet, le lait cru peut présenter des risques pour la santé en raison de la possible présence de bactéries pathogènes.

- Pour être conforme, l'animal doit provenir d'animaux qui ont été reconnus comme étant indemnes de brucellose et de tuberculose, ces maladies étant transmissibles de l'animal à l'homme, dans le cadre d'une prophylaxie collective obligatoire.
- De plus, il doit provenir d'exploitations bien établies, garantissant ainsi sa traçabilité et sa qualité.
- Il est impératif que l'animal soit recueilli dans des conditions hygiéniques optimales, afin de prévenir tout risque de contamination.
- Enfin, il est essentiel que l'animal réponde aux normes microbiologiques en vigueur jusqu'à la date limite de consommation [5].

I.3.2 Lait traité thermiquement

Selon l'étude menée par Luquet et autres en 1985, il a été démontré que le degré de traitement thermique appliqué au lait a un impact significatif sur sa durée de conservation. En fonction du traitement thermique reçu, on peut distinguer trois types de lait avec des durées de conservation variables. Les laits pasteurisés subissent un processus de chauffage visant à réduire la quantité de micro-organismes présents, y compris les germes pathogènes. Il est important de noter que la durée et la température de ce traitement peuvent varier. En général, le lait est chauffé à une température comprise entre 72 et 75 °C pendant 15 à 20 secondes, ce qui permet d'éliminer les bacilles de Koch, responsables de la tuberculose. Il est intéressant de souligner que ce processus de pasteurisation n'affecte pas significativement la composition du lait, à l'exception d'une légère perte en thiamine et en vitamine C [6].

La stérilisation des laits a été effectuée de manière exclusive en les chauffant dans un autoclave à une température comprise entre 115 et 120°C, pendant une durée de 15 à 20 minutes [7].

Le lait UHT, abréviation d'Ultra Haute Température, est un procédé de chauffage du lait à une température comprise entre 135°C et 150°C pendant une durée de 2 à 5 secondes. Grâce à cette méthode, le lait peut être conservé pendant une période allant de 3 à 4 mois à température ambiante, tant qu'il est stocké dans un endroit frais.

I.4 Définition de lait pasteurisé

Le lait pasteurisé est un type de lait fabriqué à partir de lait cru ou de lait reconstitué, qu'il soit écrémé ou non. Ce lait a été soumis à un traitement thermique appelé pasteurisation, au cours duquel plus de 90 % de la flore présente dans le lait est détruite, voire jusqu'à 98 %. Ce processus de pasteurisation permet d'éliminer notamment tous les germes pathogènes non sporulés, tels que les germes responsables de la tuberculose et de la brucellose, comme l'indique [8]. Le lait pasteurisé est un type de lait qui a subi un traitement thermique spécifique. Ce processus consiste à chauffer le lait à une température comprise entre 72 et 85 °C pendant une durée de 15 à 20 secondes, puis à le refroidir rapidement jusqu'à ce que sa température soit inférieure à 6 °C. L'une des caractéristiques du lait pasteurisé est sa réaction négative au test phosphatase. En effet, la phosphatase est une enzyme naturellement présente dans le lait, mais elle est désactivée lors du processus de pasteurisation. Ainsi, le fait d'observer une réaction négative au test phosphatase est une indication que la pasteurisation a été effectuée de manière adéquate, comme le souligne [9].

I. 5 Procédé de pasteurisation

La pasteurisation est un procédé thermique utilisé pour réduire la charge microbienne dans les aliments liquides; La pasteurisation, inventée par Louis Pasteur en 1862, est un procédé de traitement thermique utilisé pour éliminer les micro-organismes présents dans les aliments, ce qui permet de prolonger leur durée de conservation. Ce processus a révolutionné l'industrie alimentaire en assurant la sécurité des produits tout en maintenant leur qualité. Le contrôle de l'efficacité de la pasteurisation repose sur la détection de la présence de la phosphatase alcaline, une enzyme sensible à la chaleur qui perd son activité lorsque soumise à une température dépassant 60°C. Le procédé industriel de production de lait pasteurisé consiste en une série d'étapes rigoureusement contrôlées visant à éliminer les bactéries pathogènes présentes dans le lait cru, tout en préservant ses qualités nutritionnelles et organoleptiques. Ces étapes comprennent le chauffage du lait à une température spécifique, suivi d'un refroidissement rapide, garantissant ainsi la sécurité alimentaire des consommateurs.

I.5.1 Reconstitution du lait

Lait en poudre généralement de vache, déshydraté et réduit en particule solide pour sa conservation et destiné uniquement à l'alimentation humaine. Le lait en poudre est distribué dans un entonnoir en acier inoxydable, relié à une pompe haute pression, qui à son tour tire la poudre dans le réservoir de préparation. Le mélange de poudre est homogénéisé au moyen d'un mélangeur situé à l'intérieur du réservoir, caractérisé par sa vitesse d'homogénéité. La période de mélange du lait est 15 minutes, le temps de détente pendant 5 minutes, afin de réduire le pourcentage de mousse produite et pour que la valeur de la densité de lait soit entre l'intervalle des normes nationales de la densité du lait (1,028 à 1,032) [10].

I.5.2 Recombinaison

La recombinaison est un processus qui consiste à mélanger du lait reconstitué avec de la matière grasse de lait anhydre. Ce procédé permet d'obtenir un produit final qui présente des similitudes avec le lait de vache, tant au niveau de sa composition que de ses caractéristiques. Le processus de fabrication du lait reconstitué implique tout d'abord un mélange minutieux de matière grasse et de lait, suivi d'une étape d'homogénéisation réalisée à une température comprise entre 60 et 65 °C. Cette homogénéisation est essentielle pour empêcher la séparation de la matière grasse dans le produit final. Ensuite, le lait ainsi préparé doit subir une pasteurisation afin d'éliminer les éventuels agents pathogènes, avant d'être refroidi pour garantir sa conservation optimale [11].

I.6 Pasteurisation

La pasteurisation est un processus utilisé pour traiter le lait afin d'éliminer les bactéries nocives. Pendant ce processus, le lait est chauffé à une température élevée, puis refroidi rapidement en le faisant passer à travers des échangeurs de chaleur où de l'eau chaude et froide circulent dans le même sens. L'eau chaude, dont la température est élevée, est acheminée à travers un tube spécifique, parcourant ainsi une certaine distance, jusqu'à parvenir à la section désignée. Ce processus se poursuit inlassablement jusqu'à ce que la température de ladite section atteigne et stabilise à 85 degrés Celsius. Après avoir été chauffé à une température moyenne de 40°C en passant de la section de refroidissement à la section de chauffage, le lait subit un processus de refroidissement supplémentaire jusqu'à ce qu'il atteigne 4°C. Le processus de pasteurisation, qui consiste à chauffer le lait à une température spécifique pour éliminer les bactéries nocives, a une durée de 15 minutes. La Figure 1 présente de manière détaillée la circulation du lait à

travers chaque section de l'appareil de pasteurisation, illustrant ainsi le cheminement précis du lait pendant le processus.

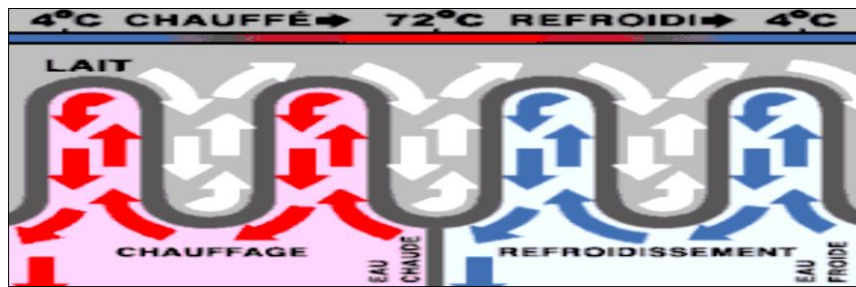


Figure I.1 Circulation des fluides (eau chaude, froide, lait) [12]

I.7 Diagramme général de fabrication du lait

Le processus de fabrication du lait varie en fonction du type de produit final souhaité, et il existe des différences notables en fonction de la quantité de matières grasses présente dans le lait. La Figure 2 illustre de manière générale le diagramme de fabrication du lait, qu'il s'agisse de lait pasteurisé ou fermenté.

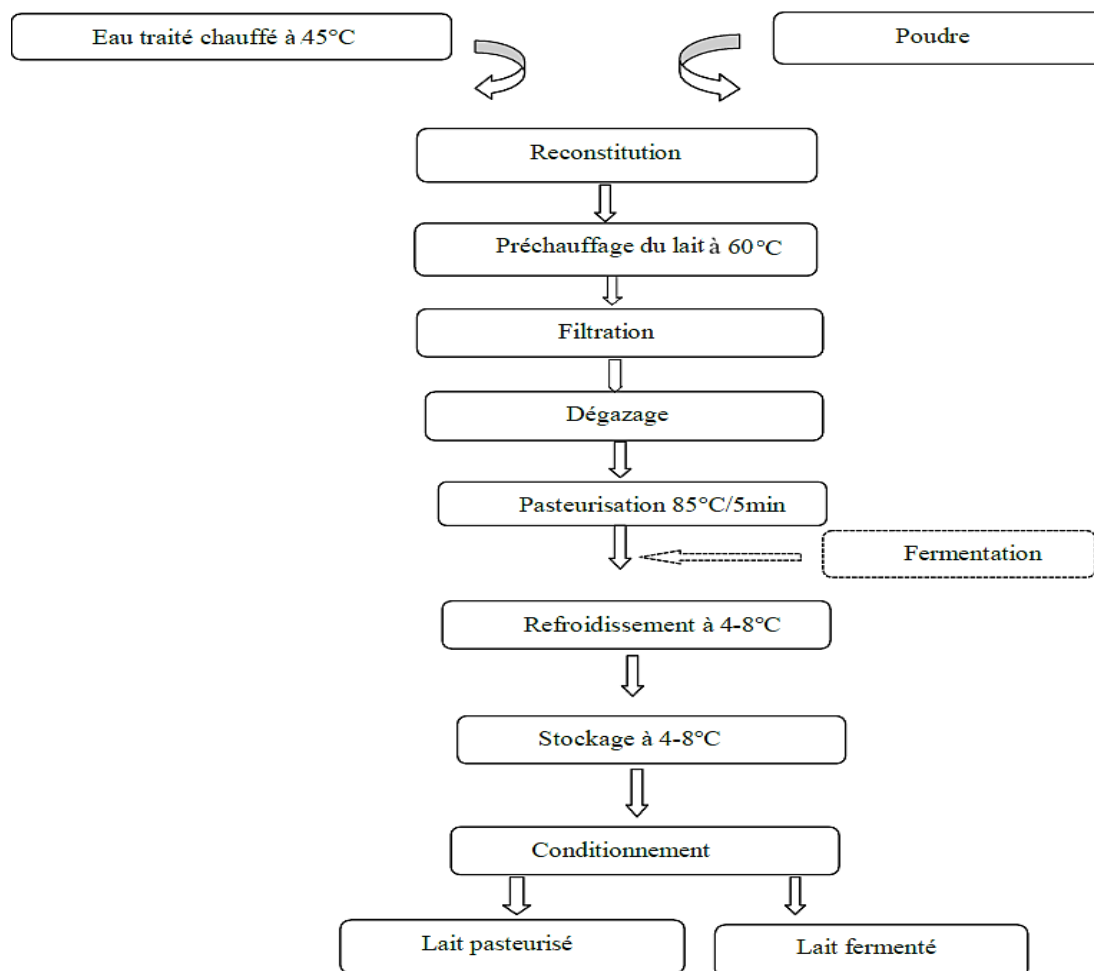


Figure I.2 Diagramme de fabrication du lait (pasteurisé; fermenté) [12].

I.8. Les Échangeurs

I.8.1 Définitions d'un échangeur de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des équipements essentiels utilisés dans diverses installations industrielles pour faciliter le transfert de chaleur entre un liquide chaud et un liquide froid. Ce processus d'échange thermique repose sur la nécessité d'avoir une différence de température entre les deux liquides, caractérisée par un écart de température noté Δt . Afin de favoriser un échange thermique efficace, il est crucial que les composants du système soient connectés de la manière la plus optimale possible. Cette interconnexion adéquate garantit la progression fluide du processus d'échange thermique et encourage des performances thermiques optimales.

I.8.2 Fonctionnement d'un échangeur thermique

L'échangeur de chaleur, un dispositif essentiel dans de nombreux systèmes, joue un rôle crucial dans le transfert de chaleur entre deux liquides en les maintenant séparés par une paroi, souvent composée de cuivre, d'aluminium ou d'acier inoxydable. Plusieurs facteurs clés influent sur l'efficacité de cet échangeur, tels que la nature des liquides en circulation, la vitesse à laquelle ils se déplacent à l'intérieur de l'appareil, ainsi que la différence de température entre ces liquides. Afin d'optimiser le fonctionnement de l'échangeur et d'améliorer ses performances, il est recommandé d'augmenter la vitesse de circulation des liquides à l'intérieur du dispositif. En règle générale, dans les échangeurs de chaleur, les liquides circulent de deux manières différentes : soit en contre-courant, c'est-à-dire que le premier liquide circule en haut et le second en bas, soit en co-courant, où les deux liquides circulent dans le même sens. Cette configuration vise à optimiser le transfert de chaleur en favorisant le développement du même courant pour les liquides. Ainsi, le fluide progresse dans la même direction pour favoriser l'échange thermique.

I.8.3 Modes de transferts thermiques

La chaleur peut être transférée par trois modes différents : la conduction, la convection et le rayonnement.

- **La conduction**

La conduction thermique est un mode de transfert de chaleur qui se produit lorsque deux milieux sont en contact et présentent une différence de température. Contrairement à la convection, la conduction ne nécessite pas de déplacement global de matière. Elle consiste en un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques vers les particules moins énergétiques qui leur sont adjacentes. Ce phénomène peut se produire dans les solides, les liquides et les gaz.

La conductivité thermique est la grandeur physique qui caractérise le comportement des matériaux lors de ce processus de conduction thermique. Dans les échangeurs thermiques, le phénomène de conduction thermique se manifeste principalement à travers la paroi qui sépare les deux fluides en circulation. Cette paroi est habituellement constituée de métal et possède une épaisseur réduite, ce qui lui confère une faible résistance thermique.

- **La convection**

La convection thermique est un processus de transfert de chaleur qui implique le déplacement de matière à l'intérieur d'un milieu. Ce phénomène se produit lorsqu'il y a un échange d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz environnant. La convection thermique est un mécanisme crucial pour les échangeurs de chaleur, mais il est également complexe à évaluer en raison de divers facteurs tels que le type de fluide en mouvement, les vitesses impliquées et le design spécifique de l'échangeur thermique.

- **Le rayonnement**

Le rayonnement thermique est un phénomène de transfert d'énergie qui se manifeste sous forme d'ondes électromagnétiques suite à des modifications dans les arrangements électroniques des atomes ou des molécules. Même s'il est moins dominant que les autres modes de transfert thermique au niveau des échangeurs thermiques, il reste significatif dans certaines applications, comme par exemple dans le fonctionnement d'une chaudière équipée d'un brûleur.

I.8.4 Modes d'écoulement des deux fluides

Dans les processus utilisant des échangeurs de chaleur, comme la pasteurisation du lait, les modes d'écoulement des fluides (le lait et le fluide de chauffage ou de refroidissement) sont cruciaux pour l'efficacité du transfert de chaleur. On peut distinguer trois modes d'écoulement différents :

- **Écoulement Co-courants**

L'écoulement co-courants, Également appelé écoulement des deux fluides parallèles et de même sens, se réfère à un type d'échangeur où la température du fluide froid ne peut pas dépasser la température de sortie du fluide chaud. Au cours de leur parcours à travers l'échangeur, les températures des fluides varient longitudinalement, sauf si l'un des fluides subit un changement de phase. Cette configuration permet un transfert de chaleur efficace entre les deux fluides tout en respectant les limites de température établies [13].

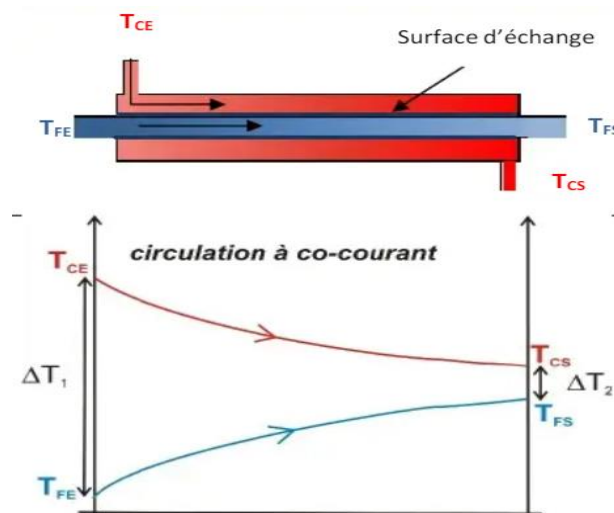


Figure I.3 Échangeur de chaleur à Co-courant [14].

▪ Écoulement contre-courants

L'écoulement contre-courants, également appelé écoulement des fluides parallèles mais de sens contraires, se produit lorsque deux fluides se déplacent dans la même direction mais à des vitesses opposées. Cette configuration particulière peut être observée dans divers contextes, tels que les échangeurs de chaleur ou les rivières où deux courants se rencontrent. Un échangeur à contre-courant est un dispositif où le fluide froid circule en sens inverse du fluide chaud, ce qui permet au fluide froid d'atteindre une température supérieure à celle du fluide chaud en sortie. Cette configuration est considérée comme très efficace pour le transfert de chaleur. L'un des principaux avantages de l'échangeur à contre-courant par rapport à l'échangeur à co-courant est qu'il nécessite des surfaces d'échange plus réduites pour un même flux de chaleur.

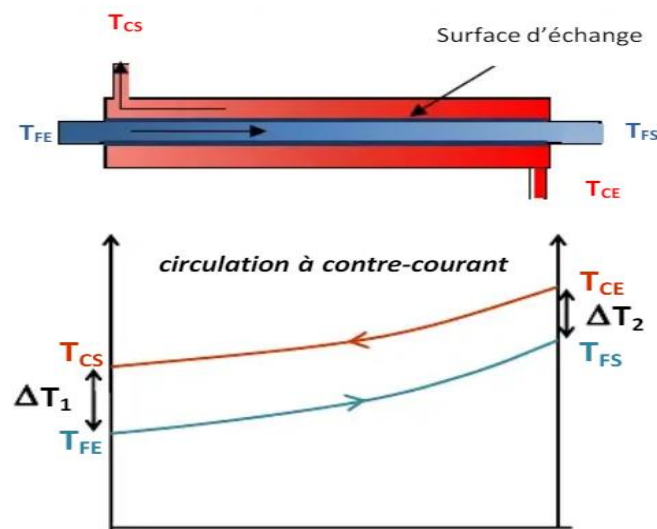


Figure I.4 Échangeur à tube à contre-courant [14].

▪ Ecoulement des fluides croisés avec ou sans brassage

Les deux fluides s'écoulent de manière perpendiculaire l'un par rapport à l'autre. Le fluide non brassé est canalisé, c'est-à-dire qu'il circule à travers une veine divisée en plusieurs canaux parallèles distincts et de faible section. En revanche, l'autre fluide circule librement entre les veines et est partiellement brassé en raison des tourbillons créés par les tubes. Ce brassage a pour effet d'homogénéiser les températures dans les différentes sections de la veine fluide. Ainsi, grâce à ce processus, les températures ne varient pas uniquement en fonction de la direction de l'écoulement, mais également à l'intérieur de la section de la veine [15].

I.8.5 Classement suivant la nature du matériau de la paroi d'échange

On retiendra deux types de paroi [15]:

- Les échangeurs métalliques en acier, cuivre, aluminium ou matériaux spéciaux : superalliages, métaux ou alliages réfractaires ;
- Les échangeurs non métalliques en plastique, céramique, graphite, verre, etc.

II.8.6 Classement technologique

Les principaux types d'échangeurs rencontrés sont les suivants [15]:

- Tubulaire: monotubes, coaxiaux ou multitubulaires ;
- à plaques : à surface primaire ou à surface secondaire ;

I.9 Types des échangeurs de chaleur

I.9.1 Échangeur de chaleur tubulaire

Il s'agit d'un appareil composé d'un ensemble de tubes agencés à l'intérieur d'un boîtier appelé calendrier. Le fluide circule dans deux sens différents : l'un à l'intérieur des tubes et l'autre à l'extérieur du réseau formé par les tubes. Ce réseau permet également d'assurer l'entrée et la sortie du liquide autre que celui circulant à l'intérieur des tubes, en suivant un trajet défini par des barrières.

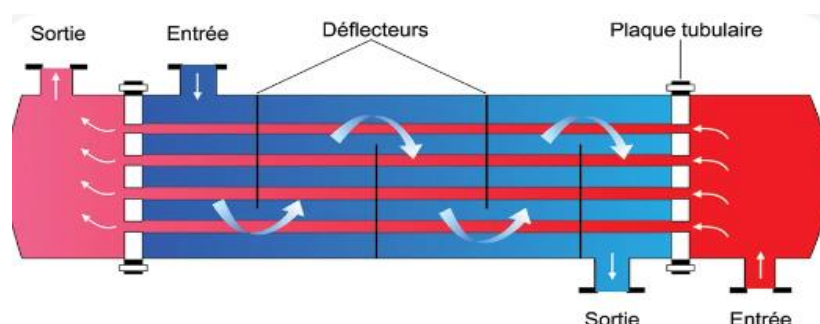


Figure I.5 schéma d'un échangeur de chaleur tubulaire.

I.9.2 Échangeur de chaleur à plaque

Les échangeurs de chaleur à plaques sont parmi les types les plus répandus et les plus utilisés dans l'industrie. Ils sont constitués d'un ensemble de feuilles métalliques disposées de manière à former des plaques caractérisées par leur forme circulaire. Cette configuration favorise la création d'un écoulement turbulent à l'intérieur de l'échangeur, ce qui permet d'assurer un transfert de chaleur optimal. Il est à noter que le nombre de plaques utilisées dans un échangeur est directement lié à sa taille et à sa capacité. En effet, plus le nombre de plaques est élevé, plus l'échangeur sera en mesure de traiter de grandes quantités de liquides de manière efficace.

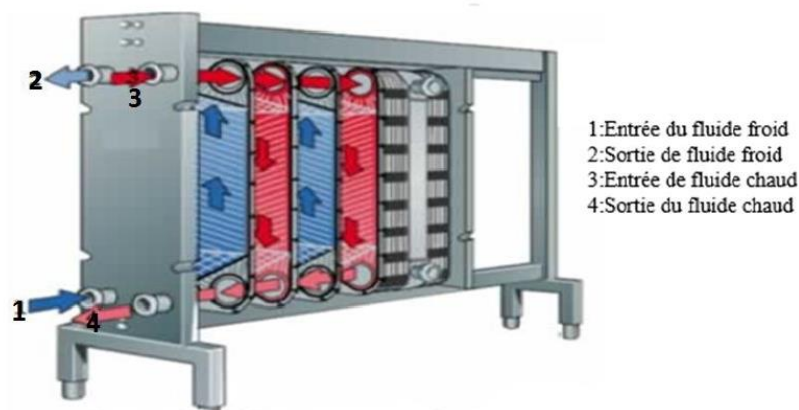


Figure I.6 schéma d'un échangeur à plaques

I.10 Les caractéristiques

Échangeur à deux fluides liquides ou à deux fluides gazeux, il est constitué de deux tirants auxquels sont fixées des plaques de métal à ondulations en nombre variable garnies de joints d'étanchéité à leur périphérie. L'échange de chaleur est intensifié par l'augmentation de la turbulence favorisée par des ondulations. Il est le plus simple car il est facile à nettoyer et inspecter le produit alimentaire ou l'eau potable. Il est employé en pasteurisateurs aussi le préchauffage de l'eau des chaudières avec des effluents d'eau chaude, le préchauffage de l'eau d'un échaudoir, le chauffage de l'eau potable [15].

I.11 L'efficacité de l'échangeur thermique

I.11.1 Rendement

Il est crucial de minimiser les pertes thermiques pour garantir un rendement optimal de l'échangeur thermique. Ainsi, il est primordial de choisir un matériau extrêmement conducteur lors de la conception de cet équipement. En optant pour un système offrant le rendement le plus élevé, on peut constater une réduction immédiate de la consommation d'énergie. Cette efficacité

se vérifie dans divers domaines tels que le chauffage, la climatisation et la production d'eau chaude sanitaire. Que l'on parle d'une chaudière, d'un chauffe-eau, d'un ballon d'accumulation, de radiateurs ou d'une pompe à chaleur, il est essentiel d'assurer un échange calorifique optimal entre les différents fluides en circulation.

I.11.2 Température

L'écart de température entre les deux fluides qui circulent dans l'échangeur thermique revêt une importance capitale. En effet, que ce soit exprimé en Kelvin (K) ou en degrés Celsius (°C), le delta de température (ΔT), aussi appelé écart, doit être significatif pour garantir un échange de chaleur efficace. En l'absence de cet écart, le transfert de chaleur serait compromis, voire rendu extrêmement laborieux, ce qui entraînerait une consommation énergétique plus élevée. Afin d'assurer le chauffage du fluide primaire, le mécanisme intégré à l'échangeur thermique va procéder à la récupération de l'énergie produite soit par des résistances électriques, soit par des produits de combustion tels que le gaz, par exemple.

I.12 Équipements couramment utilisés dans un pasteurisateur de lait

Ces équipements fonctionnent ensemble pour garantir que le lait est chauffé à la température appropriée pendant le temps nécessaire pour éliminer les microorganismes pathogènes, puis refroidi rapidement pour préserver sa qualité et sa sécurité.

- **Réservoir de stockage du lait brut :** Un réservoir cylindrique en acier inoxydable avec des agitateurs à l'intérieur et un couvercle hermétique. Des tuyaux d'entrée et de sortie pour le lait, avec des jauges de niveau et de température sur le côté.
- **Échangeur de chaleur:** Un ensemble de plaques métalliques fines empilées les unes contre les autres, formant des passages pour le lait et le fluide de chauffage/refroidissement. Une vue éclatée montrant les plaques et les flux de fluides serait idéale.
- **Pompe de circulation :** Une pompe en acier inoxydable avec une entrée et une sortie pour le lait, souvent avec un moteur électrique monté dessus. La pompe est installée sur une base robuste.

- **Chaudière ou générateur de vapeur** : Un grand conteneur cylindrique avec des connexions pour l'eau et la vapeur, des soupapes de sécurité, et des jauges de pression et de température. Le tout monté sur une base solide.
- **Thermomètres et contrôleurs de température** : Un affichage numérique montrant la température avec des capteurs insérés dans les tuyaux. Un contrôleur électronique avec des boutons pour régler les paramètres.
- **Capteurs de pression** : Des dispositifs cylindriques attachés aux tuyaux, avec un affichage numérique ou analogique de la pression. Les capteurs sont connectés à des câbles pour la surveillance en temps réel.
- **Tuyauterie en acier inoxydable** : Un réseau de tuyaux en acier inoxydable brillant, avec des coudes, des raccords, et des vannes. Les tuyaux sont supportés par des structures métalliques.
- **Vannes et régulateurs** : Des vannes manuelles et automatiques avec des poignées rotatives ou des actionneurs électriques. Les régulateurs sont montés sur les tuyaux avec des cadrans de réglage.
- **Réservoir de rétention** : Un réservoir cylindrique en acier inoxydable avec des connexions pour l'entrée et la sortie du lait. Le réservoir a une isolation thermique et des capteurs de température intégrés.
- **Système de refroidissement** : Un échangeur de chaleur compact avec des tuyaux pour l'eau glacée et le lait. Un compresseur et un réservoir d'eau glacée sont connectés au système.
- **Système de nettoyage en place (CIP)** : Un ensemble de réservoirs et de pompes connectés à des tuyaux de nettoyage. Les réservoirs contiennent des solutions de nettoyage et de désinfection. Des vannes automatisées contrôlent le flux des solutions à travers les équipements.
- **Contrôleurs automatiques** : Un panneau de commande électronique avec un écran tactile et divers boutons de contrôle. Le panneau est monté sur un boîtier en acier inoxydable avec des connexions pour les capteurs et les actionneurs.

Chapitre II : Méthodologie Des Plans D'expériences

II.1 INTRODUCTION

Les méthodes de simulation lors d'études multiparamétriques sont souvent informelles et peu efficaces. En général, cela entraîne de nombreux essais superflus et une quantité de résultats difficile à exploiter. Grâce à la méthodologie des plans d'expériences, il est possible d'obtenir le maximum d'informations pertinentes sur l'influence des facteurs en utilisant un nombre d'essais donné. Ce chapitre expose la méthodologie des plans d'expériences. On aborde ici la technique de screening en introduisant les plans factoriels, complets et fractionnaires. En utilisant cette méthode, on réduira considérablement le nombre de facteurs supposés influents sur un procédé et on éliminera les facteurs ayant peu d'impact. Ensuite, la démarche de la méthode Taguchi est exposée. La technique de la surface de réponse, avec l'utilisation de plans composites centrés, est couramment employée pour optimiser les phénomènes complexes et non linéaires. L'utilisation de la modélisation par surface de réponse pour représenter les caractéristiques de qualité (réponses) d'un système nous permettra de réduire le temps de calcul requis pour l'optimisation, sans nécessiter l'utilisation de cette méthode. Grâce à cette méthode, nous pouvons déterminer la fonction objective requise pour le processus d'optimisation. En raison de l'importance de l'optimisation globale pour les entreprises, nous avons opté pour l'utilisation de la technique de désirabilité afin d'optimiser simultanément plusieurs réponses. Les fondements théoriques de cette méthode seront aussi exposés. Les applications à l'optimisation des conditions seront utilisées pour valider ces méthodes dans le quatrième chapitre de cette mémoire.

II.2 LA METHODOLOGIE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.2.1 Historique

Les méthodes mathématiques et statistiques utilisées dans l'expérimentation sont à l'origine des plans d'expériences. Les agronomes ont été les premiers scientifiques à se poser la question de l'organisation des essais. En effet, ils étaient confrontés à de nombreux paramètres à étudier et ne pouvaient pas augmenter le nombre d'expériences. En outre, la durée des expériences était un autre obstacle important. C'est Fisher qui, pour la première fois en 1925, suggéra une approche qui permettait d'étudier simultanément plusieurs facteurs. Des statisticiens et des mathématiciens ont repris cette méthode et ont élaboré des tables d'expériences qui permettent de réduire considérablement le nombre d'expériences à réaliser tout en préservant la pertinence de la campagne d'essais. Par la suite, les grandes entreprises ont pris en compte cette méthodologie dans le cadre de l'approche qualité suite aux recherches du Docteur Taguchi [16]. Dans les années 1960, il a joué un rôle majeur dans l'expansion de l'utilisation des plans

d'expériences en milieu industriel au Japon. Ces dernières années, cette approche, en raison de la pertinence des données fournies, s'est développée dans la majorité des domaines d'activité. Il est possible d'appliquer la Méthodologie des Plans d'Expériences (MPE) à tous les phénomènes de type boîte noire (Figure II-1) où l'objectif est d'améliorer les données de sortie (les réponses) en ajustant les données d'entrée (les facteurs). Dans la littérature, les données d'entrée sont généralement considérées comme des facteurs qui peuvent être maîtrisés, mais il y a parfois des facteurs qui ne peuvent pas l'être, ce qui a donné naissance à l'appellation de facteurs bruits.

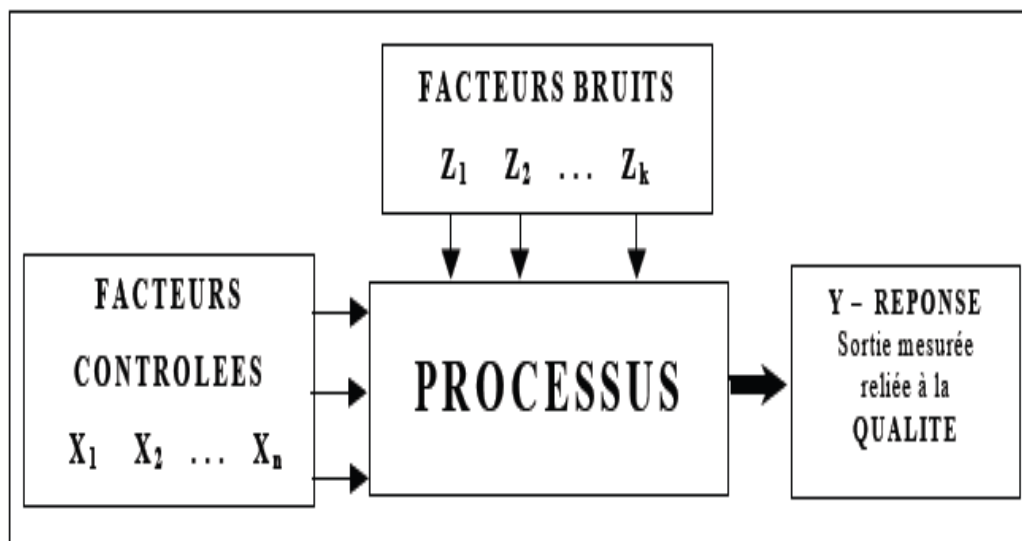


Figure II.1 La boîte noire du processus.

II.2.2 Principe

La méthode des plans d'expériences nous permettra de satisfaire à nos besoins. Effectivement, son fonctionnement repose sur la variation simultanée des niveaux d'un ou plusieurs facteurs (variables, discrètes ou continues) à chaque essai. Cela entraînera une réduction significative du nombre d'expériences à effectuer tout en augmentant le nombre de facteurs étudiés. Cela permettra de repérer les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse, c'est-à-dire une grandeur utilisée comme critère, et de modéliser les résultats de manière simple. La difficulté dans l'utilisation des plans d'expériences consistera donc à réduire au maximum le nombre d'expériences à réaliser sans compromettre la précision des résultats. Plusieurs livres sont consacrés aux plans d'expériences. Les plans d'expériences sont clairement présentés dans celui publié par l'association Expérimentée [17] et il est accompagné d'une bibliographie commentée très riche qui permet à l'expérimentateur de trouver les informations qui lui sont indispensables. Actuellement, il y a un grand nombre de plans différents. Chacun, grâce à ses

caractéristiques, offre la possibilité de résoudre des problèmes spécifiques. Les plans d'expériences peuvent toutefois être classés en deux grandes catégories : – les plans d'étude (estimation et comparaison) des effets des paramètres, – les plans de réglage des paramètres pour atteindre un optimum.

La clé de la démarche expérimentale de l'expérimentateur consiste à mettre en place un plan d'expériences pour répondre à une problématique spécifique. Il est donc nécessaire de sélectionner ou de créer le plan qui fournira les renseignements recherchés. L'utilisation du même plan ne permettra donc pas d'étudier de manière efficace les effets des paramètres tout en cherchant un optimum. Pour obtenir des informations pertinentes, il est nécessaire de suivre une démarche méthodologique :

- descriptions des buts et des critères,
- élaboration des éléments analysés et du champ d'étude,
- élaboration du programme d'expériences,
- expérimentation, – étude des conclusions,
- possibilité de mener des essais supplémentaires,
- vérification des conclusions,
- résumé de l'étude.

II.2.3 Expérimentations

Une expérimentation est une évaluation ou une série d'évaluations permettant d'explorer, de définir et de construire des données (résultats d'essais) pour modéliser ou prévoir le comportement d'un système ou d'un procédé [18]. Classiquement, les expériences dans la MPE sont des expériences réelles pour lesquelles la modification des conditions expérimentales correspond à des variations plus ou moins importantes sur la réponse à étudier. Les réponses expérimentales sont soumises à des erreurs expérimentales et aux erreurs de mesure. Les simulations numériques permettent de modéliser des phénomènes complexes, de mieux les comprendre et de procéder à des expérimentations par voie numérique en modifiant certains de leurs paramètres. Cette technique met en œuvre des modèles théoriques qui sont les clones de phénomènes réels, souvent très difficiles à modéliser. Si leur utilisation est généralement plus économique et plus souple que les expériences réelles, des validations expérimentales sont toujours nécessaires pour garantir leur pertinence. Malgré cet avantage économique, les simulations numériques sont des essais qui ne peuvent pas être répétés, parce que la variabilité naturelle des réponses n'est plus présente. Chaque réponse correspondant à un essai, est obtenue à partir d'une seule simulation numérique.

Par contre il existe aussi de nombreuses sources de variations présentes lors de l'initialisation et du déroulement des processus d'expérimentation numérique. Indépendamment de la MPE, parmi les sources de variations on peut citer :

- précision des données d'entrée, compréhension du phénomène à modéliser,
- les possibilités réelles des logiciels utilisés pour la modélisation,
- degré de simplification adopté pour le modèle proposé,
- caractéristiques du maillage du modèle,
- capacité de l'ordinateur, etc.

De plus il faut tenir compte aussi des inconvénients liés à la MPE :

- type de plan utilisé,
- type de modélisation utilisée, etc.

II.2.4 Modélisation de la réponse

Lorsqu'on réalise une étude expérimentale (ou des simulations numériques), d'un phénomène ou d'un procédé, on la caractérise par des réponses dont on suit les variations de en fonction divers paramètres (facteurs) influents. Généralement, l'illustration des résultats est donnée par la représentation graphique de la réponse (surface de réponse) en fonction de deux paramètres (on est limité à l'espace en trois dimensions). Si on considère une réponse théorique Y_{th} , dépendant de n paramètres (facteurs) $x_1, x_2, \dots, x_n$ on peut écrire :

$$Y_{th} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (\text{II.1})$$

Mais la réponse théorique est différente de la réponse obtenue par voie expérimentale ou numérique Y_{exp} à cause des erreurs expérimentales (ou numériques) inhérentes. L'expression précédente devient :

$$Y_{exp} = Y_{th} + \varepsilon = F(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (\text{II.2})$$

D'une manière générale pour la modélisation d'un système n'ayant que deux variables, on peut écrire le modèle comme suit :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 \quad (\text{II.3})$$

Ce modèle explique la variation de la réponse Y en fonction des deux variables considérées x_1, x_2 , en supposant que la relation est linéaire. Cette hypothèse nous amène à utiliser la régression linéaire [19, 20] pour obtenir les coefficients du modèle dont la représentation géométrique est un plan de régression (Figure II-2).

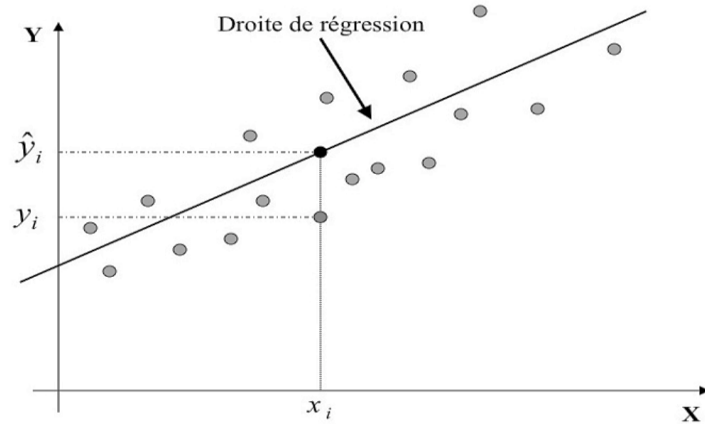


Figure II.2 Plan de régression pour deux variables.

Le plan est ajusté selon le principe des moindres carrés où les sommes des carrés des erreurs d'estimation de la variable dépendante sont minimisées (Figure II-2). S'il y a plus de deux variables, on peut étendre la méthode en ajoutant les variables et leurs paramètres :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \cdots + \beta_p \cdot x_p \quad (\text{II.4})$$

Cette équation est celle d'un hyperplan à p dimensions. Les paramètres β_i sont **les pentes** de l'hyperplan dans les dimensions considérées, et sont appelés **coefficients de régression**.

II.2.5 Intérêt du codage des variables

L'intérêt du codage de variables, tient à l'homogénéité de l'équation polynomiale (modèle) que l'on établit pour la représentation mathématique de la réponse. D'une manière générale on peut affirmer que les paramètres ou les variables d'origine pour un modèle donné, notés P_k , n'ont pas nécessairement les mêmes dimensions ce qui rend difficile la comparaison de leurs coefficients. Dans le cas où les variables sont codées, toutes varient entre les mêmes valeurs minimales et maximales (respectivement -1 et $+1$ notation largement acceptée quand il y a deux niveaux par facteur) elles n'ont plus de dimension, et les coefficients β_i ont tous alors la dimension de la réponse.

D'après [21], lorsque l'on attribue la valeur -1 au niveau bas et la valeur $+1$ au niveau haut, on effectue deux modifications importantes :

- on change l'unité de mesure,
- on déplace l'origine des mesures.

Ces deux modifications entraînent l'introduction de nouvelles variables que l'on appelle variables centrées réduites ou variables codées (centrées pour indiquer le changement d'origine et réduites pour signaler la nouvelle unité).

Le passage des variables d'origine P_k aux variables centrées réduites x_k et inversement, est donné par la relation suivante [22]:

$$x_k = \frac{P_k - P_k^0}{\Delta P_k} \quad (\text{II.5})$$

avec :

- x_k : la valeur de la variable codée k ;
- P_k : la valeur de la variable naturelle k ;
- p_k^0 : la valeur de la variable naturelle k au centre du domaine d'étude.
- ΔP_k : est appelé pas de variation et il mesure la variation de la variable réelle k associée à une variation d'une unité de la variable codée correspondante.

Les variables x_k sont appelées variables centrées réduites et elles sont utilisées pour faciliter les comparaisons et l'étude des variations. En travaillant avec ces variables codées, nous pouvons comparer directement leurs différents effets sans tenir compte de leurs unités.

II.2.6 Principales composantes de la méthodologie des plans d'expériences

La MPE est une approche visant tous les phénomènes de type **boîte noire** pour lesquelles on cherche les valeurs optimales des données d'entrée - **les facteurs**, qui permettent une meilleure maîtrise des données de sortie - **les réponses**. Les trois principales composantes de la MPE qui nous intéressent dans cette étude sont :

- la **Méthode Taguchi**
- la **technique de criblage** (ou de **screening** - appellation anglo-saxonne) L'analyse d'un système ou d'un processus commence toujours par une identification de toutes les causes susceptibles d'influencer d'une manière significative le bon déroulement du processus. Parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, la technique de criblage permet de déterminer ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur la variation de la réponse. Cet outil nous permet aussi une simplification du problème (appelée aussi débroussaillage). La question pour laquelle il faut trouver une réponse en utilisant cette technique est :

Pourquoi la réponse varie et surtout en fonction de quels facteurs ?

- la **méthodologie des surfaces de réponse** Dans le processus d'optimisation on cherche à améliorer le comportement d'un système ou d'un processus, dans un domaine expérimental bien défini, influencé par une ou plusieurs variables. La méthodologie de surface de réponse permet de trouver d'une façon empirique mais économique le lien qui existe entre les paramètres (les facteurs) d'un processus ou d'un système et les caractéristiques de qualité (les réponses) recherchées par l'expérimentateur.

D'une manière générale on peut rappeler que les objectifs de la MPE sont multiples, en présente ici quelques-uns ainsi que les plans d'expériences concernés :

- diminuer le nombre d'essais (réels ou simulations numériques)
- étudier un nombre très grand de facteurs (plans fractionnaires)
- détecter les facteurs influents (plans de criblage)
- détecter les interactions entre les facteurs (confusion ou alias)
- rechercher l'optimum (nominal ou extrémum)
- réduire la variabilité ou d'étudier la robustesse d'un processus (plans produits)
- obtenir la meilleure précision sur le résultat (réponse)
- modéliser et optimiser les résultats ou les réponses (plans pour surface de réponse).

II.2.7 La Méthodologie des Surfaces de Réponse

L'optimisation de procédé cherche à trouver l'ensemble des conditions de fonctionnement pour les variables du procédé qui ont comme conséquence la meilleure performance du processus. La Méthodologie des Surfaces de Réponse (MSR) [23], [24], [25] et [26] est une collection de stratégies expérimentales de méthodes mathématiques et statistiques qui permet à un expérimentateur de choisir la meilleure des combinaisons des niveaux des paramètres qui optimise un processus. La MSR est une approche d'optimisation développée au début des années 50 par Box et Wilson [27]. De nombreux chercheurs ont contribué à enrichir cette méthode [28] et elle a été introduite en Europe vers les années 1988 - 1990.

L'objectif d'une telle méthodologie est de :

- déterminer les conditions de fonctionnement optimales pour un système ou un processus,
- déterminer une région de l'espace des facteurs dans laquelle des caractéristiques de fonctionnement (les réponses) sont satisfaites,
- modéliser et analyser un processus pour lequel la réponse est influencée par plusieurs variables,
- établir un rapport (équation de la surface de réponse) entre la réponse et les variables indépendantes qui est dans la plupart des cas inconnu.

Cette technique, issue des techniques de plans d'expériences, vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis à vis des facteurs d'influence significative d'un certain processus ou système. À l'origine, la MSR a été développée pour modéliser des réponses expérimentales [21], puis, pour modéliser des expériences numériques (peu développé) vers les années 1995. Mais à cause d'un développement rapide du marché et d'une concurrence importante, ces dernières années les chercheurs ont commencé à utiliser de plus en plus les expériences numériques [29], [30] et [31] pour une bonne et simple raison: c'est bien moins cher par rapport aux expérimentations réelles.

La MSR est basée sur une relation d'approximation entre la réponse mesurée y et n variables aléatoires (les facteurs étudiés) en utilisant les données observées d'un processus ou d'un système. La réponse est généralement obtenue par des essais réels ou des simulations numériques. Dans la plupart des cas, la fonction Y qui est une approximation de la réponse mesurée y , est un modèle polynomial du premier ou deuxième degré. Généralement le modèle est donné par :

$$Y = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_j + \sum_{j=1}^p \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j}^p \beta_{ij} x_i x_j \quad (\text{II.6})$$

Ce modèle est appelé surface de réponse (Figure II.3) et il est très classique pour décrire des phénomènes physiques. Afin de prévoir plus exactement la réponse, un modèle de second

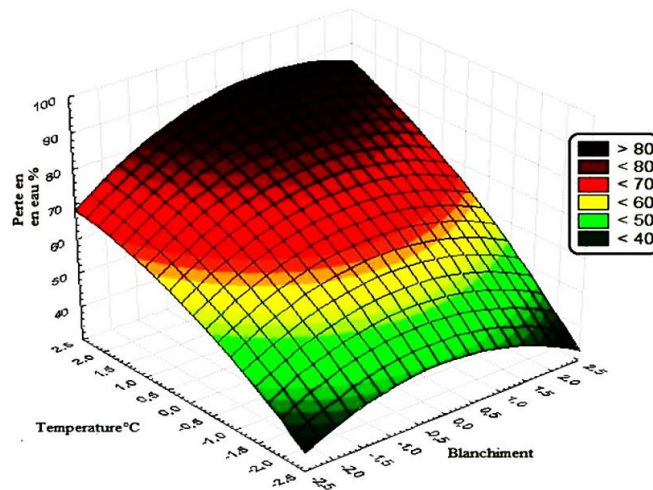


Figure II.3 Surface de Réponse.

ordre est utilisé pour chercher le caractère non linéaire du phénomène étudié. De même la fonction Y d'approximation, peut être écrite sous la forme matricielle comme suit :

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (\text{II.7})$$

Dans la relation ci-dessus X est la matrice de calcul des effets ou la matrice d'expériences, le vecteur β est le vecteur des coefficients du modèle qui contient seulement les coefficients du modèle qui ne sont pas connus, mais qui sont déterminés généralement en minimisant la somme des carrés des résidus ε .

II.2.7.1 Régression multilinéaire

L'objectif de la régression multilinéaire est de trouver un ensemble de coefficients qui résout le mieux possible le système d'équations ci-dessus (équation II.7). Si on fait l'hypothèse de

moindres carrés [19, 20], on cherche le jeu de coefficients qui minimise la somme des carrés des écarts. Sous la forme matricielle on peut écrire :

$$\varepsilon^t \cdot \varepsilon \quad (\text{II.8})$$

La somme sera minimale, par rapport aux coefficients si :

$$\frac{\partial \varepsilon^t \cdot \varepsilon}{\partial \beta} = 0 \quad (\text{II.9})$$

En utilisant la méthode de moindres carrés la solution est donnée par :

$$\hat{\beta} = (X^t \cdot X)^{-1} \cdot X^t \cdot Y \quad (\text{II.10})$$

Cette relation est fondamentale pour la compréhension de l'hypothèse des moindres carrés. Le jeu de coefficients ainsi obtenu, appelé aussi coefficients de régression, est utilisé par la suite pour obtenir les réponses dans tout le domaine d'étude.

$$\hat{Y} = X \cdot \hat{\beta} \quad (\text{II.11})$$

II.2.7.2 Recherche globale de l'ajustement du modèle

Si on reprend l'équation (II.7) on peut écrire que

$$Y = \hat{Y} + \varepsilon = X \cdot \hat{\beta} + \varepsilon$$

(II.12)

On peut démontrer aussi que la somme des carrés des réponses mesurées est égale à la somme des carrés de réponses prédites augmentée de la somme des carrés des résidus, soit

$$Y^t \cdot Y = \hat{\beta}^t \cdot X^t \cdot X \cdot \hat{\beta} + \varepsilon^t \cdot \varepsilon \quad (\text{II.13})$$

L'équation (II.13) s'appelle l'équation de l'analyse de la variance et elle représente la synthèse de l'analyse statistique.

- la somme des carrés des réponses mesurées ou la Somme des Carrés Totaux (SCT)
- la somme des carrés de réponses prédites ou la Somme des Carrés due à la régression (SCR).
- la Somme des Carrés des résidus ou due à l'Erreur (SCE).

Pour évaluer le degré d'explication du modèle par rapport aux réponses mesurées, on établit le rapport R^2 .

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} \quad (\text{II.14})$$

Ce rapport s'appelle **coefficient de corrélation multiple**, ou coefficient de **détermination**, il nous donne une indication sur la qualité de l'ajustement. En fait, il représente le rapport entre la variance expliquée par le modèle ou due à la régression (SCR) et la variance totale (SCT). Il

nous donne des informations sur l'existence d'une relation linéaire entre les variables considérées.

Le rapport R^2 (équation II.14) varie entre 0 et 1. S'il vaut zéro c'est que le modèle n'explique rien. S'il vaut 1 c'est que le modèle explique toutes les réponses mesurées. Ce rapport (R^2) n'est pas une garantie absolue de la qualité du modèle. Un coefficient de corrélations nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les variables considérées. Il peut exister une relation non-linéaire. Cependant dans le contexte de la régression multiple, cela pose le problème de la sur-paramétrisation du modèle. Plus on ajoute de variables explicatives (les facteurs), plus le R^2 augmente, même si les nouvelles variables explicatives sont très reliées à la variable dépendante (la réponse). Tout dépend du nombre de résultats et du modèle choisi. Pour éviter ce phénomène, on calcule le coefficient R^2 ajusté.

II.2.7.3 Le R^2 ajusté

Par définition, ce coefficient R^2 ajusté - R_A^2 est donné par la relation [GOU 21] :

$$R_A^2 = 1 - \frac{SCE / (N - p - 1)}{SCT / (N - 1)} \quad (\text{II.15})$$

Où :

- p est le nombre de facteurs
- N correspond au nombre total de simulations du plan d'expériences.

II.2.7.4 Stratégie de sélection du meilleur sous-modèle

Lorsque le nombre de facteurs est grand, il n'est pas raisonnable d'explorer tous les modèles possibles afin de sélectionner le **meilleur**. Différentes stratégies sont donc proposées qui doivent être choisies en fonction de l'objectif recherché et des moyens de calcul disponibles.

Trois types d'algorithmes utilisés souvent dans la littérature [32] sont résumés ci-dessous :

1. Pas à pas pour lequel il y a trois modalités :
 - Sélection (forward)
 - Élimination (backward)
 - Mixte (stepwise)
2. Par échange pour lequel il y a deux modalités :
 - Maximisation de R^2
 - Minimisation de R^2
3. Global

– L'algorithme de Furnival et Wilson

II.2.7.5 Plans Composite Centraux

Les Plans Composites Centraux sont un bon complément des plans orthogonaux, de par leurs propriétés statistiques, mais aussi parce qu'ils sont meilleurs que les plans orthogonaux pour certains problèmes [20]. Ils sont développés, en particulier, dans la Méthodologie des Surfaces de Réponse, et ils permettent l'étude d'un modèle quadratique, dans la plupart des cas des phénomènes non linéaires. Tous les facteurs pour lesquels on souhaite tester l'influence quadratique auront 5 niveaux. Les plans composites centraux sont constitués de trois parties, ce qui permet une démarche séquentielle [33] :

1. Le point au centre du domaine expérimental (Figure II.4), usuellement noté par 0 répété plusieurs (n_0) fois pour estimer la variance de répétabilité.
2. Un plan orthogonal en NF essais, qui est le plus souvent un plan factoriel ou un plan de Box-Hunter, et qui combine des facteurs à 2 niveaux usuellement notés +1 et -1.
3. Les points en étoile (Figure II.4). Ces points représentent 2 essais par facteur, usuellement notés $+\delta$ et $-\delta$.

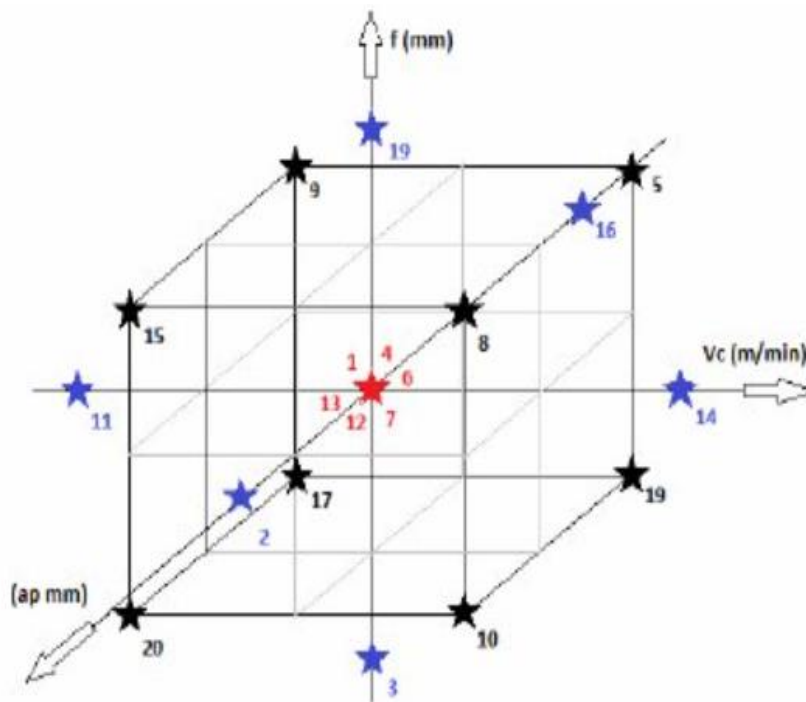


Figure II.4 Plan composite centré pour 3 facteurs.

Le domaine de variation des facteurs est ramené à $[-\delta; +\delta]$. Ainsi, un facteur variant dans l'intervalle $[\text{Min}; \text{Max}]$ sera découpé en 5 niveaux : $-\delta, -1, 0, +1, +\delta$ calculés selon le tableau II.1.

Niveau	Valeurs réelles
$-\delta$	Min
-1	$\frac{Min + Max}{2} - \frac{1}{\delta} \left(Max - \frac{Min + Max}{2} \right)$
0	$\frac{Min + Max}{2}$
+1	$\frac{Min + Max}{2} + \frac{1}{\delta} \left(Max - \frac{Min + Max}{2} \right)$
$+\delta$	Max

Tableau II.1 Calcul des niveaux des facteurs

Le paramètre δ est supérieur à 1 et est calculé grâce à la formule :

$$\delta = \sqrt[4]{N_F} \quad (\text{II.16})$$

Où :

– N_F est le nombre d'essais du plan orthogonal

Le nombre total des essais N peut être calculé grâce à la formule :

$$N = N_F + N_\delta + n_0 = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \quad (\text{II.17})$$

Où :

– $N_F = 2^k$ est le nombre des essais pour le plan factoriel $2k$ (figure II.4 – les points en rouge).

– $N_\delta = 2k$ est le nombre des essais appelé en étoile (figure II.4).

– n_0 est le nombre des essais au centre du domaine pour estimer la variance de répétabilité. (Figure II.4 - le point en bleu ou le point central).

II.2.7.6 Propriétés des plans composites centrés

La qualité d'un modèle dépend de la matrice de dispersion $(X^T X)^{-1}$, donc des éléments de la matrice d'information $(X^T X)$, et par conséquent de la structure de la matrice d'expériences et de la forme analytique du modèle. Il est donc nécessaire de classer les matrices d'expériences de bonne qualité, qui, si le modèle postulé représente bien le phénomène étudié, nous permettra de connaître en n'importe quel point du domaine expérimental d'intérêt la valeur de la réponse. Il existe plusieurs critères de qualité mais dans ce rapport on ne présente que les propriétés d'isovariance par rotation et presque orthogonalité qui confèrent aux plans d'expériences par surfaces de réponse une meilleure qualité de la modélisation.

Un plan d'expériences remplit la propriété d'isovariance par rotation si la variance des réponses prédites est la même en tous les points du domaine d'étude [19]. La propriété d'isovariance par rotation est une condition nécessaire à l'obtention d'une précision uniforme. La propriété d'isovariance par rotation pour un plan composite centré est remplie si la distance entre les points en étoile (Figure II.4) satisfait la condition :

$$\delta = (2^k)^{1/4} \quad (\text{II.18})$$

Où : k est le nombre de facteurs étudiés.

A la place de l'isovariance par rotation, on peut respecter le critère d'orthogonalité. Pour cela il faudrait une disposition des points qui entraîne une matrice d'information ($X^T X$) diagonale. Mais cela n'est pas possible car on ne peut pas annuler les éléments correspondant aux termes constants et aux termes carrés qui sont différents de zéro et ne se retrouvent pas sur la diagonale de la matrice d'information. Pour cela il faut donc envisager un autre critère, celui de la presque orthogonalité. Pour aboutir à ce critère il faut que la sous-matrice, obtenue en éliminant la première ligne et la première colonne de l'inverse de la matrice d'information ($X^T X$), soit diagonale. On peut démontrer [21] que cela est possible si :

$$\delta = \left(\frac{N_F (\sqrt{N} - \sqrt{N_F})^2}{4} \right)^{1/4} \quad (\text{II.19})$$

Le nombre de points des plans factoriels et de points en étoile est, en général défini par l'expérimentateur avant les essais. La valeur de δ est donc fonction du nombre des points au centre n_0 . Le tableau II.2 permet de choisir ce nombre et la valeur de δ pour respecter le critère de presque orthogonalité [DRO 22].

Valeur de n_0	Nombre de facteurs						
	1	2	3	4	5	6	7
$n_0 = 1$	1	1,215	1,414	1,547	1,596	1,724	1,761
$n_0 = 2$	1,078	1,287	1,483	1,607	1,662	1,784	1,824
$n_0 = 3$	1,147	1,353	1,547	1,664	1,724	1,841	1,885
$n_0 = 4$	1,21	1,414	1,607	1,719	1,784	1,896	1,943

Tableau II.2 Valeurs de δ fonction du nombre de points au centre du domaine.

II.2.7.7 Utilité des points au centre du domaine d'étude

Parce qu'un plan composite centré n'est pas orthogonal (l'inverse de la matrice d'information ou matrice de dispersion n'est pas diagonale - voir la propriété d'orthogonalité) et ne peut jamais l'être [33], en augmentant le nombre de répétitions des essais au centre du domaine on tend vers l'orthogonalité. Les points au centre du domaine d'étude changent les propriétés des plans utilisés et nous apportent aussi des informations supplémentaires sur le modèle utilisé. Lorsque le nombre de points centraux augmente, on obtient une zone dans laquelle l'erreur de prédiction est uniforme [21] et par conséquent la qualité de la modélisation croît. Les essais au centre du domaine d'étude sont des essais répétés plusieurs fois dans les mêmes conditions afin d'estimer la variance de répétabilité. Les points au centre du domaine d'étude sont un outil nécessaire pour obtenir une information sur la présence ou non d'un effet quadratique pour un modèle postulé. Ces points sont utilisés aussi pour estimer l'erreur expérimentale et particulièrement pour chercher si le modèle proposé est adéquat. Par exemple pour un plan composite centré afin d'obtenir une variance uniforme sur la modélisation il faut ajouter 3 à 5 points centraux [20].

II.3 L'OPTIMISATION MULTICRITERES**II.3.1 introduction**

Typiquement, dans l'analyse des données industrielles il y a beaucoup de réponses (variables) qui devront être étudiées en même temps. En plus, pour optimiser ces réponses individuellement on peut rencontrer des contradictions pour les différents niveaux de facteurs acceptables pour une réponse et non pour les autres. Le but de l'optimisation multicritères est de minimiser au mieux les différents objectifs [34]. En effet, la solution que l'on obtient est une solution de compromis. Elle minimise un certain nombre d'objectifs tout en dégradant les performances sur d'autres objectifs. Mais finalement la solution acceptée va assurer une satisfaction globale sur le processus parce qu'elle répondra à plusieurs objectifs en même temps. Le but de ce paragraphe est de vous présenter une méthode d'optimisation multicritères, qui sera appliquée afin d'améliorer les performances d'usinage lors du tournage dur (Voir Chapitre V).

II.3.2 Méthode de Ch'ng

D'une façon générale, le coût de production est exprimé comme une somme du non qualité et du coût de fabrication. L'optimisation multicritères mesure la sensibilité des réponses pour la qualité finale des produits. Cette méthode propose pour chaque réponse $Y_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, p$, une fonction $d_j(Y_j(x))$ qui peut prendre des valeurs entre 0 et 1, valeurs qui mesurent la sensibilité de la réponse et qui s'appelle fonction de désirabilité. Ici x signifie le vecteur des

facteurs ou des variables indépendantes $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Après avoir défini les fonctions pour chaque réponse individuellement, une fonction objective globale est définie comme une moyenne géométrique des différentes désirabilités.

$$D(x) = \left[d_1(Y_1(x)) \cdot d_2(Y_2(x)) \cdot \dots \cdot d_p(Y_p(x)) \right]^{\frac{1}{p}} \quad (\text{II.20})$$

La fonction de désirabilité $d_j(Y_j(x))$ a été proposée originalement par [35] de deux façons :

$$d_j(Y_j(x)) = e^{\frac{Y_j(x) - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}}} \quad (\text{II.21})$$

$$d_j(Y_j(x)) = e^{-\left| \frac{Y_j(x) - Y_{\max j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right|} \quad (\text{II.22})$$

Puisque les transformations (II.21 ou II.22) ne sont pas très flexibles dans le sens où ces fonctions ne peuvent pas assumer une variété de formes, [36] et autres ont proposé deux autres fonctions :

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_j(x) \leq Y_{\min j} \\ \left(\frac{Y_j(x) - Y_{\min j}}{Y_{\max j} - Y_{\min j}} \right)^r & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 1 & \text{si } Y_j(x) \geq Y_{\max j} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$d_j(Y_j(x)) = \begin{cases} \left(\frac{Y_j(x) - Y_{\min j}}{T_j - Y_{\min j}} \right)^s & \text{si } Y_{\min j} \leq Y_j(x) \leq T_j \\ \left(\frac{T_j - Y_j(x)}{T_j - Y_{\max j}} \right)^t & \text{si } T_j \leq Y_j(x) \leq Y_{\max j} \\ 0 & \text{si } Y_j(x) \notin [Y_{\min j}; Y_{\max j}] \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Dans les équations (II.23) et (II.24), r , s et t sont des variables définies par l'utilisateur fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_j) pour une réponse j .

Les quantités Y_{minj} et Y_{maxj} représentent les limites de désirabilité pour la réponse j . L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse $Y_j(x)$, par une substitution des polynômes dans les équations (II.23), (II.24), afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation (II.20). Finalement, il reste une seule fonction objective pour chercher la solution x , tout en maximisant la désirabilité totale $D(x)$.

Comme il a été indiqué par [37] et autres, l'existence de points de discontinuité dans la fonction de désirabilité ne permet pas l'utilisation des algorithmes à base de gradient pour l'optimisation. Ainsi, [37] et autres ont proposé une fonction de désirabilité modifiée pour résoudre ce problème, de telle sorte que l'algorithme généralisé du gradient réduit (Generalized Reduced Gradient GRG) puisse être appliqué. Ils ont utilisé une fonction de désirabilité continue par intervalles pour laquelle le point de discontinuité a été corrigé en utilisant un polynôme quadratique de la forme :

$$f(Y) = A + BY + CY^2 + DY^3 + EY^4 \quad (\text{II.25})$$

Pour laquelle A , B , C , D et E sont des paramètres. Ils ont proposé cinq conditions à satisfaire par l'équation (II.27). Plus de détails au sujet de cette méthode peuvent être trouvés dans [37]. L'approche proposée par [38] n'a aucun point de discontinuité dans la fonction de désirabilité. Par ailleurs, cette approche permet l'utilisation de l'algorithme GRG qui trouve les configurations optimales pour les p réponses.

Pour la méthodologie de la surface de réponse l'utilisation des variables codées (ou des variables centrées réduites) pour trouver le modèle de régression pour p variables est une pratique courante. La relation la plus répandue pour la transformation des variables réelles en variable codées a été proposée par [39] :

$$x = \frac{2 \cdot t - (u + l)}{u - l} \quad (\text{II.26})$$

Pour laquelle :

- u est la valeur supérieure pour t
- l est la valeur inférieure pour t
- t est la valeur cible étudiée avec $l \leq t \leq u$
- x est la valeur codée qui correspond à t .

L'approche par la fonction de désirabilité est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie, pour traiter l'optimisation des procédés à réponses multiples. Dans une démarche d'optimisation globale, nous proposons dans ce rapport l'application de la technique de Ch'ng [38] afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément. La clef de la méthode consiste en l'addition de 1 dans la relation du changement de variables réelles en variables codées. Cette modification donne la nouvelle forme de la fonction de désirabilité :

$$d^*(Y) = \frac{2 \cdot Y - (USL + LSL)}{USL - LSL} + 1 = \left(\frac{2}{USL - LSL} \right) \cdot Y + \left(\frac{-2LSL}{USL - LSL} \right) \quad (\text{II.27})$$

Pour laquelle :

- USL est la valeur limite supérieure pour la réponse Y
- LSL est la valeur limite inférieure pour la réponse Y
- Y est la réponse ou une caractéristique de qualité avec $LSL \leq Y \leq USL$
- $d^*(Y)$ est la désirabilité proposée pour la fonction objectif avec $0 \leq d^*(Y) \leq USL$

La motivation de l'auteur [38] pour l'addition de 1 est de convertir la fonction de désirabilité ou de s'assurer qu'elle n'est pas négative.

La fonction de désirabilité $d^*(Y)$ proposée par cette méthode est utilisée pour transformer la qualité de la réponse par une valeur de désirabilité souhaitée.

$$0 \leq d^*(Y) \leq 2 \quad (\text{II.28})$$

La désirabilité totale proposée par [38] est obtenue par une somme pondérée avec les poids e_i (degré d'importance) de chaque réponse individuelle.

$$Desirabilite\ Totale = \frac{\sum_{i=1}^p e_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad (\text{II.29})$$

Pour laquelle :

- $d_i(Y_i)$ est la désirabilité individuelle pour la réponse Y_i
- $d_i(T_i)$ est la désirabilité individuelle ciblée T_i pour chaque réponse
- e_i est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle, avec la relation :

$$\sum_{i=1}^p e_i = 1 \quad (\text{II.30})$$

L'utilisation de cette approche d'optimisation est conseillée pour des phénomènes à caractère fortement non linéaire comme les procédés de fabrication. Son efficacité sera prouvée dans le chapitre d'applications (Chapitre V) afin d'optimiser plusieurs réponses simultanément durant le processus du tournage dur.

Les avantages de l'utilisation de la technique de Ch'ng sont :

- par cette approximation la fonction de désirabilité n'a pas des points de discontinuité. Cette fonction est continue, donc différentiable.
- l'approximation polynomiale n'est pas exigée.
- de plus la méthode proposée permet l'utilisation de l'algorithme GRG pour trouver l'optimum.

Chapitre III : Calculs et simulation

III .1 Introduction

L'industrie alimentaire occupe une place primordiale au sein de notre société, étant l'une des activités économiques les plus essentielles. Dans un contexte où les ressources sont limitées et où le gaspillage est un enjeu majeur, il devient crucial de savoir hiérarchiser les besoins fondamentaux et de s'assurer d'un approvisionnement futur adéquat pour assurer notre survie. Ainsi, l'optimisation thermodynamique des équipements utilisés pour assurer l'hygiénisation des aliments revêt une importance capitale, notamment dans le cadre d'une approche économiquement durable. Avant d'amorcer la simulation du système, il est impératif d'établir certaines hypothèses afin de cerner le problème de manière précise et de réduire le nombre de variables inconnues avec lesquelles nous devrons travailler. Ces hypothèses préliminaires engloberont notamment les caractéristiques du lait (comme sa densité, sa viscosité, sa chaleur spécifique), les conditions initiales des équipements d'échange de chaleur, ainsi que les spécificités des tuyaux intermédiaires du système.

III.2. Les données

III .2.1 Conception d'un prototype de pasteurisateur de lait

Ce prototype de pasteurisateur de lait est conçu pour chauffer le lait à une température spécifique pendant une période définie afin de tuer les microorganismes pathogènes sans altérer ses propriétés nutritives. Le prototype proposé utilise le principe de la pasteurisation à haute température et court temps. Ce prototype représente une solution efficace et économique pour améliorer la sécurité et la qualité du lait, répondant ainsi aux besoins des petits et moyens producteurs.

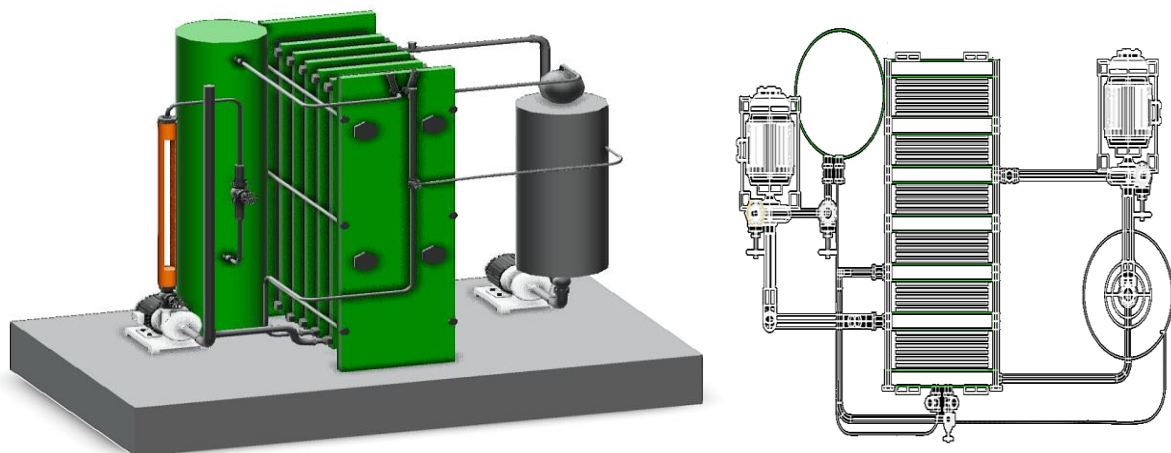


Figure III.1 Conception d'un prototype de pasteurisateur de lait

III.2.2 Variables initiales

Le projet se concentrera sur le développement d'un pasteurisateur de lait de type HTST (High Temperature Short Time), également connu sous le nom de pasteurisateur éclair. Pour cela, du lait entier avec une teneur en matières grasses de 3,5 % sera utilisé.

Les conditions de départ générales sont présentées ci-dessous, suivies entre parenthèses du code assigné dans le programme EES.

- Débit de lait à traiter : 2,847 kg/s (10000 l/h) (Q_v).
- Température d'entrée du lait dans le système : 20°C (T_f).
- Température de sortie du lait du système : 5°C (T_p).
- Température du lait dans le tube de rétention : 73°C (T_r).
- Temps de maintien du lait : 15 s (τ_r).
- Pression de travail du lait : 500 kPa (p_{lait}).
- Pression de travail de l'eau des échangeurs : 300 kPa (p_{eau}).
- Conductivité thermique de l'acier inoxydable : 17 W/mK (λ_{ss}).

La température à laquelle le lait doit théoriquement être porté est de 72°C, néanmoins, il sera chauffé jusqu'à 73°C afin d'assurer l'élimination complète des agents pathogènes et de prévenir les pertes de chaleur éventuelles, car 1°C entre dans la marge de tolérance de ce type d'équipements.

Les propriétés de l'eau sont des valeurs connues et faciles à estimer, donc les propriétés fournies par la base de données du programme EES seront utilisées. En revanche, travailler avec les fonctions de densité, de viscosité et de chaleur spécifique du lait est une tâche difficile, car ces fonctions dépendent de températures a priori inconnues. C'est pourquoi on a décidé de laisser ces valeurs constantes dans des plages de températures déterminées, selon que le lait soit en train d'être refroidi ou chauffé. Les valeurs de ces paramètres ont été déterminées expérimentalement par des études antérieures.

Toutes les informations ont été obtenues à partir de livres traitant du dimensionnement des échangeurs de chaleur. Comme mentionné précédemment, des hypothèses préalables ont été formulées et seront communes à tous les cas qui seront développés ultérieurement, quel que soit le type d'échange thermique réalisé. D'autre part, des variables telles que les pertes de charge ou le coefficient global de transfert doivent être calculées à l'aide de méthodologies spécifiques présentées dans cette section. Pour les trois types d'échangeurs utilisés dans le programme (double tube et plaques), on procédera de la même manière en calculant d'abord le coefficient global de transfert suivi de la perte de charge.

III. 3 Échangeur tubulaire à simple passage en mode co-courant

Dans le cas de l'échangeur à tubulaire, le calcul de ses coefficients de film et des pertes de charge est réalisé de manière simple, la seule difficulté à surmonter étant liée aux ailettes.

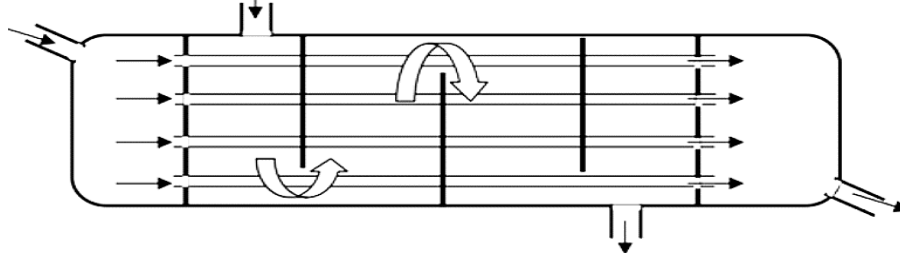


Figure III.2 Échangeur tubulaire à simple passage en mode co-courant.

III. 3.1 Les coefficients de film

Tout d'abord, on calcule le nombre de Reynolds en divisant le débit par la densité et par la surface. Il est important de noter que la section de passage du fluide circulant dans la section annulaire dépend du nombre d'ailettes, de leur épaisseur et de leur hauteur, qui seront des paramètres fixés avant de commencer la simulation. Ensuite, on calcule le nombre de Nusselt en utilisant la corrélation basée sur le modèle de couche limite en régime turbulent à trois couches [40].

$$Nu_b = \frac{(f/2)Re_b Pr_b}{1 + 8.7(f/2)^{1/2}(Pr_b - 1)} \quad (\text{III.1})$$

Cette corrélation sera utilisée tant pour le cas de la section annulaire que pour le cas de la section du tube interne. L'équation utilisée pour le facteur de friction du tube interne est la suivante [40] :

$$f = (1.58 \ln Re_b - 3.28)^{-2} \quad (\text{III.2})$$

D'autre part, l'équation utilisée pour le facteur de friction de la section annulaire est la suivante [40] :

$$f = (3.64 \log_{10} Re_b - 3.28)^{-2} \quad (\text{III.3})$$

Une fois le nombre de Nusselt calculé de chaque côté de l'échangeur, il est égalé à sa définition, permettant ainsi de déterminer le coefficient de film. Une fois ces coefficients connus,

le coefficient global de transfert est calculé par l'équation suivante [40] :

$$U_{of} = \frac{1}{\frac{A_t}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_t}{A_i} R_{fi} + A_i R_w + \frac{R_{fo}}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_o h_o}} \quad (\text{III.4})$$

Où A_t est la surface totale de transfert de la boucle (somme des surfaces ailetées et non ailetées), A_i est la surface de transfert du tube interne, R_{fi} est le coefficient d'encrassement interne, R_w est la résistance de la paroi du tube, R_{fo} est le coefficient d'encrassement externe et η_o est l'efficacité totale de la surface. Cette efficacité est calculée par les équations suivantes [40]:

Efficacité totale de la surface

$$\eta_o = \left[1 - (1 - \eta_f) \frac{A_f}{A_t} \right] \quad (\text{III.5})$$

Efficacité de l'ailette

$$\eta_f = \frac{\tanh(mH_f)}{mH_f} \quad (\text{III.6})$$

Facteur m d'efficacité de l'ailette

$$m = \sqrt{\frac{2h_o}{\delta k_f}} \quad (\text{III.7})$$

Où A_f est la surface de transmission ailetée, η_f est l'efficacité de l'ailette, H_f est la hauteur de l'ailette, m est le coefficient d'efficacité, δ est l'épaisseur de l'ailette et k_f est la conductivité thermique du matériau.

III. 3.2 Les pertes de pression

Les pertes de pression dans le tube sont calculées par l'équation. Chute de pression dans le tube [40]:

$$\Delta p_t = 4f \frac{2L}{d_i} N_{hp} \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (\text{III.8})$$

Où N_{hp} est le nombre de boucles. Pour calculer les pertes dans la section annulaire, on remplace le diamètre interne (d_i) par le diamètre hydraulique de la section (D_h).

III .4 Logiciel EES

III .4.1 Description de logiciel EES

Le logiciel EES, également connu sous le nom de Engineering Equation Solver, a été créé par le professeur Sandy Klein, qui est un enseignant émérite à l'Université du Wisconsin à Madison,

située aux États-Unis. Ce logiciel, connu sous le nom d'EES (Engineering Equation Solver ou Solveur d'équations pour l'ingénierie), a été conçu dans le but d'aider les étudiants à se concentrer sur la mise en équation des problèmes plutôt que sur la recherche des propriétés dans des tables ou sur la méthode de résolution. En effet, EES offre la possibilité de résoudre divers types d'équations, tels que des systèmes d'équations algébriques, des équations différentielles et des équations à variables complexes. De plus, ce logiciel permet d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, d'effectuer des calculs de régressions linéaires et non linéaires, ainsi que de générer des courbes de haute qualité. EES, abréviation de "Engineering Equation Solver", est un logiciel qui regroupe une large gamme de fonctions mathématiques et thermodynamiques à disposition de ses utilisateurs. Malgré cette diversité, il est difficile voire impossible d'anticiper et de couvrir tous les besoins spécifiques que pourraient avoir les utilisateurs de ce logiciel. Effectivement, il convient de souligner que EES propose à l'utilisateur la possibilité d'intégrer ses propres fonctions en utilisant trois méthodes différentes. Il est envisageable de procéder à la saisie et à l'interpolation de données numériques dans un tableau, ce qui permet par la suite de les exploiter directement lors de la résolution de systèmes d'équations.

EES, un logiciel d'analyse et de simulation, dispose de sa propre langue de programmation qui présente des similitudes avec les langages PASCAL et FORTRAN. Grâce à cette fonctionnalité, les utilisateurs ont la possibilité de créer et d'enregistrer leurs propres fonctions et procédures dans des fichiers de bibliothèque dédiés. Ces fichiers sont automatiquement chargés à chaque démarrage du logiciel, ce qui permet de les utiliser facilement lors de chaque session ultérieure. Enfin, il sera possible d'utiliser dans EES les fonctions et les procédures compilées qui auront été écrites dans des langages de haut niveau tels que le PASCAL, le C ou le FORTRAN, en les intégrant via l'utilisation de bibliothèques dynamiques (DLL). Cette fonctionnalité permettra d'étendre les capacités d'EES en intégrant des fonctionnalités développées dans d'autres langages de programmation. Il est donc envisageable d'augmenter les fonctionnalités du logiciel, ce qui permettra d'améliorer ses performances et sa polyvalence.

III.4.2 Information générale

Lorsque vous lancez le logiciel EES, une fenêtre de dialogue s'affiche, affichant le numéro d'enregistrement ainsi que le numéro de version du logiciel. Ces informations pourront vous être demandées si vous avez besoin de contacter le support technique. Pour démarrer une session EES, il vous suffit de cliquer sur le bouton 'OK'. N'oubliez pas que vous avez accès en tout temps à une aide en ligne pour vous assister. Pour obtenir de l'aide, vous pouvez appuyer

sur la touche 'F1'. Si vous souhaitez consulter l'index de l'aide, il vous suffit de cliquer sur le bouton 'Contents'. Il est à noter que ce fichier d'aide est interactif et contient de nombreux liens hypertexte, reconnaissables par des mots soulignés en vert [41].

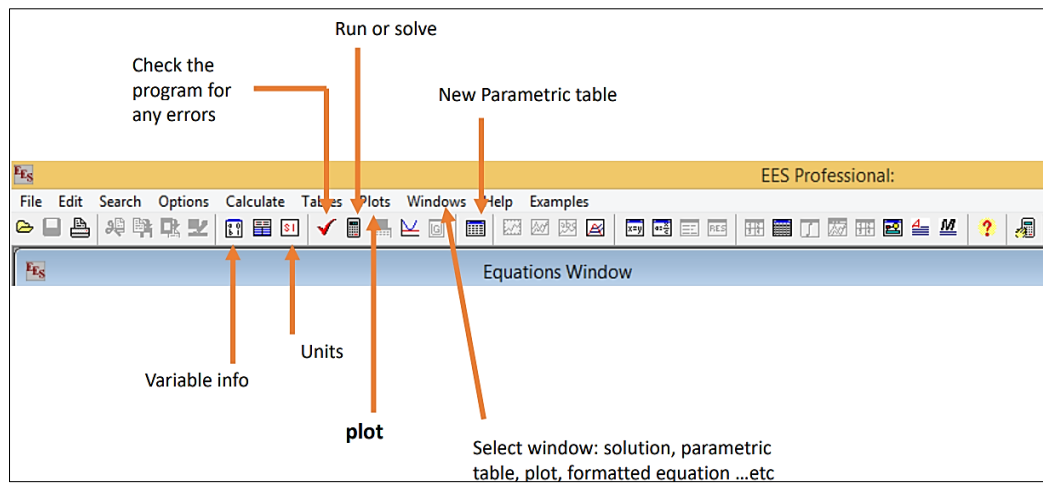


Figure III.1: Fenêtre des Informations général. [41]

Les commandes de EES sont réparties suivant 9 menus.

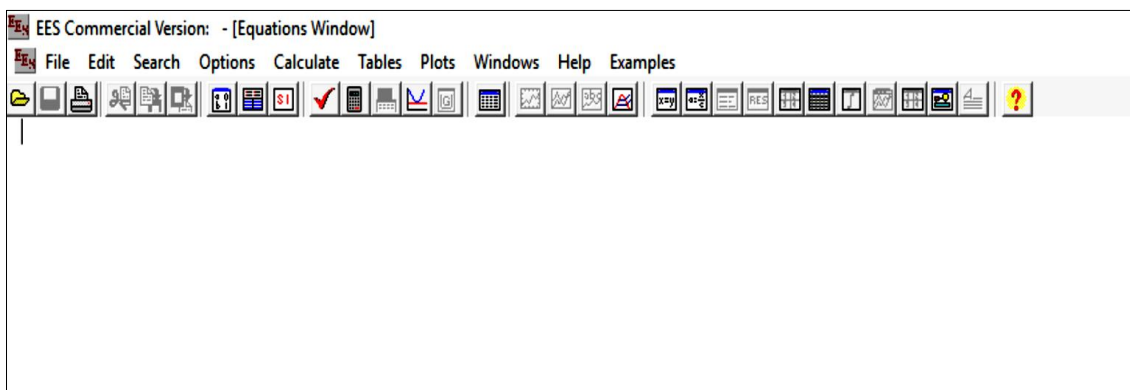


Figure III.2 : Les commandes de EES. (Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows 'F-Chart Software' PDF)

Juste en dessous de la barre de menu, vous trouverez une barre d'outils qui est située dans la partie inférieure de l'interface. Cette barre d'outils est équipée de plusieurs icônes qui ont pour but de faciliter l'accès aux commandes les plus couramment utilisées dans le logiciel EES. En survolant l'une des icônes avec le curseur et en attendant quelques instants, une petite fenêtre contextuelle s'affichera pour décrire la fonction associée à ce bouton. Il est également possible de masquer la barre d'outils si vous le souhaitez. Pour ce faire, il vous suffit de cliquer sur l'option "Préférences" qui est accessible via le menu "Options". En haut à gauche de l'écran, vous pouvez trouver l'icône EES. En cliquant avec le bouton droit de la souris sur cette icône, vous aurez accès aux différentes caractéristiques de présentation de la fenêtre du programme.

Vous pourrez ainsi redimensionner la taille de la fenêtre, mettre le logiciel en arrière-plan ou fermer l'application selon vos besoins. Le menu Fichier, situé en haut de l'interface du logiciel, regroupe un ensemble de commandes essentielles pour gérer les fichiers. Il permet notamment d'ouvrir des fichiers existants, de fermer des documents en cours, de sauvegarder le travail réalisé, de fusionner des fichiers, de charger des bibliothèques de ressources, de configurer l'imprimante et d'imprimer des documents. Le menu Editer, situé en haut de l'interface du logiciel, offre plusieurs fonctionnalités pratiques pour la manipulation du texte. En plus des options classiques telles que l'annulation de la dernière action effectuée, il permet également d'accéder aux commandes de copie, de coupe, de collage, de suppression et de sélection de l'intégralité du contenu du document actuellement ouvert. Le menu Recherche, situé dans la barre de menu en haut de l'interface du logiciel, regroupe un ensemble de commandes permettant à l'utilisateur d'effectuer des opérations de recherche et de remplacement au sein du document actif. Ces fonctionnalités offrent la possibilité de localiser précisément une expression spécifique dans le contenu du document et éventuellement de la remplacer par une autre.

Le menu Options, accessible dans le logiciel, offre la possibilité aux utilisateurs de consulter et de gérer diverses informations liées aux variables et aux fonctions. En utilisant ce menu, il est envisageable de personnaliser le système d'unités utilisé, de définir les limites de calculs autorisées et de spécifier les plages de valeurs à prendre en compte. La commande 'Preference' offre la possibilité de personnaliser les formats de présentation des données, de définir les échelles à utiliser pour les tracés, ainsi que d'autres paramètres. De plus, il existe une autre commande permettant de configurer les fonctions utilisateurs. Le menu Calculer, situé dans la barre d'outils en haut de l'interface du logiciel, offre aux utilisateurs la possibilité d'accéder à différentes commandes essentielles. Ces commandes incluent la vérification des données pour s'assurer de leur exactitude, le formatage des données pour les présenter de manière claire et professionnelle, ainsi que le lancement de la résolution de la série d'équations pour obtenir les résultats souhaités.

Le menu Tables, disponible dans le logiciel, permet aux utilisateurs d'accéder aux différentes commandes permettant d'ajouter, de modifier ou de supprimer des Tables Paramétriques. Ces tables offrent la possibilité d'effectuer des calculs de régression linéaire sur les données qui y sont contenues. En substance, une Table Paramétrique peut être assimilée à une feuille de calcul classique telle qu'on la retrouve dans un tableur. Ainsi, les équations pourront être résolues en utilisant les fonctionnalités offertes par ces tables.

Lors de l'utilisation de ce menu, l'utilisateur aura la capacité de modifier la valeur des données afin d'obtenir de nouvelles résolutions. Il lui sera également possible de visualiser et de configurer les tables saisies par les utilisateurs.

Le menu PLOT, présent dans ce logiciel, regroupe un ensemble de commandes qui offrent la possibilité d'afficher un tracé, de régler son échelle et de préparer des graphiques pour les tables Paramétrique, les tables 'Lookup' et les variables tableaux. De plus, il propose une fonction de 'Curve-fitting' pour ajuster des courbes aux données.

Le menu "Fenêtres" offre la possibilité à l'utilisateur d'organiser de manière structurée la disposition de toutes les fenêtres ouvertes sur l'interface du logiciel. En revanche, le menu "AIDE" donne accès à une aide en ligne qui permet à l'utilisateur de trouver des informations supplémentaires ou des explications détaillées sur l'utilisation du logiciel [41].

III.4.3 Exploration du menu principal

Les différentes commandes du logiciel EES sont organisées de manière logique à travers neuf menus déroulants qui sont facilement accessibles à partir du menu principal. En plus de ces menus, une barre d'outils est disponible, affichant diverses icônes qui offrent à l'utilisateur un accès rapide aux commandes les plus fréquemment utilisées du menu principal. Lorsque le logiciel est lancé, cette barre d'outils est positionnée sous la barre de menu, facilitant ainsi la navigation et l'utilisation des fonctionnalités du logiciel [41].

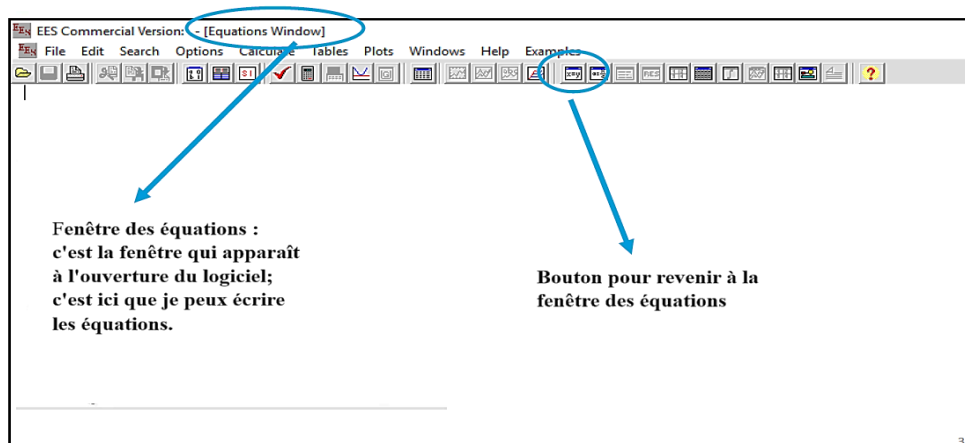


Figure III.3: Interface du logiciel EES. [41]

III.4.4 Fenêtres de EES

a. Fenêtre de Solution

La fenêtre de Solution s'affichera automatiquement en avant plan une fois les calculs effectués. Les valeurs et les unités de chacune des variables de la fenêtre d'Equations

apparaîtront dans l'ordre alphabétique. Par ailleurs, il est possible de réajuster la taille des colonnes dans cette fenêtre. Le format des variables et leurs unités peuvent être modifiés à l'aide de la commande "Information" sur les variables du menu 'Option'. En double cliquant sur une variable, la boîte de dialogue de mise en forme de variables s'affiche. Vous pouvez donc modifier l'ensemble des paramètres. Les changements opérés dans la boîte de dialogue seront appliqués à l'ensemble des variables sélectionnées. (Rem : l'appuie sur la touche « Entrée » entraînera l'ouverture de cette même boîte de dialogue).

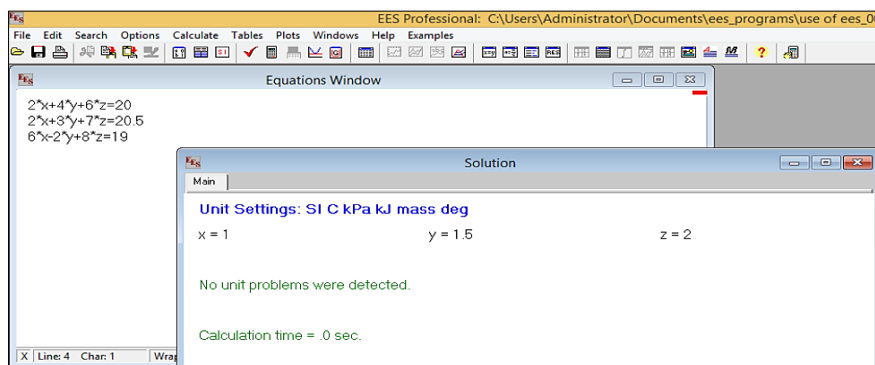


Figure III.4: Façade de la fenêtre de solution [41]

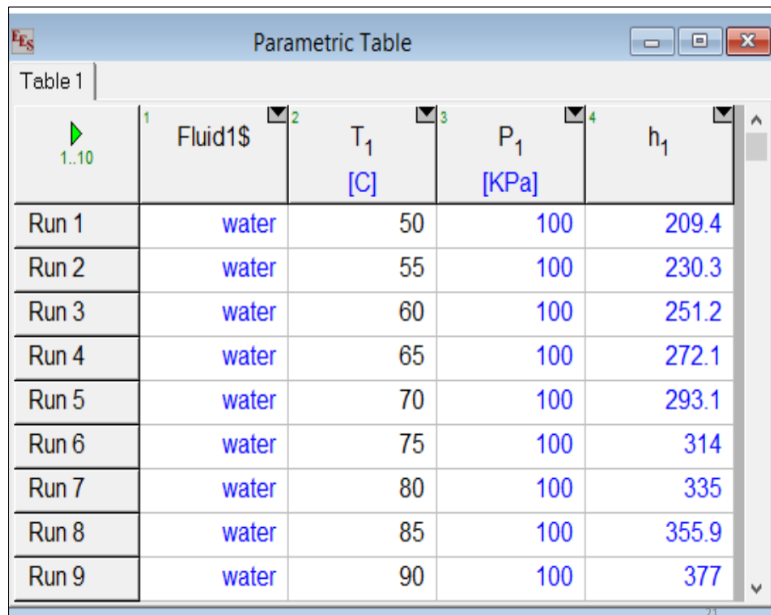
b. Fenêtre Tableaux

EES permet l'usage de variables de type tableaux. Ces variables possèdent un index figurant entre crochets [] ; par exemple, X [5] signifie que X est une variable de type tableaux à une dimension ; et Y [6,2] dans ce cas Y est une variable de type tableaux à deux dimensions. Ces variables se comportent comme des variables ordinaires. Elles comportent une valeur initiale, des valeurs limites hautes et basses et des propriétés d'affichage. Les valeurs de toutes variables y compris les variables de type tableaux sont normalement affichées dans la fenêtre de Solution après les calculs, il est possible de présenter ces variables dans une fenêtre Tableaux plutôt que dans la fenêtre Solution (cette option est paramétrable dans la boîte de dialogue Préférence) comme présenté ci-dessous

	x	y
Run 1	0	
Run 2	39,89	
Run 3	79,78	
Run 4	119,7	
Run 5	159,6	
Run 6	199,4	
Run 7	239,3	
Run 8	279,2	
Run 9	319,1	
Run 10	359	

Figure III.5: Interface de La fenêtre Tableaux. [41]

c. Fenêtre de la table paramétrique



	1	2	3	4
	Fluid1\$	T ₁ [C]	P ₁ [KPa]	h ₁
Run 1	water	50	100	209.4
Run 2	water	55	100	230.3
Run 3	water	60	100	251.2
Run 4	water	65	100	272.1
Run 5	water	70	100	293.1
Run 6	water	75	100	314
Run 7	water	80	100	335
Run 8	water	85	100	355.9
Run 9	water	90	100	377

Figure III.6 : Fenêtre de la table paramétrique. [41]

La fenêtre intitulée "Table Paramétrique" est une fonctionnalité qui contient une table permettant de saisir des valeurs numériques dans ses différentes cellules. Les valeurs numériques peuvent être entrées librement dans n'importe quelle cellule de cette table. Il est important de noter que les valeurs saisies, telles que celles présentes dans la colonne P2 de la table susmentionnée, sont considérées comme des variables indépendantes et sont ensuite affichées à l'écran. Ces valeurs sont affichées en utilisant le jeu de caractères par défaut, bien qu'il soit possible de le modifier en accédant aux préférences via le menu Options. Il est à souligner que l'entrée d'une valeur pour une variable dans la Table Paramétrique aura le même effet que si cette valeur avait été assignée dans la fenêtre d'Équations. Lorsque l'utilisateur active la commande "Résoudre la table" ou "Min/Max Table" dans le menu "Calculer", les variables dépendantes seront identifiées et présentées dans la table. Ces variables seront mises en évidence en bleu, en gras ou en italique, en fonction des paramètres définis dans le menu "OPTIONS" [41].

d. Fenêtre d'équation

Pour entrer des équations, vous utilisez une fenêtre spéciale qui fonctionne de la même manière que la saisie d'un document dans un logiciel de traitement de texte traditionnel. Vous pouvez également trouver les commandes d'édition telles que Copier, Couper et Coller dans le menu 'Edit'.

e. Fenêtre de mise en forme d'équations

Cette fenêtre affiche les équations saisies sous la forme mathématique usuelle

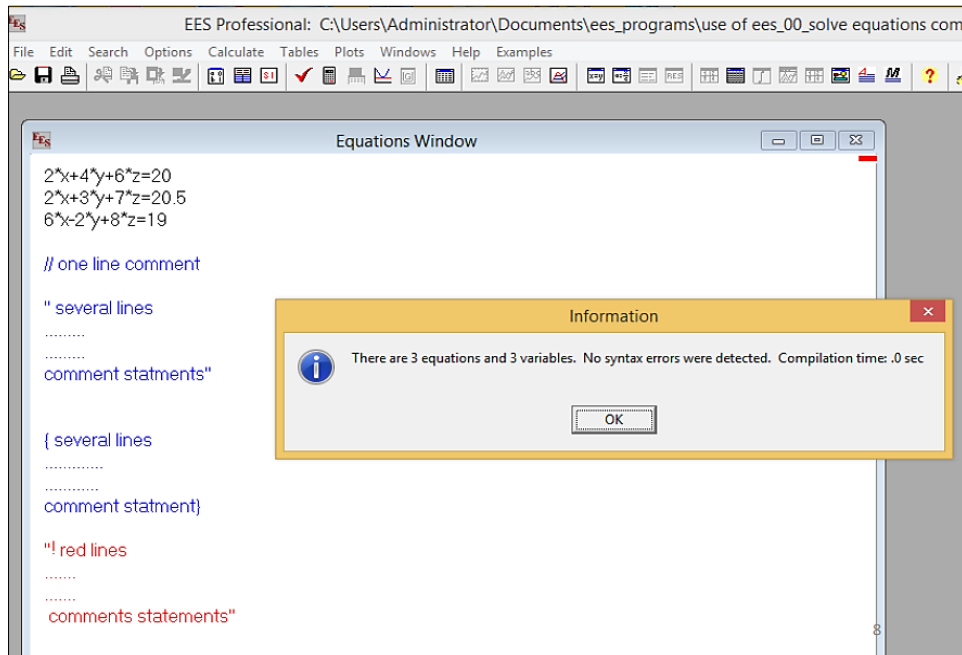


Figure III.7: Interface de la fenêtre de mise en forme d'équations. [41]

f. Fenêtre Résiduelle (Résiduel Windows)

La fenêtre Résiduelle indique le bloc d'équation, l'ordre de calcul utilisé par EES, ainsi que les valeurs relatives et absolues résiduelles. La valeur absolue résiduelle d'une équation est la différence entre les valeurs situées à gauche et à droite d'une équation.

La valeur résiduelle relative est déterminée en faisant la division entre la valeur résiduelle absolue par la valeur de l'expression située à gauche d'une équation.

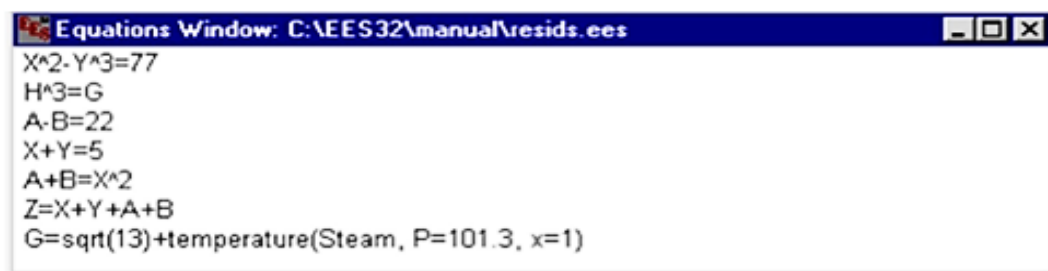


Figure III.8: Fenêtre Résiduelle. [41]

g. Fenêtre 'Lookup Table'

La table 'Lookup' est un élément essentiel dans le logiciel, car elle fonctionne comme une base de données permettant d'extraire des informations pour les intégrer dans des équations. Pour créer une table 'Lookup', il suffit d'utiliser la commande New Lookup Table qui se trouve dans le menu Tables. Lors de la création de la table, il est nécessaire de spécifier le nombre de

lignes et de colonnes souhaité. Il est également possible de modifier ultérieurement le nombre de lignes en utilisant la commande Insert/Delete Rows, ou le nombre de colonnes en utilisant la commande Insert/Delete Cols. Pour conserver une table 'Lookup' et pouvoir l'utiliser ultérieurement (même en dehors du fichier EES actuel), il est recommandé d'utiliser la commande SaveLookup. Cette fonction permet de sauvegarder la table sous forme de fichier, offrant ainsi la possibilité de la réutiliser ultérieurement. Deux types de fichiers peuvent être utilisés pour sauvegarder une table 'Lookup', à savoir un fichier avec l'extension ".TXT" où «.CSV". Le format LKT est un type de fichier binaire spécifiquement conçu pour stocker la structure de la table, tandis qu'un fichier au format .TXT, qui est un fichier de type ASCII, contient uniquement les données. Il est important de noter que ces deux types de fichiers peuvent être ouverts de manière interchangeable dans une session EES [41].

	Fluid1\$	T ₁ [C]	P ₁ [KPa]	h ₁
Run 1	water	50	100	209.4
Run 2	water	55	100	230.3
Run 3	water	60	100	251.2
Run 4	water	65	100	272.1
Run 5	water	70	100	293.1
Run 6	water	75	100	314
Run 7	water	80	100	335
Run 8	water	85	100	355.9
Run 9	water	90	100	377

Figure III.9: Fenêtre 'Lookup Table'

III.5 Simulations

Les équations générales qui servent à décrire de manière précise et détaillée les transferts de chaleur impliqués lors du traitement thermique du lait tout au long du processus de pasteurisation seront présentées dans le programme EES.

III.5.1 Étude l'efficacité de pasteurisation et la consommation d'énergie

En utilisant le logiciel EES, nous avons effectué une simulation thermodynamique afin d'évaluer l'efficacité du processus de pasteurisation ainsi que la quantité d'énergie consommée du dispositif de pasteurisateur de lait développé.

Programme EES

"Variables de conception"

$T_1 = 40,64$ "°C" "Température à la sortie du régénérateur"
 $T_r = 73$ "°C" "Température dans le réservoir"
 $\tau_r = 15$ "s" "Temps de maintien dans le réservoir"
 $U_x = 150$ "W/m²K" "Estimation initiale de U_x "
 $A_x = 10$ "m²" "Estimation initiale de A_x "
 $U_h = 200$ "W/m²K" "Estimation initiale de U_h "
 $A1_conduite = 15$ "m²" "Estimation initiale de $A1_conduite$ "
 $U_e = 250$ "W/m²K" "Estimation initiale de U_e "
 $A1_conduite_e = 20$ "m²" "Estimation initiale de $A1_conduite_e$ "
 $Ac_dt = 0,02$ "m²" "Estimation initiale de Ac_dt "
 $L_{hp} = 1$ "m" "Longueur de l'échangeur de chaleur"
 $n_{hp} = 10$ "Nombre de tube de l'échangeur de chaleur"
 $Aint_dt = 0,01$ "m²" "Estimation initiale de $Aint_dt$ "
 $Ri_dt = 0,005$ "m" "Rayon interne du tube de l'échangeur"
 $A1p_conduite = 0,3$ "m²" "Estimation initiale de $A1p_conduite$ "
 $b_conduite = 0,01$ "m" "Espacement entre les plaques"
 $A1p_conduite_e = 0,35$ "m²" "Estimation initiale de $A1p_conduite_e$ "
 $b_conduite_e = 0,012$ "m" "Espacement entre les tubes pour l'échangeur de réfrigération"

"Spécifications du processus"

$Q_v = 2,847$ "kg/s" "10000 l/h"
 $F_h = 2,501$ "kg/s"
 $T_f = 20$ "°C"
 $T_p = 5$ "°C"
 $T_{h1} = 76,46$ "°C"
 $p_{eau} = 300$ "kPa"
 $\rho_{m_c} = 1031$ "kg/m³"
 $\rho_{m_m} = 1025$ "kg/m³"
 $\rho_{m_h} = 1016$ "kg/m³"

 $\rho_h = \text{density}(\text{Water}, T=T_{h1}; P=p_{eau})$ "Densité de l'eau chauffant le lait"
 $\rho_c = 1012$ "kg/m³" "Densité de l'eau refroidissant le lait"
 $\mu_{m_c} = 0,0025$ "Pa*s"
 $\mu_{m_m} = 0,0015$ "Pa*s"
 $\mu_{m_h} = 0,00075$ "Pa*s"
 $\mu_h = \text{viscosity}(\text{Water}, T=T_{h1}; P=p_{eau})$
 $\mu_{cw} = \text{viscosity}(\text{Water}, T=T_f; P=p_{eau})$
 $\mu_{pg} = 0,000581$ "Pa*s"
 $\mu_c = 0,9*\mu_{cw} + 0,1*\mu_{pg}$ "Pa*s"
 $\lambda_s = 0,59$ "W/mK" "Conductivité thermique"
 $\lambda_h = \text{conductivity}(\text{Water}, T=T_{h1}; P=p_{eau})$
 $\lambda_{cw} = \text{conductivity}(\text{Water}, T=T_f; P=p_{eau})$
 $\lambda_{pg} = 0,147$
 $\lambda_c = 0,9*\lambda_{cw} + 0,1*\lambda_{pg}$
 $\lambda_{ss} = 17$ "W/mK"
 $C_{pm} = 4$ "kJ/kgK" "Lait avec 3,5% de matière grasse, à partir de 37 °C, C_p ne varie pas"
 $C_{pw} = \text{cp}(\text{Water}, T=T_f; P=p_{eau})$ "kJ/kgK"
 $C_{pw_c} = 4,103$
 $Pr_h = (C_{pw}*1000*\mu_h)/\lambda_h$
 $Pr_c = (C_{pw_c}*1000*\mu_c)/\lambda_c$
 $Pr_{m_c} = C_{pm}*1000*\mu_{m_c}/\lambda_s$
 $Pr_{m_m} = C_{pm}*1000*\mu_{m_m}/\lambda_s$
 $Pr_{m_h} = C_{pm}*1000*\mu_{m_h}/\lambda_s$

"Régénérateur"

$Q_x = Q_v * C_{pm} * (T_1 - T_f)$

"échangeur de chaleur"

$$Q_h = Q_v \cdot C_{pm} \cdot (T_r - T_1)$$

$$\epsilon_{\text{h}} = Q_h / (F_h \cdot C_{pw} \cdot (T_{h1} - T_1))$$

"réfrigérant"

$$T_{c1} = -2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$F_{\text{ref}} = 2,5 \text{ kg/s}$$

$$Q_e = Q_v \cdot C_{pm} \cdot (T_r - T_p)$$

$$\epsilon_e = Q_e / (F_{\text{ref}} \cdot C_{pw_c} \cdot (T_p - T_{c1}))$$

"Temps de maintien"

$$V_r = \tau_r \cdot Q_v / \rho_{m,h}$$

$$\tau_{x_e} = \rho_{m,m} \cdot A_{c,dt} \cdot (L_{hp} \cdot (n_{hp} + 1)) / Q_v$$

$$\tau_{x_i} = \rho_{m,m} \cdot A_{int,dt} \cdot (L_{hp} \cdot (n_{hp} + 1) + (\pi \cdot R_{i,dt} / 1000) \cdot n_{hp}) / Q_v$$

$$\tau_h = \rho_{m,h} \cdot A_{1p_conduite} \cdot b_{conduite} / Q_v$$

$$\tau_e = \rho_{m,c} \cdot A_{1p_conduite_e} \cdot b_{conduite_e} / Q_v$$

$$\tau = \tau_r + \tau_{x_e} + \tau_{x_i} + \tau_h + \tau_e$$

"Réponses"

$$\text{Eff}_{\text{pasteurisation}} = (T_{h1} - T_f) / (T_{h1} - T_r) \text{ "Efficacité de pasteurisation"}$$

$$\text{Consommation_énergie} = F_h \cdot C_{pw} \cdot (T_{h1} - T_r) \text{ "Consommation d'énergie"}$$

III.5.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation l'efficacité du processus de pasteurisation ainsi que la quantité d'énergie consommée depuis logiciel EES

EES Professional: C:\Users\slama phone\Desktop\international journal of ambient energy\PROGRAMME MASTER.EES - [Solution]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Main

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$A_{1p,placas} = 0,3$	$A_{1p,placas,e} = 0,35$	$A_{1,placas} = 15$	$A_{1,placas,e} = 20$	$A_{c,dt} = 0,02$	$A_{int,dt} = 0,01$	$A_x = 10$
$b_{placas} = 0,01$	$b_{placas,e} = 0,012$	Consommation _{énergie} = 36,2		$C_{pm} = 4$	$C_{pw} = 4,183$	$C_{pw_c} = 4,103$
$\epsilon_e = 10,78$	$\epsilon_h = 0,9833$	$F_h = 2,501$	$F_{ref} = 2,5$	$\lambda_c = 0,553$	$\lambda_{cw} = 0,5981$	$\lambda_h = 0,6647$
$\lambda_{pg} = 0,147$	$\lambda_s = 0,59$	$\lambda_{ss} = 17$	$L_{hp} = 1$	$\mu_c = 0,0009595$	$\mu_{cw} = 0,001002$	$\mu_h = 0,0003707$
$\mu_{m,c} = 0,0025$	$\mu_{m,h} = 0,00075$	$\mu_{m,m} = 0,0015$	$\mu_{pg} = 0,000581$	$n_{hp} = 10$	$Pr_c = 7,119$	$Pr_h = 2,333$
$Pr_{m,c} = 16,95$	$Pr_{m,h} = 5,085$	$Pr_{m,m} = 10,17$	$Peau = 300$	$Q_v = 2,847$	$Q_e = 774,4$	$Q_h = 368,5$
$Q_x = 235$	$\rho_c = 1012$	$\rho_h = 974,1$	$\rho_{m,c} = 1031$	$\rho_{m,h} = 1016$	$\rho_{m,m} = 1025$	$R_{i,dt} = 0,005$
$\tau = 136,4$	$\tau_e = 1,521$	$\tau_h = 1,071$	$\tau_r = 15$	$\tau_{x,e} = 79,21$	$\tau_{x,i} = 39,6$	$T_1 = 40,64$
$T_{c1} = -2$	$T_f = 20$	$T_{h1} = 76,46$	$T_p = 5$	$T_r = 73$	$U_e = 250$	$U_h = 200$
$U_x = 150$	$V_r = 0,04203$					

6 potential unit problems were detected.

Calculation time = 204 ms

III.5.3 Étude du comportement de l'échangeur à tubulaire

En utilisant le logiciel EES, nous avons effectué une simulation thermodynamique afin d'évaluer l'efficacité et l'énergie consommée de l'échangeur à tubulaire.

Paramètres physiques

$Dexte_dt = 4 \cdot (25,4/1000) \text{ "m"}$
 $esp_ext_dt = 2,413/1000 \text{ "m"}$
 $Dexti_dt = Dexte_dt - 2 \cdot esp_ext_dt \text{ "m"}$
 $Dinte_dt = 2,5 \cdot (25,4/1000) \text{ "m"}$
 $esp_int_dt = 2,413/1000 \text{ "m"}$
 $Dinti_dt = Dinte_dt - 2 \cdot esp_int_dt \text{ "m"}$
 $Aint_dt = (\pi/4) \cdot (Dinti_dt^2) \text{ "m}^2\text{"}$
 $Ac_dt = \pi \cdot ((Dexti_dt^2) - (Dinte_dt^2)) / 4 - esp_fin \cdot h_fin \cdot n_fin \text{ "m}^2\text{"}$
 $Pw_dt = \pi \cdot (Dexti_dt + Dinte_dt) + 2 \cdot h_fin \cdot n_fin \text{ "m"}$
 $Ph_dt = \pi \cdot Dinte_dt + 2 \cdot h_fin \cdot n_fin \text{ "m"}$
 $Dh_dt = 4 \cdot Ac_dt / Pw_dt \text{ "m"}$
 $De_dt = 4 \cdot Ac_dt / Ph_dt \text{ "m"}$
 $R_fi_dt = 0,0002 \text{ "m}^2\text{K/W" " encrassement " "Supposition de composé organique léger"}$
 $R_fo_dt = 0,0002 \text{ "m}^2\text{K/W" " encrassement "}$
 $n_fin = 9$
 $esp_fin = 1,2 \cdot (10^{(-3)}) \text{ "m"}$
 $h_fin = 0,01 \text{ "m"}$

"Valeurs ajoutées pour les variables d'entrée"

$Qv = 1,0 \text{ "m}^3\text{/s" "Débit volumétrique"}$
 $\rho_{m_m} = 1000 \text{ "kg/m}^3\text{ "Densité"}$
 $\mu_{m_m} = 0,001 \text{ "Pa.s" "Viscosité dynamique"}$
 $Pr_{m_m} = 7,0 \text{ "Nombre de Prandtl"}$
 $p_{lait} = 101325 \text{ "Pa" "Pression"}$
 $n_{hp} = 10 \text{ "Nombre de tubes"}$
 $\lambda_s = 0,6 \text{ "W/(m.K)" "Conductivité thermique du fluide"}$
 $\lambda_{ss} = 16,2 \text{ "W/(m.K)" "Conductivité thermique de l'acier inoxydable"}$
 $L_{hp} = 7,62 \text{ "m" "Longueur du tuyau"}$
 $T_1 = 40,64 \text{ "°C" "Température à la sortie du régénérateur"}$

"Calculs"

$vlf_dt = Qv / (\rho_{m_m} \cdot Aint_dt) \text{ "m/s"}$
 $Re_int_dt = (\rho_{m_m} \cdot vlf_dt \cdot Dinti_dt) / (\mu_{m_m})$
 $Nus_int_dt = ((f_{frottement_int_dt} / 2) \cdot Re_int_dt \cdot Pr_{m_m}) / (1 + 8,7 \cdot ((f_{frottement_int_dt} / 2)^{0,5}) \cdot (Pr_{m_m} - 1))$
 $f_{frottement_int_dt} = (1,58 \cdot \ln(Re_int_dt) - 3,28)^{(-2)}$
 $hi_dt = Nus_int_dt \cdot \lambda_s / Dinti_dt$
 $vlc_dt = Qv / (\rho_{m_m} \cdot Ac_dt) \text{ "m/s"}$
 $Re_ext_dt = (\rho_{m_m} \cdot vlc_dt \cdot Dh_dt) / (\mu_{m_m})$
 $Nus_ext_dt = ((f_{frottement_ext_dt} / 2) \cdot Re_ext_dt \cdot Pr_{m_m}) / (1 + 8,7 \cdot ((f_{frottement_ext_dt} / 2)^{0,5}) \cdot (Pr_{m_m} - 1))$
 $f_{frottement_ext_dt} = (3,64 \cdot \log_{10}(Re_ext_dt) - 3,28)^{(-2)}$
 $he_dt = Nus_ext_dt \cdot \lambda_s / De_dt$
 $m_dt = \sqrt{2 \cdot h_fin / (esp_fin \cdot \lambda_{ss})}$
 $etaf_dt = \tanh(m_dt \cdot h_fin) / (m_dt \cdot h_fin)$
 $Af_hp = n_fin \cdot L_{hp} \cdot (2 \cdot h_fin + esp_fin) \text{ "m}^2\text{"}$
 $Au_hp = (\pi \cdot Dinte_dt \cdot L_{hp} - n_fin \cdot L_{hp} \cdot esp_fin) \text{ "m}^2\text{"}$
 $A_{hp} = Au_hp + Af_hp$
 $eta0_dt = (1 - (1 - eta_f_dt) \cdot Af_hp / A_{hp})$
 $1 / U_global_dt = (A_{hp} / Ai_dt) \cdot (1 / hi_dt) + (A_{hp} / Ai_dt) \cdot R_fi_dt + A_{hp} \cdot (\ln(Dinte_dt / Dinti_dt) / (2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ss} \cdot L_{hp})) + R_fo_dt / eta0_dt + 1 / (eta0_dt \cdot he_dt)$
 $U_x = U_global_dt / 1000$
 $Ai_dt = (\pi \cdot Dinti_dt \cdot L_{hp}) \text{ "m}^2\text{"}$
 $A_x = A_{hp} \cdot (n_{hp} + 1) \text{ "m}^2\text{"}$

"Pertes de pression"

$\Delta p_{i_dt} = 4 \cdot f_{frottement_int_dt} \cdot ((L_{hp} \cdot (n_{hp} + 1) + (\pi \cdot Ri_dt / 1000) \cdot n_{hp}) / Dinti_dt) \cdot (\rho_{m_m} \cdot (vlf_dt^2) / 2)$
 $\Delta p_{e_dt} = 4 \cdot f_{frottement_ext_dt} \cdot (L_{hp} / Dh_dt) \cdot (n_{hp} + 1) \cdot (\rho_{m_m} \cdot (vlc_dt^2) / 2)$

"Épaisseur des tubes"

"Tuyau intérieur"

$$p_disi_dt = (p_lait * 1,5 / 100 - 1) / 10 \text{ "N/mm}^2\text{"}$$

$$IR_corri_dt = (Dinti_dt / 2) * 1000 + 3 \text{ "mm"}$$

$$S_disi_dt = 138 \text{ "N/mm}^2\text{" "Ligne 4 de l'ASME"}$$

$$Ef_factori_dt = 1$$

$$TOLi_dt = 0,3 \text{ "mm"}$$

$$CALi_dt = 0 \text{ "mm"}$$

$$CAOi_dt = 1,6 \text{ "mm"}$$

$$Ri_dt = 2 * Dinte_dt * 1000 \text{ "mm"}$$

$$\text{épaisseur_cir_dt} = (p_disi_dt * IR_corri_dt) / (S_disi_dt * Ef_paramètre_dt - 0,6 * p_disi_dt) + CALi_dt + CAOi_dt + TOLi_dt$$

$$\text{espesori_lon_dt} = (p_disi_dt * IR_corri_dt) / (2 * S_disi_dt * Ef_paramètre_dt + 0,4 * p_disi_dt) + CALi_dt + CAOi_dt + TOLi_dt$$

$$\text{épaisseur_dt} = \max(\text{épaisseur_cir_dt}; \text{épaisseur_lon_dt}) \text{ "mm"}$$

$$\text{épaisseur_dt_final} = \text{épaisseur_dt} * (1 + (Dinte_dt * 1000) / (4 * Ri_dt)) \text{ "mm" "2,309 mm"}$$

"SELECTIONNONS BWG 13"

"Tuyau extérieur"

$$p_dise_dt = (p_lait * 1,5 / 100 - 1) / 10 \text{ "N/mm}^2\text{"}$$

$$IR_corre_dt = (Dexti_dt / 2) * 1000 + 3 \text{ "mm"}$$

$$S_dise_dt = 138 \text{ "N/mm}^2\text{" "Ligne 33 de l'ASME"}$$

$$Ef_factore_dt = 1$$

$$TOLe_dt = 0,3 \text{ "mm"}$$

$$CALe_dt = 0 \text{ "mm"}$$

$$CAOe_dt = 1,6 \text{ "mm"}$$

$$Re_dt = 2 * Dexte_dt * 1000 \text{ "mm"}$$

$$\text{épaisseur_cir_dt} = (p_dise_dt * IR_corre_dt) / (S_dise_dt * Ef_paramètre_dt - 0,6 * p_dise_dt) + CALe_dt + CAOe_dt + TOLe_dt$$

III.5.4 Résultats de simulation

Les résultats de simulation des caractéristiques de l'échangeur à tubulaire depuis le logiciel EES

EES Professional: C:\Users\slama phone\Desktop\Mémoire MASTER- Lait\LAIT+++VRAI++EES - [Solution]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples

Main

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$Ac_{dt} = 0,00408$	$Af_{hp} = 1,454$	$Aint_{dt} = 0,002704$	$Ai_{dt} = 1,405$	$Au_{hp} = 1,438$	$A_{hp} = 2,892$	$A_x = 31,81$
$CALe_{dt} = 0$	$CALi_{dt} = 0$	$CAOe_{dt} = 1,6$	$CAOi_{dt} = 1,6$	$\delta p_{e,dt} = 3874$	$\delta p_{i,dt} = 2622$	$Dexte_{dt} = 0,1016$
$Dexti_{dt} = 0,09677$	$De_{dt} = 0,04301$	$Dh_{dt} = 0,02388$	$Dinte_{dt} = 0,0635$	$Dinti_{dt} = 0,05867$	$Ef_{factore,dt} = 1$	$Ef_{factori,dt} = 1$
$espesore_{cir,dt} = 168,4$	$espesori_{cir,dt} = 106,7$	$espesori_{dt} = 106,7$	$espesori_{dt,final} = 120$	$espesori_{lon,dt} = 16,49$	$esp_{ext,dt} = 0,002413$	$esp_{fin} = 0,0012$
$esp_{int,dt} = 0,002413$	$eta0_{dt} = 1$	$etaf_{dt} = 1$	$f_{friccion,ext,dt} = 0,009187$	$f_{friccion,int,dt} = 0,006404$	$he_{dt} = 578,5$	$hi_{dt} = 1258$
$h_{fin} = 0,01$	$IR_{corre,dt} = 51,39$	$IR_{corri,dt} = 32,34$	$\lambda_s = 0,6$	$\lambda_{ss} = 16,2$	$L_{hp} = 7,62$	$\mu_{m,m} = 0,001$
$m_{dt} = 1,014$	$Nus_{ext,dt} = 41,47$	$Nus_{int,dt} = 123$	$n_{fin} = 9$	$n_{hp} = 10$	$Ph_{dt} = 0,3795$	$Pr_{m,m} = 7$
$Pw_{dt} = 0,6835$	$p_{dise,dt} = 151,9$	$p_{disi,dt} = 151,9$	$Pleche = 101325$	$Q_v = 1$	$Re_{dt} = 203,2$	$Re_{ext,dt} = 5852$
$Re_{int,dt} = 21700$	$\rho_{m,m} = 1000$	$Ri_{dt} = 127$	$R_{fi,dt} = 0,0002$	$R_{fo,dt} = 0,0002$	$S_{dise,dt} = 138$	$S_{disi,dt} = 138$
$TOLe_{dt} = 0,3$	$TOLi_{dt} = 0,3$	$T_1 = 40,64$	$U_{global,dt} = 234,1$	$U_x = 0,2341$	$v_{ic,dt} = 0,2451$	$v_{if,dt} = 0,3698$

No unit problems were detected.

Calculation time = 157 ms

Chapitre IV : Modélisation et Optimisation par MSR

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, une analyse thermodynamique des performances d'un échangeur de chaleur tubulaire. La procédure d'optimisation des paramètres de conception est réalisée par la méthodologie de surface de réponse (MSR). Les simulations thermodynamiques sont réalisées par le code EES pour différents paramètres tels que le débit volumétrique ($0.5 \leq Q_v \leq 3.5 \text{ m}^3/\text{s}$), nombre de tubes ($4 \leq n_{hp} \leq 14$), Longueur du tube ($1 \leq L_{hp} \leq 15 \text{ m}$), et la température de sortie de l'échangeur ($35 \leq T_1 \leq 45 \text{ }^\circ\text{C}$). Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée pour identifier les paramètres de conception qui influencent le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp). Ensuite, un modèle de régression de second ordre a été développé pour corrélérer les paramètres de processus avec U_x et Δp . Par conséquent, des optimisations numériques et graphiques ont été effectuées pour obtenir une optimisation multi-objectifs pour les critères désirés.

IV.2. Les données de départ

Les valeurs de tous les paramètres utilisés dans cette étude ont été présentées dans le tableau 1.

Tableau IV.1 Principaux paramètres l'échangeur de chaleur tubulaire

S/N	Paramètres de fonctionnement	Valeur	Unité
1	Débit volumétrique (Q_v)	0.5-3.5	m^3/s
2	Densité (ρ)	1000	kg/m^3
3	Viscosité dynamique (μ)	0.001	Pa.s
4	Nombre de Prandtl (Pr)	7	-
5	Pression de l'ait (P_{lait})	101325	Pa
6	Nombre de tubes (n_{hp})	4-14	-
7	Conductivité thermique du fluide (λ_s)	0.6	$\text{W}/(\text{m.K})$
8	Conductivité thermique de l'acier inoxydable (λ_{ss})	16.2	$\text{W}/(\text{m.K})$
9	Longueur du tube (L_{hp})	2-10	m
10	Température à la sortie du régénérateur (T_1)	35-45	$^\circ\text{C}$

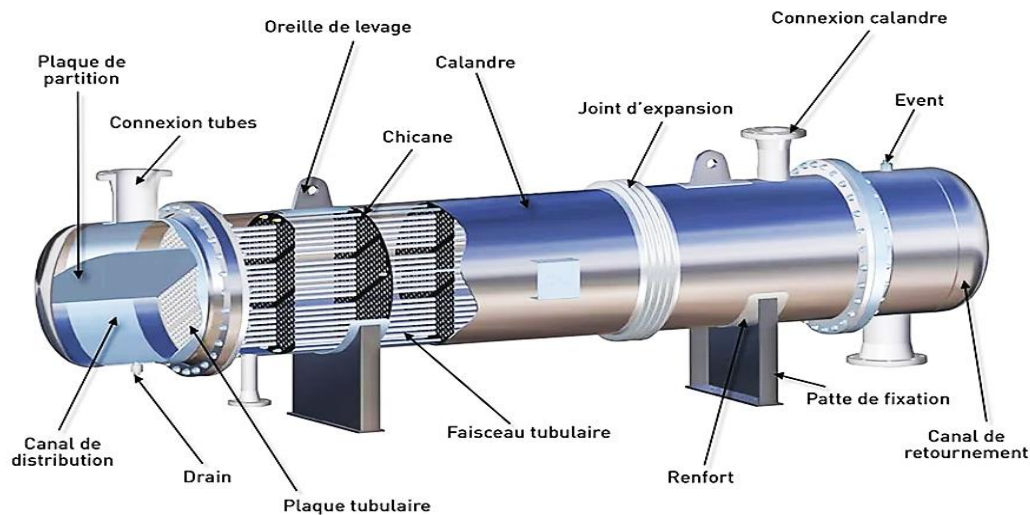


Figure IV.1 Échangeur de chaleur tubulaire

IV.3 Planification la simulation

La planification de l'expérience joue un rôle très important en exécutant les expériences avec la ressource disponible à l'aide du logiciel « **DESIGN-EXPERT 13.0.5.0** ». Nous proposons l'optimisation d'un système de réponses multiples (le coefficient de transfert thermique global et les pertes de charge) en fonction des quatre (04) principales caractéristiques de l'échangeur tubulaire, Débit volumétrique (Q_v), Nombre de tubes (n_{hp}), Longueur du tube (L_{hp}) et Température de sortie de l'échangeur (T_1). La *Méthodologie des Surfaces de Réponse* (MSR) a été utilisée pour modéliser et analyser les caractéristiques de l'échangeur tubulaire afin de minimiser la consommation et maximiser le rendement de turbine. Dans la MSR, la forme quantitative du rapport d'entrée entre la réponse observée et les variables indépendantes peut être représentée comme suit :

$$Y = F(Q_v, n_{hp}, L_{hp}, T_1) \quad (IV.1)$$

Où Y est la réponse observée et F est la fonction de réponse (ou surface de réponse). Dans procédure de l'analyse, on a proposé l'approximation de Y en utilisant le modèle polynomial de second ordre adapté pour la régression qui s'appelle le modèle quadratique. Le modèle quadratique de Y peut être écrit comme suit :

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i X_i + \sum_{i=1}^4 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^4 a_{ij} X_i X_j \quad (IV.2)$$

Où Y est la réponse observée, a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} représentent respectivement le terme constant, les coefficients des termes linéaires, des termes représentant les interactions entre variables et des termes quadratiques. Les X_i représentent les variables indépendantes, ou bien paramètres de coupe étudiés.

$$X_1 = \frac{Q_v - Q_{v0}}{\Delta Q_v} \quad (IV.3)$$

$$X_2 = \frac{nhp - nhp_0}{\Delta nhp} \quad (IV.4)$$

$$X_3 = \frac{Lhp - Lhp_0}{\Delta Lhp} \quad (IV.5)$$

$$X_4 = \frac{T_1 - T_{10}}{\Delta T_1} \quad (IV.6)$$

Où X_1 , X_2 , X_3 et X_4 sont les variables codées des paramètres respectivement Q_v , nhp , Lhp et T_1 ; Q_{v0} , nhp_0 , Lhp_0 et T_{10} sont les valeurs de Q_v , nhp , Lhp et T_1 au niveau zéro (0). ΔQ_v , Δnhp , ΔLhp et ΔT_1 sont les intervalles de la variation respectivement de Q_v , nhp , Lhp et T_1 . le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp) indiquée respectivement comme Y_1 et Y_2 ont été analysées comme réponse.

Tableau IV.2 Plan composite centrée avec cinq (05) points centré (21 essais).

Plan Composite à face centré				
N°	Facteurs			
	Qv (k)	nhp	Lhp (m)	T ₁ (°C)
1	-1	1	-1	1
2	1	0	0	0
3	-1	-1	-1	-1
4	0	-1	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	-1	-1	1	-1
8	1	1	-1	-1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	-1	1	1	1
12	0	0	0	0
13	0	0	0	-1
14	-1	0	0	0
15	1	-1	1	1
16	0	1	0	0
17	0	0	0	1
18	0	0	-1	0
19	1	1	1	-1
20	0	0	1	0
21	1	-1	-1	1

L'utilisation du modèle quadratique de F dans ce chapitre devait non seulement étudier au-dessus de l'espace entier de facteur, mais localiser également la région d'être observée où la réponse s'approche de la valeur optimale. Les données nécessaires pour établir les modèles de réponse sont généralement rassemblées par la planification numérique. Dans ce chapitre, la collection des données du simulation a adopté le plan composite centré (PCC) avec 21 essais et composé de cinq points (05) centraux (niveau codés égale à 0) qui est le point médian entre les niveaux Max et Min (Tableau IV.1).

Tableau IV.3 Variables et niveaux du modèle de conception

Symbole	Facteurs	Unité	Niveau		
			-1	0	1
Qv	Débit volumétrique	m ³ /s	0.5	2	3.5
n _{hp}	Nombre de tubes	-	4	9	14
L _{hp}	Longueur du tube	m	1	3	5
T ₁	Température de sortie de l'échangeur	°C	35	40	45

Tableau IV.4 Résultats de simulation pour le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)

n°	Factures				Variables de sorties	
	Qv (k)	n _{hp}	L _{hp} (m)	T ₁ (°C)	U _x (W/m ² ·K)	Δp (Pa)
1	0.5	14	1	45	0,146	319,1
2	3.5	9	3	40	0,5389	17143
3	0.5	4	1	35	0,146	104
4	2	4	3	40	0,370	1252
5	2	9	3	40	0,358	6420
6	2	9	3	40	0,358	6420
7	0.5	4	5	35	0,146	462,7
8	3.5	14	1	35	0,4803	9700
9	2	9	3	40	0,358	6420
10	2	9	3	40	0,358	6420
11	0.5	14	5	45	0,146	1395
12	2	9	3	40	0,358	6420
13	2	9	3	35	0,369	6420
14	0.5	9	3	40	0,2341	1899
15	3.5	4	5	45	0,4803	14063
16	2	14	3	40	0,386	6455
17	2	9	3	45	0,358	6420
18	2	9	1	40	0,358	1372
19	3.5	14	5	35	0,4803	14063
20	2	9	5	40	0,368	13467
21	3.5	4	1	45	0,4803	3161

Le tableau IV.3 montre les niveaux des quatre caractéristiques de l'échangeur de chaleur tubulaire. Pour déterminer les facteurs qui ont un effet statistiquement significatif sur les performances de l'échangeur de chaleur étudiés en utilisant le l'analyse de la variance (ANOVA). Cette analyse a été exécutée pour un intervalle de confiance (IC) égale à 95%. Les caractéristiques de l'échangeur de chaleur (Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1) et le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp) dans le tableau IV.4.

Les valeurs obtenues du coefficient de transfert thermique global (U_x) et des pertes de charge ont été utilisées pour déterminer les facteurs et les interactions significatifs. Les modèles empiriques sont développés afin de déterminer la corrélation entre les caractéristiques du de l'échangeur de chaleur tubulaire, et le coefficient de transfert thermique global ainsi que les pertes de charge. En plus, les surfaces de réponse des facteurs significatifs correspondant à chaque analyse (ANOVA) ont été présenté. Ces surfaces de réponse fournissent une analyse des facteurs les plus significatifs liés aux et le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp) sous les conditions étudiées.

IV.4 Interprétation des résultats

IV.4.1 Sensibilité du U_x en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1

Le tableau 3 indique la valeur du coefficient de transfert thermique global (U_x) maximale obtenue avec la combinaison de débit volumétrique (Q_v), 3.5 m³/s, nombre de tubes (n_{hp}), 9, longueur du tube (L_{hp}), 3m et la température de sortie de l'échangeur (T_1), 40 °C. Ce coefficient de transfert thermique maximal est attribué au débit volumétrique maximal, qui influence l'efficacité thermique de l'échangeur de chaleur tubulaire. Cela est caractérisé par les effets de la turbulence accrue dans le fluide, augmentant ainsi les échanges thermiques entre le fluide et les parois du tube. De plus, la vitesse plus élevée du fluide contribue à une meilleure dispersion de la chaleur, réduisant les points chauds et assurant une température plus uniforme à la sortie de l'échangeur. Pour procéder à l'analyse de la variance (ANOVA), la méthode des moindres carrés est utilisée à l'aide du logiciel Design Expert. Les résultats de cette expérience sous forme d'ANOVA sont présentés. C'est un test qui compare une variance de terme avec une variance résiduelle. Les termes individuels dans le modèle ont un effet important sur la réponse. Dans le Tableau IV.5, l'analyse du tableau d'ANOVA pour le coefficient de transfert thermique global (U_x) révèle que le modèle global est très significatif avec une F-valeur de 947,07 et une probabilité de $< 0,0001$, indiquant que les variables indépendantes expliquent une grande partie de la variation du coefficient de transfert thermique global. Parmi les effets principaux, le débit volumétrique (Q_v) a un effet très significatif sur le coefficient de transfert thermique global,

avec une F-valeur de 152,4 et une probabilité de $< 0,0001$. En revanche, le nombre de tubes (nhp), la longueur du tubes (Lhp) et la température de sortie de l'échangeur (T_1) n'ont pas d'effet significatif (avec des probabilités respectives de 0,2908, 0,6558 et 0,5676). Les interactions entre les facteurs (AB, AC, AD, BC, BD, et CD) ne montrent également aucun effet significatif, avec des F-valeurs proches de 0 et des probabilités égales ou proches de 1, à l'exception de BD, qui a une probabilité de 0,2199 mais reste non significative. Le terme quadratique du débit volumétrique (A^2) présente un effet très significatif avec une F-valeur de 358,22 et une probabilité de $< 0,0001$, tandis que les termes quadratiques du nombre de passes (B^2), de la longueur des passes (C^2) et de la température de sortie de l'échangeur (D^2) ne sont pas significatifs. Enfin, l'erreur résiduelle est très faible (SCE = 0,0001), ce qui indique que le modèle ajuste bien les données. En conclusion, le débit volumétrique est le principal déterminant du coefficient de transfert thermique global dans ce modèle.

Tableau IV.5 Analyse ANOVA pour le coefficient de transfert thermique global (U_x)

Source	SCE	ddl	CM	F-valeur	Prob.	Remarque
Model	0,2832	14	0,0202	947,07	$< 0,0001$	Significatif
A-Qv	0,0033	1	0,0033	152,4	$< 0,0001$	Significatif
B-nhp	0	1	0	1,34	0,2908	Non significatif
C-Lhp	4,69E-06	1	4,69E-06	0,2197	0,6558	Non significatif
D-T₁	7,81E-06	1	7,81E-06	0,3655	0,5676	Non significatif
AB	0	1	0	0	1,0000	Non significatif
AC	0	1	0	0	1,0000	Non significatif
AD	0	1	0	0	1,0000	Non significatif
BC	0	1	0	0	1,0000	Non significatif
BD	0	1	0	1,88	0,2199	Non significatif
CD	0	1	0	0	1,0000	Non significatif
A²	0,0077	1	0,0077	358,22	$< 0,0001$	Significatif
B²	0	1	0	1,5	0,266	Non significatif
C²	0	1	0	2,03	0,2045	Non significatif
D²	0	1	0	1,5	0,266	Non significatif
Erreur	0,0001	6	0	-	-	-
Total	0,2833	20	-	-	-	-

Le graphique de probabilité normale des résidus du coefficient de transfert thermique global (U_x) illustré dans la Figure (IV.2), et indiqué que les résidus (erreur) se trouvent très proche par rapport la ligne droite de la normalité, prouve que les limites mentionnées dans le modèle du premier degré sont les seuls facteurs significatifs [11]. La normalité semble acceptable en plus les coefficients de corrélation très élevés.

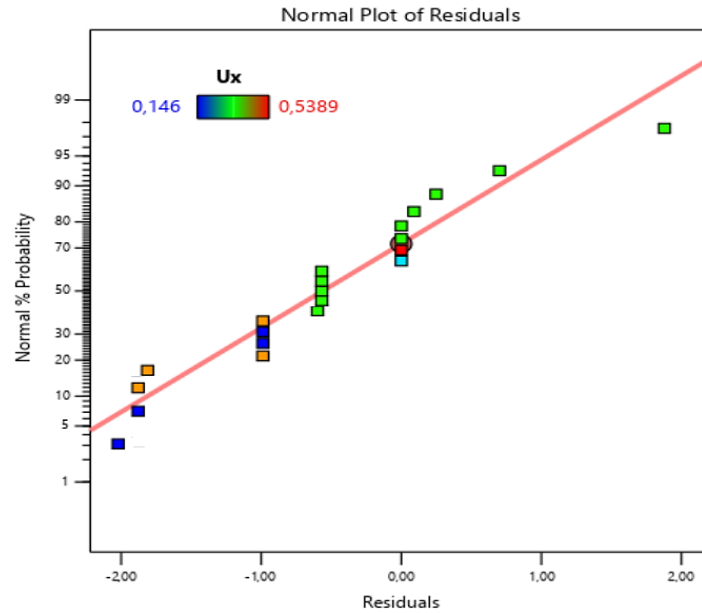


Figure IV.2 : Probabilités normales des résidus du coefficient de transfert thermique global

VI.4.2 Analyse de régression pour U_x en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1

Un modèle de régression de deuxième ordre a été développé pour le coefficient de transfert thermique global (U_x) à l'aide du logiciel Design Expert. Les termes insignifiants ont été exclus, sauf les effets principaux. La variable de réponse est U_x , alors que les prédicteurs sont le débit volumétrique (Q_v), le nombre de tubes (n_{hp}), la longueur du tube (L_{hp}) et la température de sortie de l'échangeur (T_1). En conséquence, les équations des modèles ajustés en termes de facteurs réels pour U_x est donné ci-dessous.

Le modèle du coefficient de transfert thermique global (U_x) est donné ci-dessous dans l'équation (IV.7). Son coefficient de détermination (R^2) est de 99,97%

$$U_x = +0,021 + 0,184Q_v - 0,005n_{hp} + 0,006L_{hp} + 0,0028T_1 - 0,017Q_v^2 \quad (IV.7)$$

La valeur du coefficient de détermination R^2 pour le modèle du coefficient de transfert thermique global (U_x) égale à 0.9997. Cela signifie que 99.97% des variations du niveau du U_x sont expliquées par ce modèle et que moins de 1% restent par conséquent inexpliquées. La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle du U_x est $R^2_{ajusté} = 99,89\%$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre ce modèle et les données de simulation. La Figure IV.3 montre une comparaison entre les valeurs estimées du coefficient de transfert thermique global (U_x) par les équations du modèle développé et les valeurs observées.

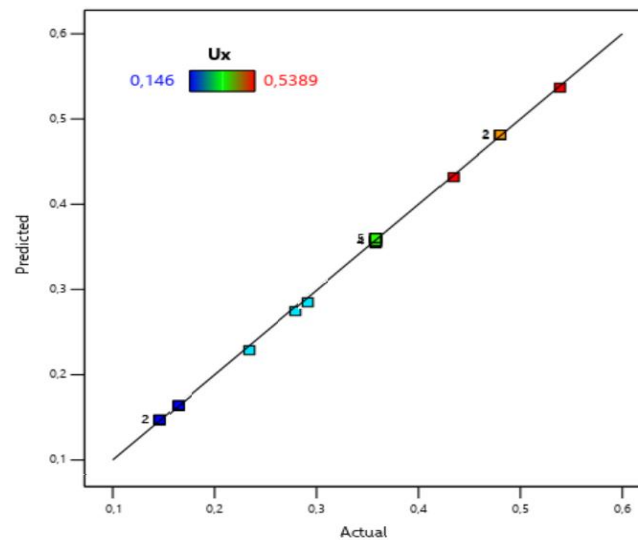


Figure IV.3 : Corrélation des valeurs mesurés et estimés du U_x

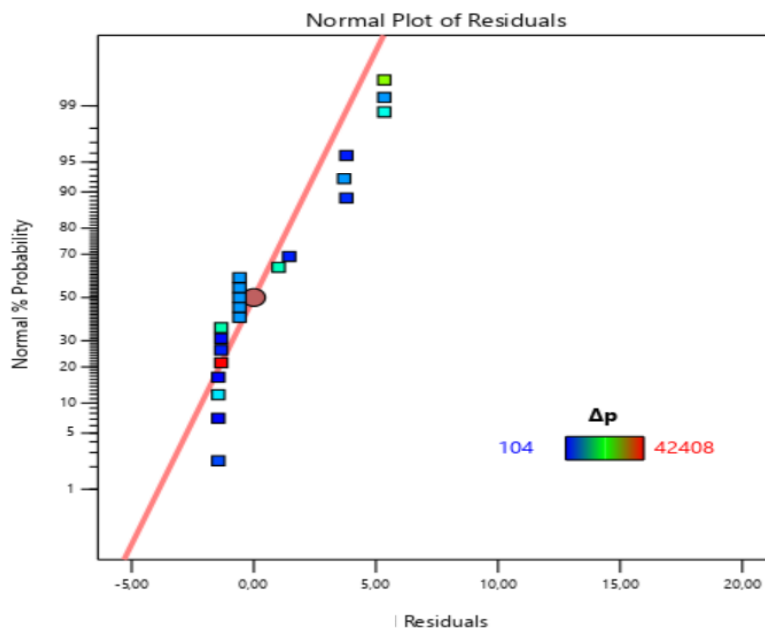
VI.4.3 Évolution des pertes de charge (Δp) en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1

L'analyse du tableau d'ANOVA pour les pertes de charge révèle que le modèle global est très significatif, avec une F-valeur de 144,52 et une probabilité de $< 0,0001$, indiquant que les variables indépendantes expliquent bien les variations des pertes de charge. Parmi les effets principaux, le débit volumétrique (A- Q_v) et le nombre de tubes (B- n_{hp}) n'ont pas d'effet significatif avec des probabilités respectives de 0,5812 et 0,5969. Cependant, la longueur des tubes (C- L_{hp}) a un effet très significatif sur les pertes de charge, avec une F-valeur de 22,2 et une probabilité de 0,0033. La température d'entrée (D- T_1) n'a pas d'effet significatif, avec une probabilité de 0,2535. Les interactions montrent des résultats variés : l'interaction AB (débit volumétrique et nombre de tubes) et l'interaction AC (débit volumétrique et longueur des tubes) sont très significatives avec des probabilités de 0,0003 et $< 0,0001$ respectivement. L'interaction AD (débit volumétrique et température d'entrée) est également significative avec une probabilité de 0,0401. Les interactions BC (nombre de passes et longueur des passes) et CD (longueur des tubes et température d'entrée) sont très significatives avec des probabilités de 0,0002 et 0,0003 respectivement. L'interaction BD (nombre de tubes et température d'entrée) n'a pas d'effet significatif avec une probabilité de 0,7227. Les effets quadratiques montrent que le terme A^2 (débit volumétrique) est significatif avec une F-valeur de 30,87 et une probabilité de 0,0014. En revanche, les termes quadratiques B^2 (nombre de tubes), C^2 (longueur des tubes) et D^2 (température d'entrée) ne sont pas significatifs avec des probabilités respectives de 0,9475, 0,5778 et 0,9475. L'erreur résiduelle est relativement faible ($SCE = 5,98E+06$), ce qui indique que le modèle ajuste bien les données.

Tableau IV.6 : Analyse de la variance ANOVA pour pertes de charge (Δp)

Source	SCE	ddl	CM	F-valeur	Prob.	Remarque
Model	2,02E+09	14	1,44E+08	144,52	< 0.0001	Significatif
A-Qv	3,38E+05	1	3,38E+05	0,3398	0,5812	Non significatif
B-nhp	3,10E+05	1	3,10E+05	0,3115	0,5969	Non significatif
C-Lhp	2,21E+07	1	2,21E+07	22,2	0,0033	Significatif
D-T₁	1,59E+06	1	1,59E+06	1,6	0,2535	Non significatif
AB	5,89E+07	1	5,89E+07	59,17	0,0003	Significatif
AC	2,22E+08	1	2,22E+08	223,26	< 0.0001	Significatif
AD	6,79E+06	1	6,79E+06	6,81	0,0401	Significatif
BC	6,34E+07	1	6,34E+07	63,67	0,0002	Significatif
BD	1,38E+05	1	1,38E+05	0,1383	0,7227	Non significatif
CD	5,56E+07	1	5,56E+07	55,82	0,0003	Significatif
A²	3,07E+07	1	3,07E+07	30,87	0,0014	Significatif
B²	4695,46	1	4695,46	0,0047	0,9475	Non significatif
C²	3,45E+05	1	3,45E+05	0,346	0,5778	Non significatif
D²	4695,46	1	4695,46	0,0047	0,9475	Non significatif
Erreur	5,98E+06	6	9,96E+05	-	-	-
Total	2,02E+09	20	-	-	-	-

Le graphique de probabilité normale des résidus des pertes de charge (Δp) illustré dans la figure (IV.4), et indiqué que les résidus se trouvent très proche par rapport la ligne droite de la normalité, prouve que les limites mentionnées dans le modèle du premier degré sont les seuls facteurs significatifs. La normalité semble acceptable en plus les coefficients de corrélation très élevés.

**Figure IV.4 :** Probabilités normales des résidus des pertes de charge (Δp)

VI.4.4 Analyse de régression pour Δp en fonction de Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1

Le modèle des pertes de charge (Δp) est présenté ci-dessous dans l'équation (IV.8). Son coefficient de détermination (R^2) est de 99,95 %.

Finalement, après décodage, l'équation du modèle de prédiction des pertes de charge (Δp) en fonction des **facteurs réels** et leurs interactions qui ont un effet significatif, est la suivante :

$$\Delta p = -31530,8 + 224,65Q_v - 2398,93n_{hp} + 5944,3L_{hp} + 1339,55T_1 + 562,27Q_v \times n_{hp} + 1757,3 \times Q_v \times L_{hp} - 190,8 Q_v \times T_1 + 281,54 n_{hp} \times L_{hp} - 263,61 L_{hp} \times T_1 + 784,36Q_v^2 \quad (IV.8)$$

La valeur du coefficient de détermination R^2 pour le modèle des pertes de charge (Δp) égale à 0.9995. Cela signifie que 99.95% des variations du niveau des pertes de charge (Δp) sont expliquées par ce modèle et que moins de 1% restent par conséquent inexpliquées (incertain). La valeur du coefficient de détermination ajusté de ce modèle des pertes de charge (Δp) est $R^2_{ajusté} = 99,84\%$. Il représente une correction du R^2 qui permet de prendre en compte le nombre de variables utilisées dans le modèle. Ces deux coefficients montrent une bonne corrélation entre ce modèle et les données de simulation. La figure IV.5 montre une comparaison entre les valeurs estimées des pertes de charge (Δp) par les équations du modèle développé et les valeurs observées.

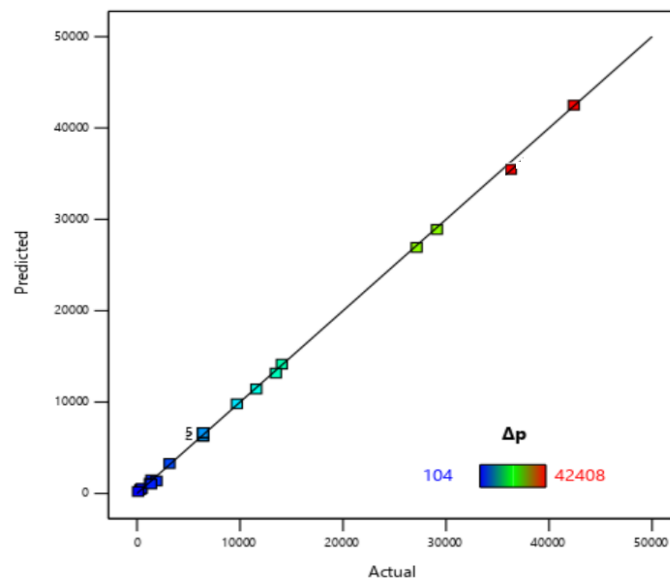


Figure IV.5 : Corrélation des valeurs mesurés et estimés des pertes de charge (Δp)

IV.4.5 3D Surfaces de réponses

Le MSR permet de visualiser un tracé tridimensionnel (3D), illustrant la réponse du processus en fonction de deux paramètres mais en gardant les autres paramètres constants. Les graphiques

de surface 3D de différentes interactions telles que Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1 , sont présentés à les Figures (IV.6 et IV.7) pour le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les Figures (IV.8 et IV.9) pour les pertes de charge (Δp). La Figure IV.6 montre la variation du le coefficient de transfert thermique global (U_x) avec le débit volumétrique (Q_v) et la longueur des tubes (L_{hp}). Cette figure démontre clairement que le coefficient de transfert thermique global (U_x) est fortement influencé par le débit volumétrique (Q_v) et, dans une moindre mesure, par la longueur des tubes (L_{hp}). L'augmentation de ces deux variables conduit à une augmentation significative de l'efficacité du transfert thermique dans le système étudié. En augmentant le débit volumétrique de 0,5 à 3,5 m^3/s , on observe une augmentation significative du coefficient de transfert thermique global. Cela indique que les débits volumétriques plus élevés améliorent l'efficacité de transfert de chaleur, probablement en augmentant la turbulence du fluide, ce qui facilite les échanges thermiques.

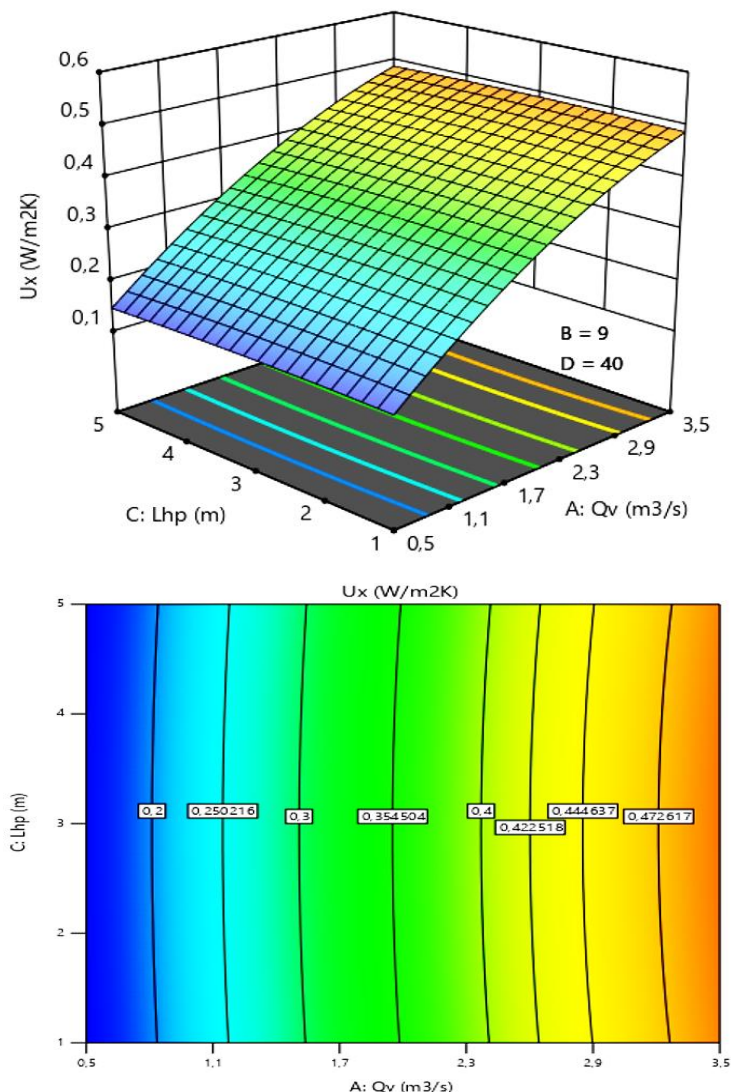


Figure IV.6 Effet du débit volumétrique (Q_v) et la longueur des tubes (L_{hp}) sur le coefficient de transfert thermique global (U_x)

La Figure IV.7 montre la variation du coefficient de transfert thermique global (U_x) avec le débit volumétrique (Q_v) et la température de sortie de l'échangeur (T_1), l'analyse des résultats démontre que le coefficient de transfert thermique global (U_x) est fortement influencé par le débit volumétrique (Q_v) la température de sortie de l'échangeur (T_1). L'augmentation de ces deux variables conduit à une augmentation significative de l'efficacité du transfert thermique dans le système étudié. En augmentant température de sortie de l'échangeur de 35 à 45 °C, le coefficient de transfert thermique global (U_x) augmente également. Une température de sortie de l'échangeur plus élevée peut entraîner une plus grande différence de température entre le fluide chaud et le fluide froid, ce qui favorise le transfert de chaleur.

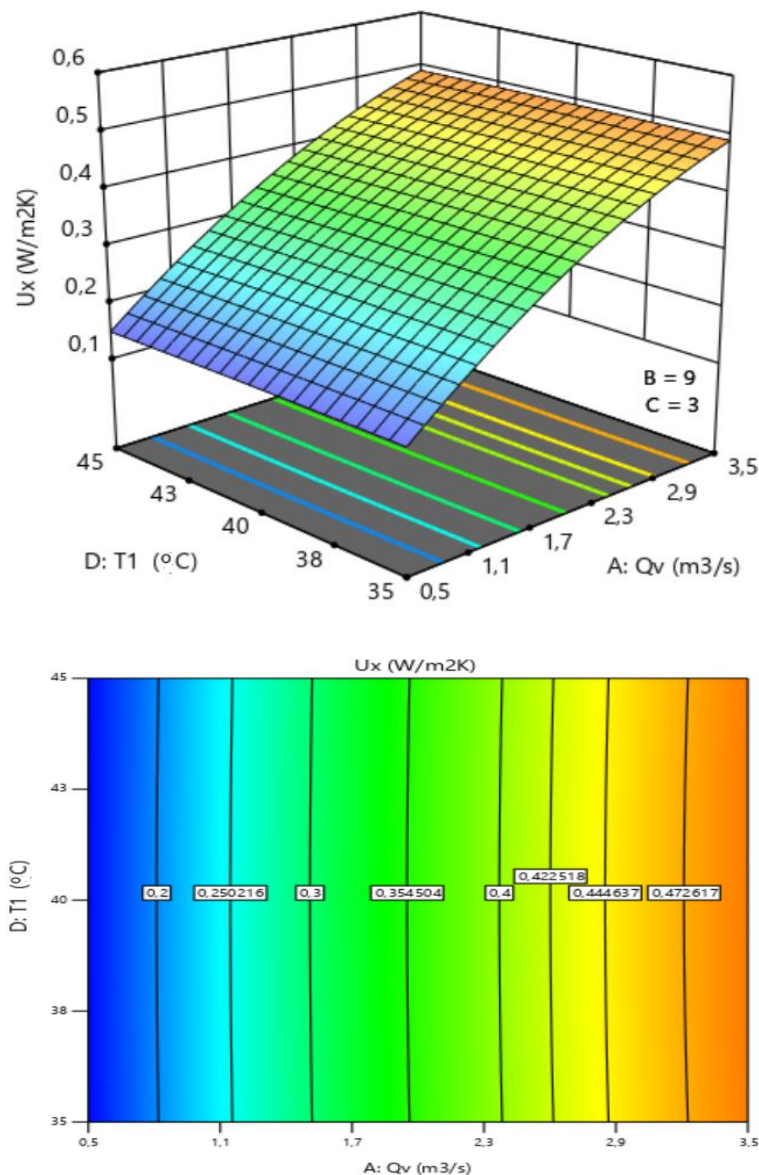


Figure IV.7: Effet du débit volumétrique (Q_v) et la température de sortie de l'échangeur (T_1) sur du coefficient de transfert thermique global (U_x)

La Figure IV.8 montre que la variation des pertes de charge (Δp) avec le débit volumétrique (Q_v) et le nombre de tubes (n_{hp}) entraîne une augmentation significative des pertes de charge. En augmentant le débit volumétrique de 0,5 à 3,5 m³/s et le nombre de tubes de 4 à 14, on observe une augmentation des pertes de charge, due à une résistance importante du fluide et un frottement supplémentaire dans le système.

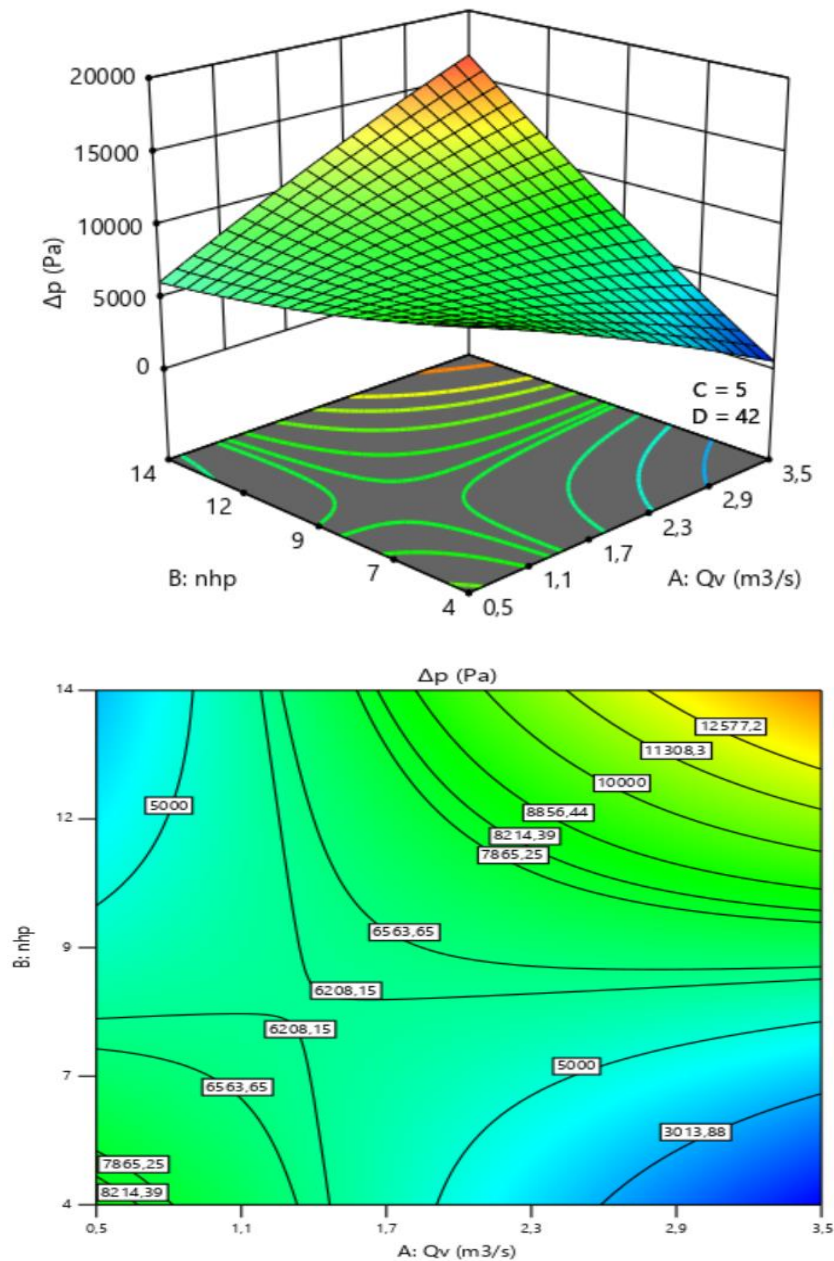


Figure IV.8 : Effet du débit volumétrique (Q_v) et le nombre de tubes (n_{hp}) sur les pertes de charge (Δp)

La Figure IV.9 présente la variation des pertes de charge (Δp) avec le débit volumétrique (Q_v) et la température de sortie de l'échangeur (T_1). En augmentant le débit volumétrique de 0,5 à 3,5 m³/s, on observe une augmentation significative de la perte de charge. Cela est attendu car un débit volumétrique plus élevé entraîne une plus grande résistance au mouvement du fluide, augmentant ainsi la perte de charge. De plus, En augmentant la température de sortie de l'échangeur de 35 à 45 °C, les pertes de charge Δp augmentent également. Une température de sortie de l'échangeur plus élevée peut modifier les propriétés du fluide, comme la viscosité, ce qui peut contribuer à une augmentation de la perte de charge.

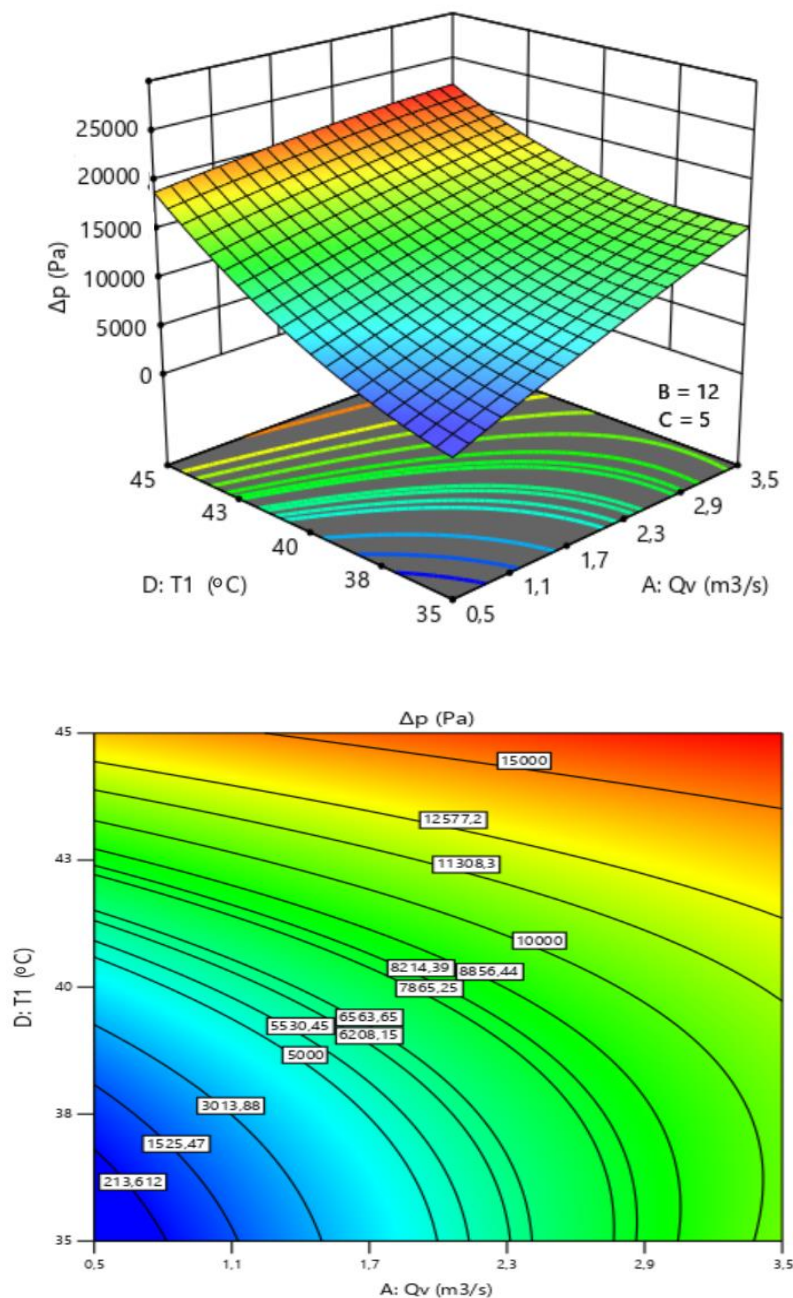


Figure IV.9 : Effet du débit volumétrique et la température de sortie de l'échangeur sur les pertes de charge (Δp)

IV.5 Optimisation les caractéristiques de l'échangeur de chaleur

La dernière technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses d'un système est la fonction de désirabilité. Cette fonction permet d'imposer des critères supplémentaires tels que les limites inacceptables et la sévérité avec laquelle la réponse doit rester près de la zone désirée. En partant de plusieurs équations exprimant des réponses différentes et ayant des facteurs communs, il s'agit de synthétiser ces fonctions en une seule, nommée la réponse composite ou désirabilité. Par la suite, il suffit de l'optimiser par les techniques habituelles de surface de réponse. Une telle méthode devient pratiquement nécessaire lorsque l'analyse comporte plus de trois facteurs [11]. Notre objectif est de trouver les valeurs optimales des caractéristiques de l'échangeur de chaleur (Q_v , n_{hp} , L_{hp} et T_1) produire le plus grand coefficient de transfert thermique global (U_x) avec minimum pertes de charge (Δp) afin d'améliorer l'efficacité énergétique globale. Compte tenu de la planification du plan d'expérience, nous déterminerons des équations de prédiction à partir des équations générées, qui permettent de prédire les résultats pour un ensemble de réglages choisis. De même, il est possible de trouver les réglages correspondants aux réponses optimales. Dans notre travail, ceci revient à l'optimisation simultanée des réponses (U_x et Δp) illustré par le système suivant :

$$DF = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j}} \quad (IV.11)$$

$$F(x) = -DF$$

Dans l'équation (VI.11) w_i , d_i et i sont des variables ciblées par l'utilisateur en fonction de leur expérience permettant à celui-ci d'indiquer les limites de la fonction de désirabilité autour de la valeur cible (T_i) pour une réponse i .

- Pour atteindre une valeur spécifique de T_i , la fonction élémentaire de désirabilité d_i calculé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} d_i &= 0 & \text{Si} & \quad Y_i \leq Min_i \\ d_i &= \left[\frac{Y_i - Min_i}{T_i - Min_i} \right] & \text{Si} & \quad Min_i \leq Y_i \leq T_i \\ d_i &= \left[\frac{Y_i - Max_i}{T_i - Max_i} \right] & \text{Si} & \quad T_i \leq Y_i \leq Max_i \\ d_i &= 0 & \text{Si} & \quad Y_i \geq Max_i \end{aligned} \quad (IV.12)$$

Les quantités Min_i et Max_i représentent les limites de désirabilité pour la réponse i . L'approche de la fonction de désirabilité repose en effet sur l'utilisation de la méthodologie de la surface de réponse pour la modélisation polynomiale de chaque réponse $Y_i(x)$, par une substitution des polynômes dans les équations (IV.12) et (IV.13), afin de faire encore une substitution par les désirabilités individuelles dans l'équation (IV.11). Finalement, il reste une

seule fonction objective pour chercher la solution x , tout en maximisant la désirabilité totale $F(x)$.

- Pour une maximisation, la fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i calculé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} di &= 0 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq \text{Min}_i \\ di &= \left[\frac{Y_i - \text{Min}_i}{\text{Max}_i - \text{Min}_i} \right] \quad \text{Si} \quad \text{Min}_i \leq Y_i \leq \text{Max}_i \quad (\text{IV.13}) \\ di &= 1 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq \text{Max}_i \end{aligned}$$

- Pour une minimisation, la fonction élémentaire de désirabilité pour la réponse Y_i calculé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} di &= 1 \quad \text{Si} \quad Y_i \leq \text{Min}_i \\ di &= \left[\frac{\text{Max}_i - Y_i}{\text{Max}_i - \text{Min}_i} \right] \quad \text{Si} \quad \text{Min}_i \leq Y_i \leq \text{Max}_i \quad (\text{IV.14}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} di &= 0 \quad \text{Si} \quad Y_i \geq \text{Max}_i \\ D &= \frac{\sum_{i=1}^p w_i \cdot |d_i(Y_i) - d_i(T_i)|}{p} \quad (\text{IV.15}) \end{aligned}$$

Avec :

- $d_i(Y_i)$ est la désirabilité individuelle pour la réponse Y_i
- $d_i(T_i)$ est la désirabilité individuelle ciblée T_i pour chaque réponse

Pour refléter la différence possible dans l'importance des différentes réponses, la dernière innovation consiste à peser les réponses, et donc donner les degrés d'importance correspondants à chaque réponse selon l'importance d'une réponse par rapport aux autres. Ainsi, dans notre étude la fonction de désirabilité globale sera évaluée par l'entremise de l'équation (IV.15), où le degré d'importance W_i sont tels que :

$$\sum_{i=1}^p w_i = 1 \quad (\text{IV.16})$$

Où :

W_i est le degré d'importance pour chaque réponse individuelle.

Voici une synthèse de cette technique d'optimisation simultanée de plusieurs réponses employée dans ce chapitre :

- À partir des estimations, Y_i , déterminer les fonctions élémentaires de désirabilité, d_i , en chaque point du plan d'expérimentation pour chaque réponse, selon qu'il s'agira d'un problème de maximisation ou d'une minimisation à l'aide des équations (IV.13) ou (IV.14).
- Évaluer la fonction de désirabilité globale en chaque point du plan de simulation, pour chaque réponse à l'aide de l'équation (IV.15).

Les contraintes utilisées pendant le processus d'optimisation sont illustrées dans le tableau IV.7. Les solutions optimales sont rapportées dans le tableau (IV.8) par ordre de niveau décroissant de désirabilité. La valeur de désirabilité 1 correspond à la plus grande valeur du coefficient de transfert thermique global (U_x) avec minimum pertes de charge (Δp) dans la gamme des caractéristiques de l'échangeur de chaleur.

Tableau IV.7 : Contraintes du processus d'optimisation

	Conditions	Objective	Lower limit	Upper limit	Importance
ε	Q_v (m ³ /s)	in range	0.5	3.5	3
	n _{hp}	in range	4	14	3
	L _{hp} (m)	in range	1	5	3
	T ₁ (°C)	in range	35	45	3
	U_x (W/m ² ·K)	Maximale	0.146	0.5389	5
	Δp (Pa)	Minimale	104	17143	3

Le

problème revient à maximiser la fonction de désirabilité (D) qui est la fonction objective sous les contraintes des variables. Le tableau suivant illustre les réglages optimums des caractéristiques de l'échangeur de chaleur.

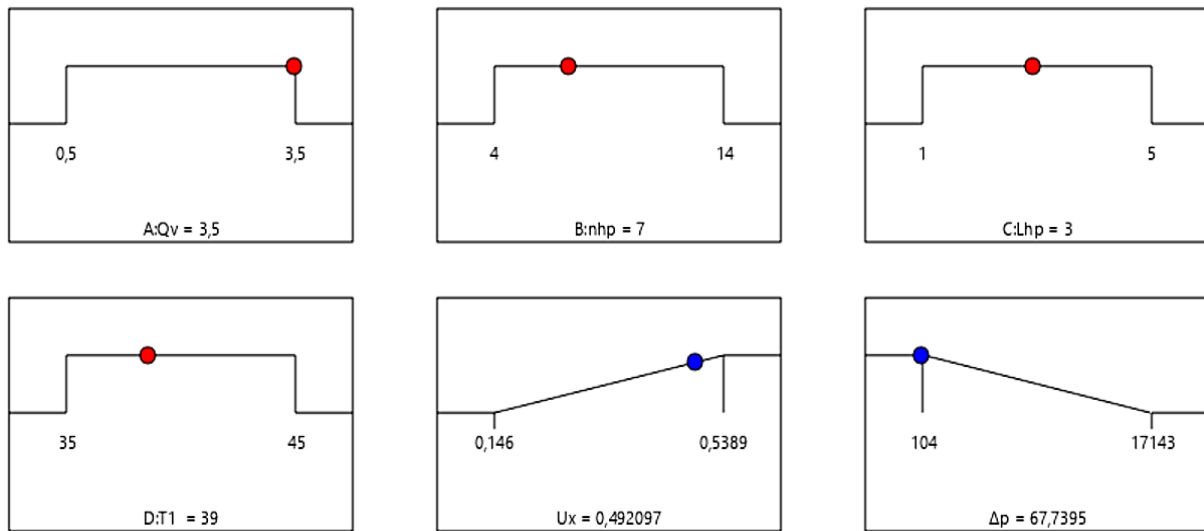
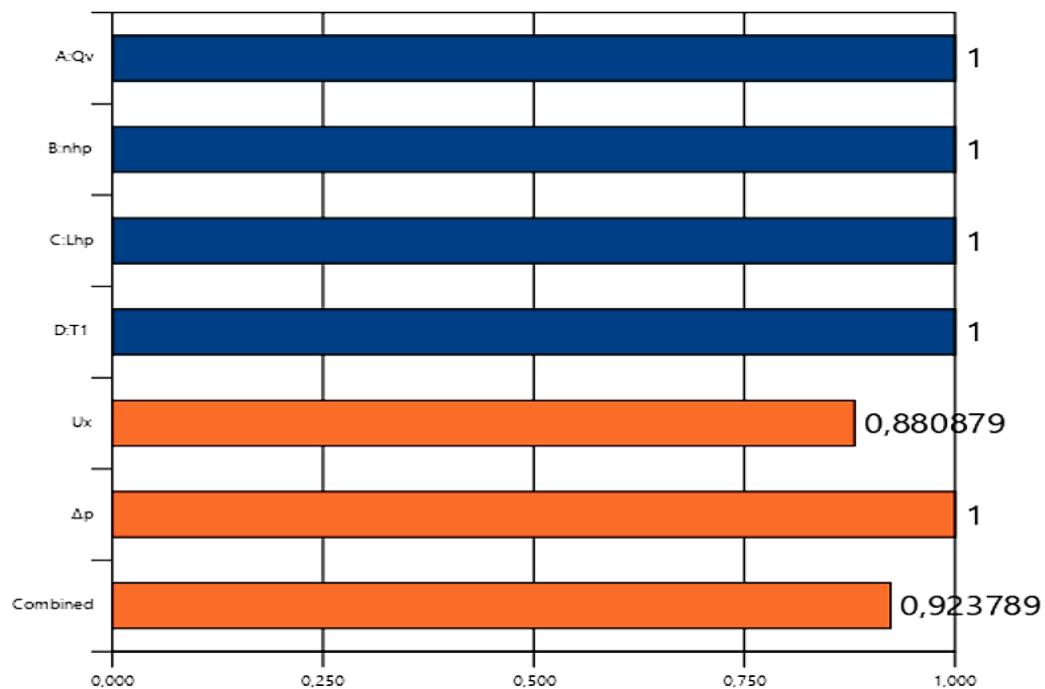
Tableau IV.8 : Les solutions optimales

N°	Q_v (m ³ /s)	n _{hp}	L _{hp} (m)	T ₁ (°C)	U_x (W/m ² ·K)	Δp (Pa)	Désirabilité	Remarks
1	3,5	7	2,93	38,58	0,492	67,739	0,924	<u>Selected</u>
2	3,5	7	2,86	38,57	0,492	95,476	0,924	
3	3,5	7	2,77	38,41	0,492	94,487	0,924	
4	3,5	7	2,90	39,04	0,492	96,474	0,924	
5	3,5	7	2,63	39,58	0,492	104,125	0,923	

Le tableau IV.9 montre les intervalles de prévision optimale des réponses correspondant aux conditions optimales des caractéristiques de l'échangeur de chaleur dans le tableau IV.8. Le graphique de la solution optimal désiré est donné dans la Figure V-9. Cette figure montre la valeur maximale de désirabilité et les valeurs des caractéristiques de l'échangeur de chaleur (Q_v , n_{hp}, L_{hp} et T₁) pour obtenir les meilleures valeurs des performances de l'échangeur de chaleur étudiée (le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)).

Tableau IV.9 : Les intervalles de prévision optimale des réponses (U_x et Δp)

Réponse	Prédiction	95% IC Min	95% IC Max	95% IP Min	95% IP Max
U_x (W/m ² .K)	0,492	0,4839	0,50021	0,46593	0,51826
Δp (Pa)	67,739	66,1134	69,0467	65,2535	70,2892

Figure IV.10 : Diagramme d'optimisation de réponses multiples du coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)Figure IV.11 : Diagramme de désirabilité du coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp)

IV.6 Conclusions

Dans ce chapitre, la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) a été utilisée pour étudier et analyser les caractéristiques de l'échangeur de chaleur étudié et leurs interactions qui ont un effet statiquement significatif lors des essais de simulation, des modèles de régressions multiples sont associés à l'optimisation la fonction désirabilité. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les caractéristiques de l'échangeur de chaleur optimale afin améliorer d'améliorer l'efficacité énergétique globale de l'échangeur de chaleur étudiée, le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp).

. Les conclusions de ce chapitre sont les suivantes :

- la température de sortie de l'échangeur plus élevée peut entraîner une plus grande différence de température entre le fluide chaud et le fluide froid, ce qui favorise le transfert de chaleur.
- En augmentant le débit volumétrique de 0,5 à 3,5 m³/s et le nombre de tubes de 4 à 14, on observe une augmentation des pertes de charge, due à une résistance importante du fluide et un frottement supplémentaire dans l'échangeur de chaleur.
- les débits volumétriques plus élevés améliorent l'efficacité de transfert de chaleur, probablement en augmentant la turbulence du fluide, ce qui facilite les échanges thermiques
- Les essais de normalité sur les résidus des modèles de régression linéaire multiples s'assurent que les modèles ont extrait toute l'information applicable à partir des essais de simulations, et ces derniers valident également l'adéquation des modèles développés.
- En comparant les valeurs de simulation et prédites le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp), on remarque qu'ils sont en bonne corrélation.
- Les valeurs optimales caractéristiques de l'échangeur de chaleur pour obtenue le plus grand, coefficient de transfert thermique global (U_x) avec minimum pertes de charge (Δp) sont : débit volumétrique (Q_v), 3.5 m³/s, nombre de tubes (n_{hp}), 7, longueur du tube (L_{hp}), 2,93 m et la température de sortie de l'échangeur (T_1), 38.58 °C, avec le coefficient de transfert thermique global (U_x) estimée de 0,492 W/m²·K et les pertes de charge (Δp) de 67,739 Pa.

Conclusion Générale

Dans cette étude, la méthodologie des surfaces de réponse (MSR) a été utilisée pour étudier et analyser les caractéristiques de l'échangeur de chaleur étudié et leurs interactions qui ont un effet statistiquement significatif lors des essais de simulation, des modèles de régressions multiples sont associés à l'optimisation la fonction désirabilité. L'objectif principal de cette étude est de déterminer les caractéristiques de l'échangeur de chaleur optimale afin d'améliorer l'efficacité énergétique globale de l'échangeur de chaleur étudiée, le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp).

. Les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- la température de sortie de l'échangeur plus élevée peut entraîner une plus grande différence de température entre le fluide chaud et le fluide froid, ce qui favorise le transfert de chaleur.
- En augmentant le débit volumétrique de 0,5 à 3,5 m³/s et le nombre de tubes de 4 à 14, on observe une augmentation des pertes de charge, due à une résistance importante du fluide et un frottement supplémentaire dans l'échangeur de chaleur.
- les débits volumétriques plus élevés améliorent l'efficacité de transfert de chaleur, probablement en augmentant la turbulence du fluide, ce qui facilite les échanges thermiques
- Les essais de normalité sur les résidus des modèles de régression linéaire multiples s'assurent que les modèles ont extrait toute l'information applicable à partir des essais de simulations, et ces derniers valident également l'adéquation des modèles développés.
- En comparant les valeurs de simulation et prédites le coefficient de transfert thermique global (U_x) et les pertes de charge (Δp), on remarque qu'ils sont en bonne corrélation.
- Les valeurs optimales caractéristiques de l'échangeur de chaleur pour obtenir le plus grand, coefficient de transfert thermique global (U_x) avec minimum pertes de charge (Δp) sont : débit volumétrique (Q_v), 3.5 m³/s, nombre de tubes (n_{hp}), 7, longueur du tube (L_{hp}), 2,93 m et la température de sortie de l'échangeur (T_1), 38.58 °C, avec le coefficient de transfert thermique global (U_x) estimée de 0,492 W/m²·K et les pertes de charge (Δp) de 67,739 Pa.
- Cette étude a permis de mettre en évidence les paramètres clés influençant les performances des échangeurs de chaleur et de proposer des configurations optimales pour améliorer leur efficacité énergétique, tout en minimisant les pertes de charge. Les résultats obtenus offrent des

perspectives précieuses pour la conception et l'optimisation des systèmes de transfert de chaleur dans diverses applications industrielles.

Références Bibliographiques

- [1] H. Souki, Les stratégies industrielles et la construction de la filière lait en Algérie: portée et limites. *Revue Campus*, (15), pp. 3-15. (2009)
- [2] L. M. Mansour, Étude de l'influence des pratiques d'élevage sur la qualité du lait effet de l'alimentation. Thèse de Doctorat en Sciences Filière : Agronomie, Spécialité : Production animale. Université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif. p 30. (2015)
- [3] C. Alais, Sciences du lait. Principes de techniques laitières. 3ème édition, Publicité France. (1984) [<http://www.azaquar.com>].
- [4] D. Bahd, Travaux pratique de Bromatologie. 5ème année pharmacie FMPOS, Bamako. (2003).
- [5] F.M. Luquet, Laits et produits laitiers vache, Brebis, Chèvre. .2eme Edition : Tec et Doc. Lavoisier. P : 3-6. (1990).
- [6] A. Linden, Biochimie alimentaire. Edition : massons. Paris. P : 142. (1987).
- [7] R. Veisseyre, Technologie de lait, constitution, récolte, traite et transformation du lait. Edition 3e : La maison rustique. Paris. P : 210-342, (1979).
- [8] J-C M'boya, Groupe de Recherche et d'Echanges Technologique. Éditions Lafayette, Paris. (2001)
- [9] Velez, Alix-Arielle-Sarah, Étude bibliographique du rapport bénéfices-risques de la consommation de lait cru de vache. Thèse de doctorat vétérinaire : faculté de médecine de Créteil : école nationale vétérinaire d'al fort, 86 pages, (2017).
- [10] K. Ghoul, M. Djedira, Procédés de préparation et technique d'analyse du lait pasteurisé (unité Touggourt), Mémoire de Master, université Kasdi Merbah Ouargla, (2019).
- [11] A. Boularak, Guide des déterminations analytiques des laits et produits laitiers. Ministère du commerce. Algérie, (2005).
- [12] K. Maatouk, Z. Kamou, S. Mossaoui, Analyse de chaine de fabrication du lait cas de l'usine d'ADRAR, Mémoire de Master, Université Ahmed Daraia Adrar, (2022).
- [13] J. F. Sacadura, Initiation Aux Transfert Thermiques, Edition Lavoisier. Et Ozisik M.N, Heat Conduction, Editions John Wily and Sons, New–York, (1993).
- [14] Yunus A. Çengel, Heat Transfer. Chapitre 13, Deuxième edition, 2002
- [16] G. Taguchi and Y. Wu, Introduction to off-line quality control, Central Japan Quality Control Association (1985).

- [17] F. Louvet, L. Delplanque, Les Plans d'Expériences par la méthode Taguchi, Expérimentique, (2005).
- [18] W.Y. Fowlkes and C.M. Creveling, Ingenerate robust (1998).
- [19] A. Dean, Design and Analysis of Experiments (2000).
- [20] D.C. Montgomery, Design and analysis of experiments, 5thed: Wiley & Sons Inc; New York (2001).
- [21] J. Goupy, Plans d'expériences pour surface de réponse (1999).
- [22] J.J. Dreesbeke, J. Fine, Plans d'expériences. Applications à l'entreprise (1997).
- [23] D. Byeng and K.A.K Youn, A new response surface methodology for reliability-based design optimization, Computers and Structures (2003).
- [24] X. Guan and R. Melchers, Effect of response surface parameter variation on structural reliability estimates. Structural Safety, tome 23: pp. 429 – 444 (2001).
- [26] K. Onur and D. Necip, Joint optimization of mean and standard deviation using response surface methods, Journal of Quality Technology, tome 35, n°3 (2003).
- [27] G.E.P. Box and K.B. Wilson, on the experimental design for attainment of optimum conditions, Journal of the Royal Statistical Society, tome Series B 13, pp. 1–45 (1951).
- [28] M. Quesada, E. Del-Castillo, A bayesian approach for multiple response surface optimization in the presence of noise variables. Journal of applied statistics, tome 31, no 3: pp. 251–270, (2004).
- [29] . Allen, Low-cost response surface methods applied to the design of plastic fasteners, Quality Engineering, Volume 12, tome 12, N° 4: pp. 583–591(2000).
- [30] D. Bursztyna, Comparison of designs for computer experiments. Journal of Statistical Planning and Inference, In press, (2004).
- [31] M. Trosset, N. Alexandrov, New methods for robust design using computer simulation, Proceedings of the Section on Physical and Engineering Sciences, American Statistical Association (2003).
- [32] P. Besse, Pratique de la modélisation Statistique (2003).
- [33] D. Benoist, Y. Tourbier, Plans d'expériences : construction et analyse (1994).
- [34] C. Yann and P. Siarry, Optimisation multiobjectif, Editions Eyrolles paris, (2002).
- [35] E.C. Harrington, The desirability function, IQC 21 (1965).
- [36] G. Derringer, Simultaneous optimization of several response variables, JQT, tome 12 (1980).

- [37] E.D. Castillo, Modified desirability function for multiple response optimizations, JQT, tome 28 (1996).
- [38] C. Ch'ng, A new approach for multiple response optimizations, Quality Engineering (2005).
- [39] A.I. Khuri and J. Cornell, Response Surface Design and Analysis, Marcel Dekker, New York (1987).
- [40] Kakaç S (Sadik), Liu H. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, (2012).
- [41] S.A. Klein et F.L. Alvarado, EES Engineering Equation Solver Pour Microsoft Windows, 1992.