

République Algérienne démocratique et populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITE DE RELIZANE**

Faculté des Sciences et Technologies  
Département de Génie mécanique



**THESE DE DOCTORAT LMD 3<sup>ème</sup> cycle**

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Présentée par

**M<sup>r</sup> Khorchef Mohamed Amine**

Titre de thèse

**Etude numérique et paramétrique d'un échangeur de chaleur  
air-sol.**

Soutenue le : **10/06/2024**

**Devant le jury composé de :**

Président	Zahi Rachid	MCA	Univ.de Relizane
Directeur de thèse	Serier Mohamed	Pr	Univ.de ain temouchent
Co-Directrice de thèse	Rahmani Rachida	MCA	Univ.de Relizane
Examineur	Zemri amine	MCA	Univ.de Relizane
Examineur	Driss Nehari	Pr	Univ.de Ain Temouchent
Examinatrice	Boualem Khadidja	MCA	Univ.de Relizane

Année Universitaire : 2023/2024

# Dédicaces

*À mon père, mon mentor de toujours, et à ma tendre mère,*

*Pour leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants.*

*À mes proches et à toute ma famille,*

*Pour leur soutien inconditionnel et leur présence réconfortante.*

*À mes chers frères et sœurs,*

*Pour leur patience infinie et leur soutien infaillible.*

*À mes amis et à tous ceux qui m'ont aimé et soutenu,*

*Pour leur amitié sincère et leur soutien inestimable.*

*À tous ceux qui occupent une place spéciale dans mon cœur,*

*Même si je n'ai pas cité leur nom.*

*À la joie de ceux qui me sont chers,*

*Je dédie humblement ce travail.*

*Mohamed Amine Khorchef.*

# *Remerciements*

*Mes remerciements vont en premier lieu à ALLAH qui m'a donné le courage, la volonté et la patience d'arriver au terme de ce travail. Par ailleurs, mes vifs remerciements vont à mes chers parents pour tous leurs sacrifices, leur soutien inconditionnel et les moyens qu'ils ont déployés pour m'accompagner tout au long de mes années d'études. Mes vifs remerciements vont également à mon encadreur, M. **Mohamed Serier** de l'Université de Relizane, pour les efforts fournis tout au long de la préparation de ce travail, ainsi que pour le temps précieux qu'il m'a consacré. Je tiens également à remercier M. **Aboubakeur Benariba** de l'Université de Tiaret pour sa contribution et son soutien. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail. Enfin, je souhaite exprimer mes remerciements à tous les enseignants qui m'ont guidé et inspiré grâce à leur savoir et leur expérience tout au long de mon parcours universitaire.*

# Table des matières

---

<b>Dédicace.....</b>	<b>II</b>
<b>Remerciement.....</b>	<b>III</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>X</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>XII</b>
<b>Nomenclatures.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>XVI</b>

## **Chapitre I : Etude bibliographique**

I.1. Introduction.....	4
I.2. Les échangeurs de Chaleur dans l'Industrie et l'Innovation.....	4
I.3. Diffèrent modes de circulation.....	4
I.3.1. Echangeur à courant parallèle.....	5
I.3.2. Echangeur à courant croisé.....	6
I.4. Les échangeurs de chaleur les plus courants.....	7
I.4.1. Echangeur à tubes et calandre.....	7
I.4.2. Echangeur tubulaire.....	8
I.4.3. Echangeurs à plaques et à joints.....	9
I.4.4. Echangeur tubes à ailettes.....	9
I.4.5. Echangeur spiral.....	10
I.5. Fonctionnement et Mécanismes de Transfert de Chaleur.....	10
I.5.1. Modes de transfert.....	11
I.5.1.1. Conduction.....	11
I.5.1.2. Convection.....	11
I.5.1.3. Rayonnement.....	11
I.5.2. Facteurs Influant sur l'Efficacité.....	12
I.5.2.1. Matériaux de construction et propriétés thermiques.....	12
I.5.2.2. Conditions opérationnelles : température, pression, et débit.....	12
I.6. Systèmes d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS).....	12
I.6.1. Principe de fonctionnement d'un échangeur thermique air-sol (ECAS).....	13
I.6.2. Diverses configurations de tuyauterie du système ECAST.....	14

## Table des matières

---

I.6.3. Avantages et inconvénients de l'échangeur de chaleur terre-air.....	16
I.6.4. les paramètres influant sur l'efficacité d'échangeur thermique air-sol (ECAS)	16
I.6.4.1. Effet des Conditions Géographiques et Climatiques.....	16
I.6.4.1.2. Effet des Propriétés du Sol.....	17
I.6.4.1.3. Conductivité thermique du sol.....	17
I.6.4.1.4. Contenu en humidité du sol.....	17
I.6.4.1.5. Densité du sol.....	18
I.6.4.2. Influence des Paramètres Thermiques et d'Écoulement de l'Air.....	18
I.6.4.2.1. Température de l'air d'entrée.....	18
I.6.4.2.2. Vitesse de l'air.....	19
I.6.4.3. Influence des Propriétés du Tuyau sur le Système ECAST.....	20
I.6.4.3.1. Longueur du Tuyau.....	20
I.6.4.3.2. Diamètre du tuyau.....	20
I.6.4.3.3. La profondeur du tuyau.....	20
I.6.4.3.4 Conductivité thermique du matériau.....	21
I.7. Recherche bibliographique.....	21
I.7.1. Etudes basées sur l'approche analytique.....	21
I.7.2. Etudes basées sur l'utilisation des logiciels de simulation.....	23
I.7.3. Etudes basées sur l'expérimentale.....	23
I.8. Conclusion.....	24
<b>Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation</b>	
II.1. Introduction.....	26
II.2. Introduction à la méthode des plans d'expériences.....	26
II.3. Objectifs et avantages des plans d'expériences.....	27
II.3.1. Objectifs.....	27
II.3.2. Avantages.....	27
II.4. Termes et concepts communs des plans d'expériences.....	28
II.4.1. Niveaux des Variables .....	29
II.4.2. Répétitions.....	29
II.4.3. Espace expérimental.....	30

## Table des matières

II.4.5. Points expérimentaux.....	30
II.4.6. Domaine d'étude.....	31
II.5. Modélisation mathématique a priori de la réponse.....	33
II.5.1. Modélisation mathématique.....	33
II.5.2. Modélisation expérimentale.....	33
II.6. Système d'équations.....	34
II.6.1. Matrices Clés .....	35
II.7. Types de Plans Expérimentaux.....	35
II.7.1. Plan Factoriel Complet (PFC).....	35
II.7.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux.....	36
II.7.1.1.1. Matrice d'expériences.....	36
II.7.1.1.2. Effets globaux et effets moyens.....	39
II.7.1.1.3. Effets d'interaction.....	40
II.7.1.1.4. Avantages du Plan Factoriel Complet à 2 Niveaux .....	41
II.7.1.1.5. Inconvénients du Plan Factoriel Complet à 2 Niveaux .....	41
II.7.1.2. Plans factoriels fractionnaires a deux niveaux $2^{k-q}$ .....	41
II.7.1.2.1. Application au plan factoriel fractionnaire $2^{3-1}$ .....	42
II.7.1.2.2. Les Avantages des Plans Factoriels Fractionnaires à Deux Niveaux $2^{k-q}$ .....	43
II.7.1.2.3. Inconvénients des Plans Factoriels Fractionnaires à Deux Niveaux $2^{k-q}$ .....	43
II.7.1.3. Autre plan à deux niveaux.....	44
II.7.1.3.1. Les plans de Koshal.....	44
II.7.1.3.2. Avantages des plans de Koshal .....	44
II.7.1.3.3. Inconvénients des plans de Koshal .....	45
II.7.1.3.4. Les plans de Rechtschaffner.....	45
II.8. Les Plans pour surfaces de reponse.....	45
II.8.1. Les plans composites centrés.....	46
II.8.2. Les plans de Box-Behnken.....	48
II.8.3. Représentation graphique.....	49
II.8.3.1 Surface de réponse.....	49
II.8.3.2. Courbe iso-réponse.....	50

## Table des matières

---

II.9. Les plans pour simulations numeriques.....	51
II.10. Planification et Conception d'Expériences.....	52
II.11. Techniques d'analyse.....	53
II.11.1. Test de Signification des Effets.....	53
II.11.2. Test de validation du modèle.....	55
II.11.3. Mesures statistiques pour évaluer le modèle.....	56
II.12. Les logiciels de plans d'expériences.....	58
II.12.1. Les principales fonctionnalités des logiciels de plans d'expériences.....	59
II.13. Conclusion .....	59
<b>Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT</b>	
III.1. Introduction .....	61
III.2. Modélisation mathématique des écoulements fluides par la Dynamique des Fluides Numérique (CFD).....	61
III.2.1. Simulation Numérique Directe (DNS).....	62
III.2.2. Simulation des Grandes Échelles (LES - Large Eddy Simulation).....	63
III.2.3. Modélisation Statistique des Équations de Navier-Stokes (RANS Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations).....	63
III.3. Modèles de turbulence.....	64
III.3.1. Modèle k- $\epsilon$ Réalisable.....	64
III.4. Méthodes de résolution des équations régissantes.....	65
III.5. Introduction à FLUENT : Un Aperçu de la Simulation Numérique en Dynamique des Fluides.....	66
III.5.1. Évolution de la Simulation Numérique.....	67
III.5.2. Les Enjeux de l'Ingénierie Moderne.....	67
III.5.3. Importance de la Simulation Numérique.....	68
III.6. Caractéristiques du Logiciel Ansys FLUENT.....	68
III.6.1. Modélisation des Phénomènes.....	68
III.6.2. Avantages de l'utilisation d'ANSYS FLUENT pour la modélisation des phénomènes.....	68
III.6.3. Capacité de Résolution.....	68
III.6.4. Maillage.....	69
III.6.4.1. Types de maillage pour ANSYS Fluent.....	69
III.7. Procédure de Simulation dans Ansys workbench.....	70

## Table des matières

---

III.7.1. Préprocesseur (Design Modeler).....	72
III.7.2. Génération du Maillage .....	72
III.7.3. Conditions aux limites .....	73
III.7.4. Solveur Fluent .....	73
III.7.5. Post-processeur et Résultats .....	74
III.7.6. Étude d'indépendance du maillage.....	74
III.8. Conclusion.....	74
<b>Chapitre IV : Résultats et interprétations</b>	
IV.1. Introduction .....	77
IV.2. Premier modèle .....	77
IV.2.1. Expérimental.....	77
IV.2.2. Plan expérimental.....	78
IV.2.3. Résultats expérimentaux .....	79
IV.2.4. Optimisation par plan factoriel complet .....	80
IV.2.5. Pourcentage de contribution de chaque paramètre .....	87
IV.3. Deuxième modèle .....	88
IV.3.1. Modèle physique et distribution du maillage .....	88
IV.3.2. Hypothèses du Modèle.....	88
IV.3.3. Conditions aux Limites.....	91
IV.3.4. Analyse de la solution technique et de la convergence.....	92
IV.3.5. Étude de l'indépendance du maillage pour la température de sortie de l'ECAST.....	93
IV.3.6. Validation du modèle de simulation d'échangeur de chaleur air-sol (ECAST).....	93
IV.3.7. Approche du plan d'expérience factoriel complet.....	94
IV.3.8. Analyse statistique.....	95
IV.3.9. Analyse paramétrique des ECHAS dans la région de Timimoun, Algérie..	97
IV.3.10. Résultats de simulation et Combinaisons de facteurs pour le système d'Échangeur de Chaleur Air-Sol (ECAST).....	97
IV.3.11. Les résultats des expériences à facteur unique.....	99
IV.3.12. Optimisation par Plan d'Expérience Factoriel Complet.....	102
IV.2.13. Contribution en pourcentage de chaque paramètre.....	106
IV.3. Conclusion.....	106



## Table des matières

---

Conclusion générale	107
Références bibliographique	111

## Liste des figures

---

Figure I.1 : Echangeur de chaleur contre courant.....	05
Figure I.2 : Echangeur de chaleur co-courant.....	05
Figure I.3 : circulation courant croisé méthodique.....	06
Figure I.4 : circulation courant croisé anti-méthodique.....	07
Figure I.5 : Echangeur à tubes et calandre.....	08
Figure I.6 : Echangeur tubulaire.....	08
Figure I.7 : Echangeur à plaques et joints.....	09
Figure I.8 : Echangeur tubes à ailettes.....	10
Figure I.9 : Echangeur spiral.....	10
Figure I.10 : Echangeur de Chaleur Terre-Air (ECAS) boucle ouverte.....	13
Figure I.11 : Echangeur de Chaleur Terre-Air (ECAS) boucle fermée.....	14
Figure I.12 : Différents agencements de tuyaux pour le système ECAST [13].....	15
Figure I.13 : Conceptions d'échangeurs géothermiques verticaux [12]. (a) tube en U unique, et (b) tubes en U doubles.....	15
Figure I.14 : Performance des ECAS sous différentes températures de l'air d'entrée [19]	19
Figure I.15 : Air temperature along the tube length at different depths [33].....	21
Figure II.1 : Entrées et sorties d'une expérience.....	28
Figure II.2 : Représentation des Niveaux et du Domaine de Variation d'un Facteur [60].	29
Figure II.3 : Représentation des facteurs dans l'espace expérimental [60].....	30
Figure II.4 : Représentation de Point dans l'Espace Expérimental.....	31
Figure II.5 : Le domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs (ici, il n'y a pas de contraintes).....	32
Figure II.6 : Le domaine d'étude sous contraintes est représenté par la partie grisée.....	32
Figure II.7 : Plans factoriels complets $2^2$ .....	36
Figure II.8 : Plans factoriels complets et $2^3$ .....	37
Figure II.9 : Définition de l'effet global et de l'effet moyen.....	40
Figure II.10 : Analyse des interactions entre les facteurs $X_1$ et $X_2$ .....	40
Figure II.11 : Un plan factoriel complet $2^3$ peut être divisé en deux plans factoriels fractionnaire $2^{3-1}$ , un plan noir et un plan gris [61].....	42
Figure II.12 : Plan de Koshal pour trois facteurs [61].....	44
Figure II.13 : Plan composite centré pour 3 facteurs [61].....	46
Figure II.14 : Plan de Doehlert. Les points 1 à 7 illustrent un premier plan de Doehlert. Les trois points 8, 9 et 10 illustrent les expériences supplémentaires. Les points 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1 illustrent un deuxième plan de Doehlert [60]...	47

## Liste des figures

Figure II.15 : Plans de Box-Behnken [61].....	48
Figure II.16 : Exemple de surfaces de réponse [61].....	50
Figure II.17 : Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs [61].....	51
Figure III.1 : Un aperçu des domaines dans lesquels nous pouvons utiliser la simulation numérique.....	67
Figure III.2 : Différents types des mailles.....	70
Figure III.3 : Types de maillage utilisé par "FLUENT " .....	70
Figure III.4 : organigramme sur les Procédure de Simulation dans Ansys FLUENT.....	71
Figure III.5 : Entrez dans l'interface de Design Modeler.....	72
Figure III.6 : Étapes de maillages.....	73
Figure IV.1 : Image Illustrator de l'échangeur air-sol .....	78
Figure IV.2 : Graphique de probabilité normale des résidus. (a) Représente les résultats de la saison hivernale. (b) Représente les résultats de la saison estivale.....	81
Figure IV.3 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la conductivité du tuyau sur la distribution de la température pour les saisons d'hiver .....	84
Figure IV.4 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la vitesse de l'air sur la distribution de la température pour les saisons d'hiver .....	85
Figure IV.5 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la vitesse de l'air sur la distribution de la température pour les saisons d'été .....	86
Figure IV.6 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la conductivité du tuyau sur la distribution de la température pour les saisons d'été .....	87
Figure IV.7 : Contribution en pourcentage de chaque paramètre .....	88
Figure IV.8 : Modèle physique.....	89
Figure IV.9 : Le plan de section de l'ECAST.....	89
Figure IV.10 : Modèle de maillage pour l'ECAST.....	90
Figure IV.11 : Étude d'indépendance de maillage pour l'ECAST.....	94
Figure IV.12 : Comparaison des données CFD actuelles et des données expérimentales publiées par [77].....	95
Figure IV.13 : Temperature distribution for 1 hour.....	95
Figure IV.14 : Effet de la profondeur du tuyau sur la température de sortie.....	100
Figure IV.15 : Effect of pipe length on Outlet temperature.....	101
Figure IV.16 : Effect of air velocity on outlet temperature.....	101
Figure IV.17 : Effet de la conductivité thermique du tuyau sur la température de sortie..	102
Figure IV.18 : Tracés de contour et surface de réponse en fonction de la profondeur du tuyau et de la longueur du tuyau.....	105
Figure IV.19 : Tracés de contour et surface de réponse en fonction de la profondeur du tuyau et de la vitesse de l'air.....	105
Figure IV.20 : Tracés de contour et surface de réponse en fonction de la longueur du tuyau et de la conductivité thermique du tuyau.....	105
Figure IV.21 : Contribution en pourcentage de chaque paramètre.....	106

## Liste des tableaux

---

Tableau II.1 : Matrices d'expériences pour les plans factoriels complets $2^2$ .....	38
Tableau II.2 : Matrices d'expériences pour les plans factoriels complets $2^3$ .....	39
Tableau II.3 : Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs.....	49
Tableau II.4 : Guide de sélection d'un plan.....	53
Tableau II.5 : Fisher test [59].....	56
Tableau IV.1 : Plages expérimentales et niveaux des variables indépendantes .....	79
Tableau IV.2 : Données expérimentales .....	79
Tableau IV.3 : Résultats de l'ANOVA pour l'hiver .....	82
Tableau IV.4 : Résultats de l'ANOVA pour l'été .....	83
Tableau IV.5 : Paramètres d'entrée pour les simulations.....	90
Tableau IV.6 : Niveaux des facteurs.....	96
Tableau IV.7 : Paramètres d'entrée pour les simulations.....	98
Tableau IV.8 : Expérience de plan d'expérience factoriel complet et valeurs de réponse.	99
Tableau IV.9 : Résultats de l'ANOVA.....	103

## Nomenclature

---

ECAS	Échangeur de chaleur air-sol
ETHE	Échangeurs de Chaleur à Tubes Géothermiques
ECAST	Échangeur de chaleur air-sol à tunnel
RH	Humidité relative
$L_{sa}$	Longueur de saturation
COP	Coefficient de Performance
FLUENT	Logiciel de Dynamique des Fluides Numériques
ANSYS-CFX®	Logiciel de Simulation de Dynamique des Fluides Numériques
DOE	Conception d'Expériences
X	Variables d'entrée
Y	Variable de sortie
PFC	Plan Factoriel Complet
CCC	Plan composite centré circonscrit
$S_i$	Écart-type des résidus
$a_i$	Effet
$\alpha$	Niveau de confiance
ddl	Degré de liberté
$t_{crit}$	Valeur critique
ANOVA	Analyse de la variance
SSD	Somme des Carrés Due
SSE	Variance expliquée par le modèle
SSR	Variance résiduelle
PRESS	Somme des Carrés des Erreurs Résiduelles Prédites
$Pre_{adeq}$	Précision Adequate
$R^2$	Coefficient de détermination R carré
$R^2_{adj}$	R carré ajusté
$R^2_{prédit}$	R carré prédi
DNS	Simulation Numérique Directe
LES	Simulation des Grandes Échelles
RANS	Modélisation Statistique des Équations de Navier-Stokes
k	Énergie cinétique turbulente
$\varepsilon$	Taux de dissipation turbulente
RNG	Théorie de la renormalisation
$\omega$	Taux de dissipation spécifique
MDF	Méthodes des différences finies
MEF	Méthodes des éléments finis
MVF	Méthodes des volumes finis
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
LSCB	Least Squares Cell-Based
RSM	Méthodologie de surface de réponse
PVC	Chlorure de polyvinyle
PEHD	Polyéthylène haute densité
HP	Cheval-vapeur
SVM	Machine à vecteurs de support
RPM	Révolutions par minute

## Nomenclature

---

$MS_{\text{residual}}$	Moyenne des carrés des résidus
SS	Somme des carrés
NPP	Graphiques de probabilité normale
MS	Moyenne carrée
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
1D	Unidimensionnel
2D	Deux dimensions

---

## Résumé

La présente thèse s'attaque aux défis énergétiques contemporains et explore des solutions novatrices pour répondre à la demande croissante en climatisation des bâtiments, en privilégiant la durabilité et l'efficacité énergétique. L'énergie géothermique est identifiée comme une alternative prometteuse, offrant une source d'énergie constante et renouvelable tout au long de l'année. L'objectif principal de cette recherche est de développer un système de climatisation basé sur des échangeurs de chaleur air-sol (ECAS), spécifiquement conçu pour les climats chauds et semi-arides. Les ECAS exploitent la température stable du sol pour préchauffer ou refroidir l'air entrant dans les bâtiments, offrant ainsi une solution économe en énergie et adaptable à divers types de constructions.

La thèse est structurée en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre examine la définition et le potentiel des ECAS, ainsi que leur application dans la climatisation résidentielle. Le deuxième chapitre explore la conception expérimentale et l'utilisation de la modélisation mathématique pour optimiser leur performance. Le troisième chapitre analyse l'utilisation du logiciel Ansys Fluent pour simuler numériquement les ECAS. Enfin, le quatrième chapitre examine l'impact de divers facteurs sur la performance des ECAS et formule des recommandations pour optimiser leur fonctionnement.

Les résultats de la recherche ont révélé des informations précieuses. L'étude 1 a permis de développer des modèles mathématiques précis pour prédire les températures des systèmes ECAS, soulignant l'importance de facteurs tels que la longueur des tuyaux et la vitesse de l'air. L'étude 2 a identifié les paramètres clés influençant l'efficacité du refroidissement des ECAS, soulignant l'importance de maintenir des vitesses d'air inférieures à 3 m/s et d'utiliser des profondeurs de tuyaux supérieures à 4 mètres pour une performance optimale.

En conclusion, cette thèse propose une solution innovante et durable pour la climatisation des bâtiments dans les climats chauds, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances dans le domaine de l'énergie renouvelable et de l'efficacité énergétique des bâtiments.

---

## Abstract

Contemporary energy challenges necessitate innovative solutions for sustainable and efficient building air conditioning, particularly in hot and semi-arid climates. This thesis explores geothermal energy as a promising alternative, leveraging its constant and renewable nature. The research aims to develop an air-ground heat exchanger (EAHE)-based air conditioning system specifically tailored for these climates.

EAHE utilize the stable ground temperature to preheat or cool incoming air, offering an energy-saving and adaptable solution. The thesis is structured into four chapters. Chapter 1 defines and analyzes the potential of EAHE, exploring their application in residential air conditioning throughout the year. Chapter 2 delves into the experimental design and mathematical modeling used to optimize their performance. Chapter 3 then examines the application of Ansys Fluent software for numerical simulation of EAHE. Finally, Chapter 4 analyzes the impact of various factors on their performance and formulates recommendations for optimal operation.

Key findings revealed the development of precise mathematical models predicting EAHE temperatures (Study 1), highlighting the importance of factors like pipe length and air velocity. Study 2 identified key parameters impacting EAHE cooling efficiency, underlining the significance of maintaining air velocities below 3 m/s and utilizing pipe depths exceeding 4 meters for optimal performance.

In conclusion, this thesis proposes an innovative and sustainable EAHE-based solution for building air conditioning in hot climates. This contributes to advancing knowledge in the field of renewable energy and building energy efficiency, offering a potentially transformative solution for addressing contemporary energy challenges.



## ملخص

تتناول هذه الرسالة التحديات الطاقية المعاصرة وتستكشف حلاً مبتكرة لتلبية الطلب المتزايد على تكييف المباني، مع التركيز على الاستدامة وكفاءة الطاقة. تم التعرف على الطاقة الجيوثيرمية كبديل واعد، حيث توفر مصدر طاقة مستمر ومتجدد على مدار العام. الهدف الرئيسي لهذا البحث هو تطوير نظام تكييف الهواء يعتمد على مبادل حراري هواء-أرض (ECAS) مصمم خصيصاً للمناخات الحارة وشبه الجافة. يستغل ECAS درجة حرارة الأرض المستقرة لتسخين أو تبريد الهواء الوارد في المباني، مما يوفر حلاً فعالاً من حيث استخدام الطاقة وقابل للتكيف مع مختلف أنواع البناء.

تتكون الرسالة من أربعة فصول رئيسية. يفحص الفصل الأول تعريف ECAS وإمكاناته، بالإضافة إلى تطبيقاته في تكييف الهواء السكني على مر الفصول. يستكشف الفصل الثاني التصميم التجريبي واستخدام التصنيع الرياضي لتحسين أدائها. يحلل الفصل الثالث استخدام برنامج Ansys Fluent للمحاكاة العددية لـ ECAS. وأخيراً، يفحص الفصل الرابع تأثير عوامل مختلفة على أداء ECAS ويصوغ توصيات لتحسين عملها.

كشفت نتائج البحث عن رؤى قيمة. أتاحت الدراسة الأولى تطوير نماذج رياضية دقيقة لتوقع درجات حرارة أنظمة ECAS، مؤكدة أهمية عوامل مثل طول الأنابيب وسرعة الهواء. حددت الدراسة الثانية المعلمات الرئيسية التي تؤثر في كفاءة تبريد ECAS، مؤكدة أهمية الحفاظ على سرعات الهواء دون 3 م/ث واستخدام أعماق الأنابيب التي تزيد عن 4 أمتار للحصول على أداء مثالي.

في الختام، تقترح هذه الرسالة حلاً مبتكراً ومستداماً لتكييف المباني في المناطق الحارة، مما يساهم في تقدم المعرفة في مجال الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في المباني.

---

## **Introduction générale**

### **Le Défi Énergétique et sa Solution :**

L'énergie est omniprésente dans la vie moderne, jouant un rôle crucial dans la croissance économique, les progrès technologiques et l'avancement social. Cependant, l'augmentation constante de la demande énergétique exige une action urgente vers la durabilité et l'efficacité. La réduction de la consommation d'énergie pour le confort intérieur devient un enjeu majeur, encourageant l'exploration d'approches passives complémentaires aux systèmes HVAC traditionnels.

### **L'Énergie Géothermique : Une Alternative Prometteuse :**

Parmi les sources d'énergie renouvelables, l'énergie géothermique se distingue par sa durabilité intrinsèque et sa disponibilité tout au long de l'année. La stabilité remarquable des températures sous la surface terrestre offre une source d'énergie thermique constante. Les applications de la géothermie sont multiples, s'étendant du chauffage et de la climatisation des bâtiments au chauffage urbain, en passant par le contrôle climatique des serres et les opérations industrielles.

### **Objectif de la Thèse :**

Le présent travail vise à développer un système de climatisation innovant pour les bâtiments, en privilégiant une faible consommation d'énergie et une adaptabilité à différentes typologies de construction. La réduction des pertes d'énergie au sein du système est un élément crucial, tout comme l'efficacité, particulièrement dans les climats chauds et semi-arides.

### **Échangeurs de Chaleur Air-Sol : Potentiel et Défi :**

Si les échangeurs de chaleur air-sol (ECAS) constituent une technique prometteuse pour le préchauffage et le refroidissement des bâtiments, leur efficacité peut s'avérer moindre dans les régions chaudes, arides et semi-arides où les climatiseurs conventionnels dominent souvent.

---

## **Relever le Défi :**

Cette recherche vise à développer un modèle ECAS performant spécifiquement conçu pour les climats chauds. L'objectif est de fournir un confort thermique dans les bâtiments tout en réduisant significativement la consommation d'énergie par rapport aux méthodes traditionnelles.

## **Structure de la Thèse :**

La thèse se penche sur les aspects clés suivants :

Chapitre 1 : Définition et présentation des échangeurs de chaleur, en se concentrant sur les ECAS, leur potentiel d'économie d'énergie et leur application dans la climatisation résidentielle. Ce chapitre passe également en revue les recherches existantes sur la performance des ECAS.

Chapitre 2 : Exploration de la conception expérimentale, en soulignant leurs avantages pour l'obtention de résultats fiables et l'amélioration de la performance du système grâce à la modélisation mathématique.

Chapitre 3 : Examen de l'utilisation du logiciel Ansys Fluent pour la simulation numérique du modèle ECAS.

Chapitre 4 : Analyse de l'impact de divers facteurs sur la performance des ECAS, en formulant des recommandations pour un fonctionnement optimal.

**CHAPITRE I**  
**ÉTUDE**  
**BIBLIOGRAPHIQUE**

# Chapitre I : Analyse Bibliographique

---

## I.1. Introduction

Les échangeurs de chaleur constituent un élément crucial dans une multitude d'applications industrielles et civiles, telles que les centrales électriques, les réseaux de chauffage urbain, les véhicules et bien d'autres. La géométrie spécifique et la fonction de ces dispositifs varient considérablement en fonction de leur utilisation prévue. Ce chapitre explore les principes fondamentaux des échangeurs de chaleur, en abordant leurs différents types, leurs caractéristiques opérationnelles et les modifications proposées dans le cadre de cette recherche.

La deuxième partie de ce chapitre se focalise sur les échangeurs de chaleur air-sol (ECAS). Leurs avantages inhérents et leurs principes de fonctionnement sont mis en lumière. De plus, une analyse critique de la littérature existante relative à l'amélioration et au développement des ECAS est fournie. Cette revue permet d'établir un contexte et de poser les bases de la recherche présentée dans les chapitres ultérieurs.

## I.2. Les échangeurs de Chaleur dans l'Industrie et l'Innovation

Les échangeurs de chaleur occupent une position fondamentale au sein du domaine de la thermodynamique et du génie des procédés. Ces dispositifs jouent un rôle central dans une multitude d'applications industrielles, en particulier pour le transfert thermique entre fluides à des températures distinctes. Leur conception et leur optimisation revêtent une importance capitale, non seulement pour accroître l'efficacité énergétique, réduire les coûts de production, mais aussi pour minimiser l'impact environnemental des processus industriels.

## I.3. Différent modes de circulation

Cette catégorisation repose sur la géométrie et l'orientation du flux dans un échangeur de chaleur fonctionnant avec deux fluides.

## I.3.1. Echangeur à courant parallèle

Dans cette configuration, les deux milieux s'écoulent dans des canaux parallèles, mais en sens contraire, induisant ainsi un écoulement contre-courant, également désigné sous l'appellation d'écoulement méthodique.

L'écoulement contre-courant (méthodique) se caractérise par les éléments suivants :

- Les deux fluides circulent dans des canaux parallèles.
- Les directions d'écoulement sont en opposition.
- Cette configuration favorise un transfert de chaleur plus efficace, car elle maintient des différences de température élevées entre les fluides le long de l'échangeur.

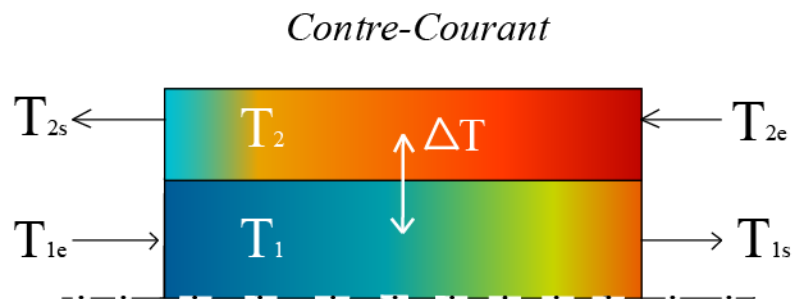


Figure I.1 : Echangeur de chaleur contre-courant.

En revanche, l'écoulement co-courant (anti-méthodique) présente les caractéristiques suivantes:

- Les deux fluides circulent également dans des canaux parallèles.
- Les directions d'écoulement sont identiques.
- Cette disposition est moins performante pour le transfert de chaleur, car les différences de température entre les fluides diminuent plus rapidement le long de l'échangeur.

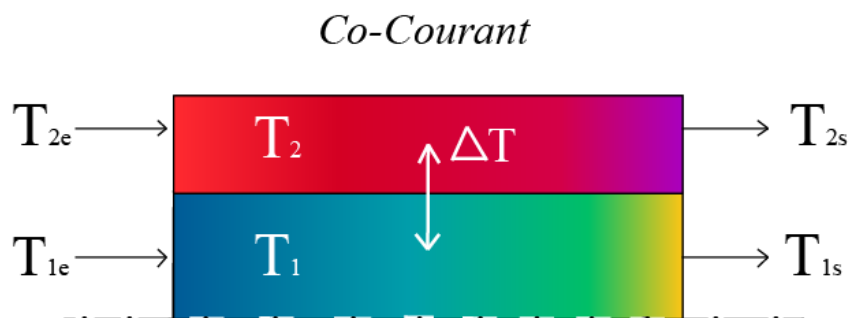


Figure I.2 : Echangeur de chaleur co-courant.

### I.3.2. Echangeur à courant croisé

Dans ce schéma, les deux fluides s'écoulent perpendiculairement les uns aux autres, et la direction de l'écoulement n'a pas d'incidence majeure sur le transfert de chaleur. Cependant, dans la plupart des cas, l'un des fluides traverse l'autre fluide plusieurs fois, c'est ce qu'on appelle des passages multiples, afin de maximiser l'efficacité du transfert thermique. Il existe deux modes de circulation pour ce type d'échangeurs :

Méthodique (à circulation courant croisé méthodique) :

- Les deux fluides pénètrent dans l'échangeur par des extrémités opposées du dispositif.
- Cette configuration favorise un transfert de chaleur efficace.

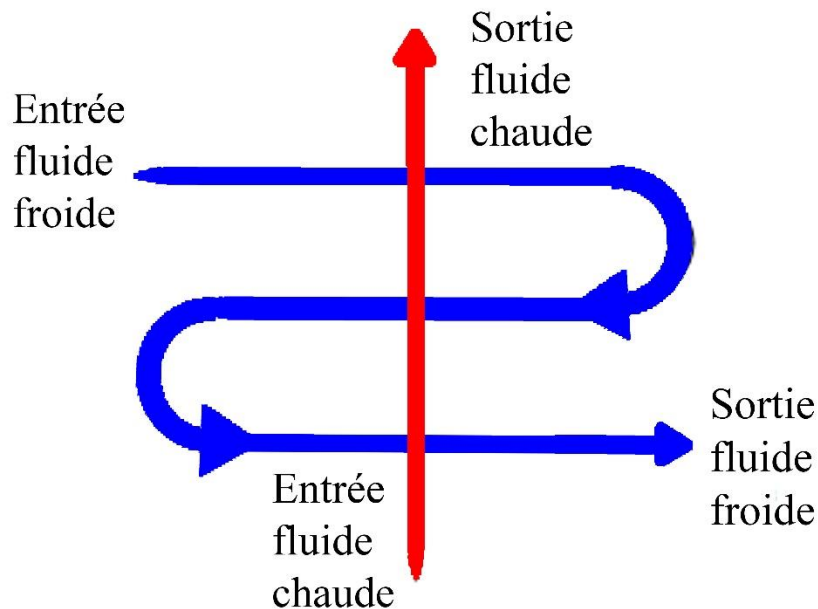


Figure I.3 : circulation courant croisé méthodique.

Anti-méthodique (circulation courant croisé anti-méthodique) :

- Dans ce cas, les deux fluides entrent par la même extrémité de l'appareil.
- Ce mode est moins fréquent, et ces échangeurs sont rarement constitués d'un seul tube.
- Généralement, on utilise un ensemble de tubes et/ou des plaques pour augmenter la performance du transfert de chaleur.

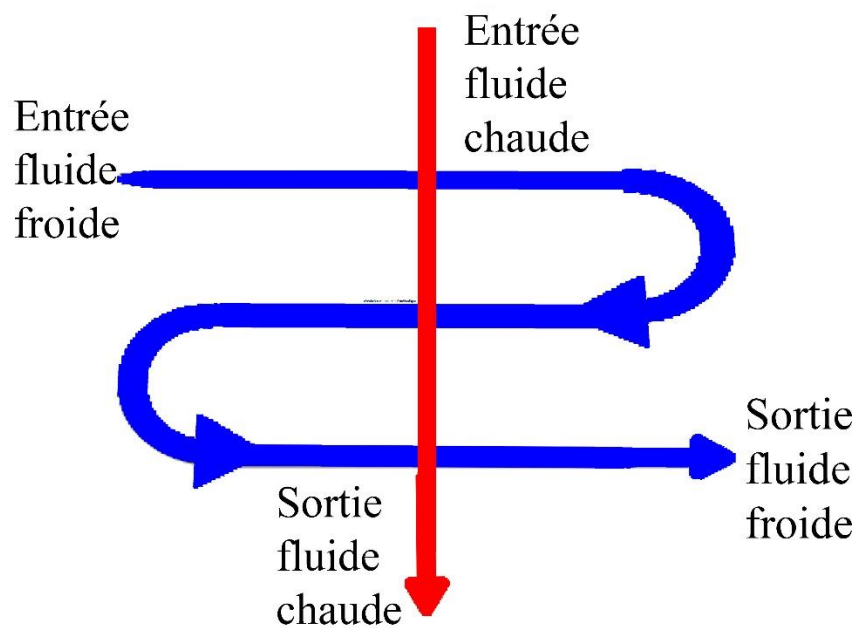


Figure I.4 : circulation courant croisé anti-méthodique.

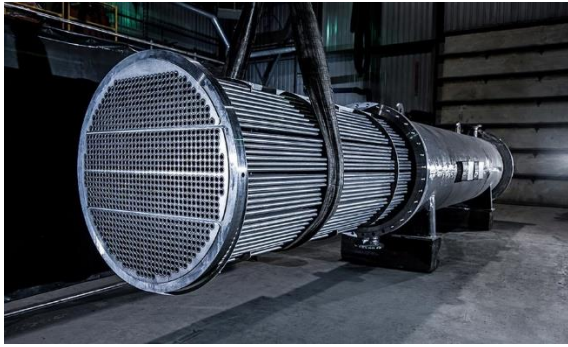
### I.4. Les échangeurs de chaleur les plus courants

Cette catégorisation repose sur la géométrie et l'orientation du flux dans un échangeur de chaleur fonctionnant avec deux fluides.

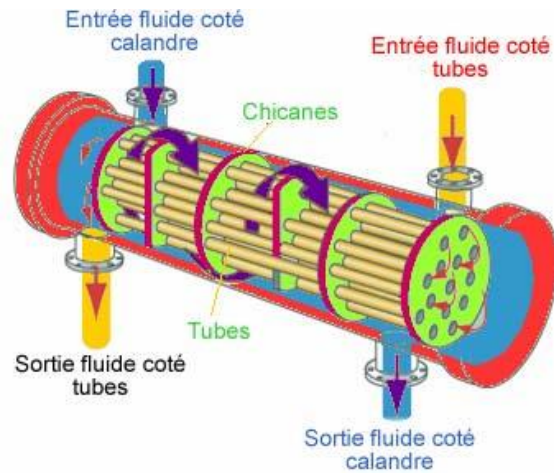
#### I.4.1. Echangeur à tubes et calandre

L'échangeur à tubes et calandre est un dispositif qui permet aux fluides de circuler à l'intérieur de tubes et à travers une structure appelée calandre. Cet échangeur peut comporter plusieurs passages pour les fluides, ce qui améliore le transfert de chaleur. La présence de chicanes, qui peuvent avoir différentes formes (circulaires, demi-circulaires, segments, disques, orifices, etc.), dans la calandre ou les tubes, contribue à perturber le flux et à favoriser un meilleur échange thermique entre les fluides.





(a) [1]



(b) [2]

Figure I.5 : Echangeur à tubes et calandre.

### I.4.2. Echangeur tubulaire

L'échangeur tubulaire est une solution simple dans l'industrie pour transférer la chaleur entre deux fluides. Il utilise au moins deux tubes, dont un transporte un fluide et l'espace annulaire entre les tubes permet à d'autres fluides de circuler. Cette conception efficace est utilisée pour diverses applications industrielles, telles que le refroidissement, le chauffage, la climatisation, et la production d'eau chaude.

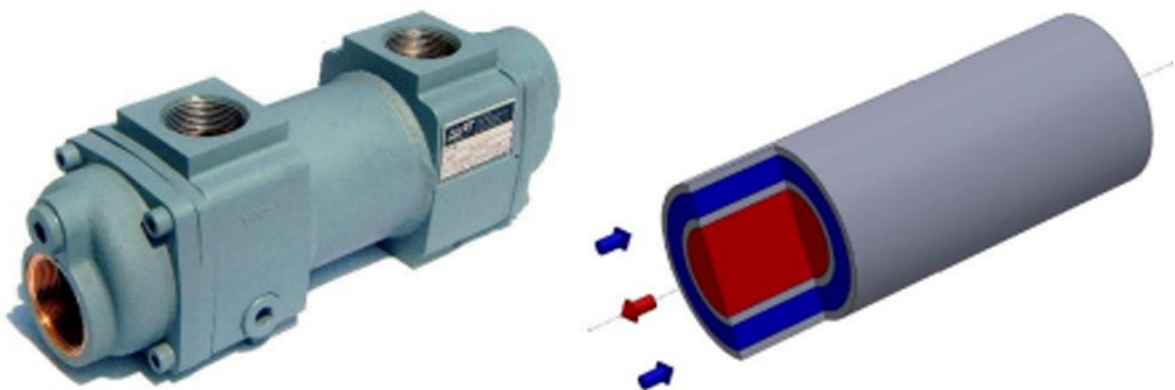
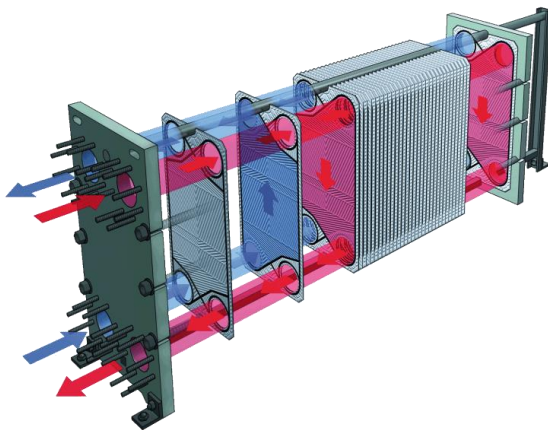


Figure I.6 : Echangeur tubulaire [3].

### I.4.3. Echangeurs à plaques et à joints

Les échangeurs à plaques et à joints se composent de multiples plaques métalliques maintenues ensemble par des joints. Les fluides s'écoulent dans l'espace entre ces plaques, et ces dernières peuvent être de surface lisse ou corruguée, favorisant ainsi la création de turbulences et augmentant la surface d'échange, ce qui renforce le transfert thermique. Une circulation en contre-courant est préférable pour maximiser l'efficacité.



(a) [4]

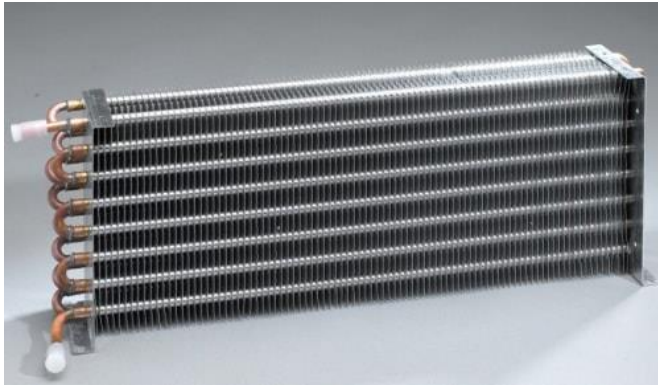


(b) [5]

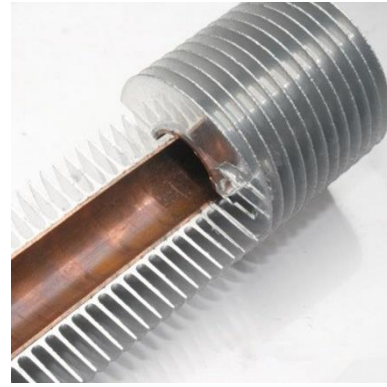
Figure I.7 : Echangeur à plaques et à joints.

### I.4.4. Echangeur tubes à ailettes

Les échangeurs de chaleur à tubes à ailettes jouent un rôle prépondérant dans le refroidissement ou le chauffage de divers fluides, que ce soit en utilisant des gaz ou en opérant en sens inverse, c'est-à-dire avec des fluides tels que l'eau, la saumure, la vapeur saturée, l'huile hydraulique, l'huile lubrifiante, l'huile thermique, ainsi que des agents réfrigérants subissant des changements de phase en se condensant ou en s'évaporant. La conception de ces échangeurs, intégrant des ailettes fixées sur la surface externe des tubes, entraîne une augmentation significative de la surface de transfert de chaleur, ce qui améliore considérablement la conduction thermique entre les fluides.



(a) [6]

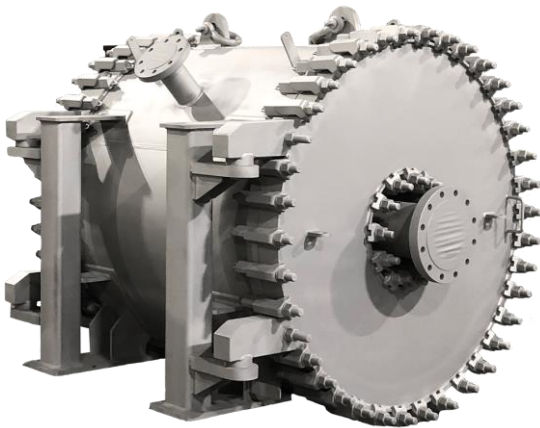


(b) [7]

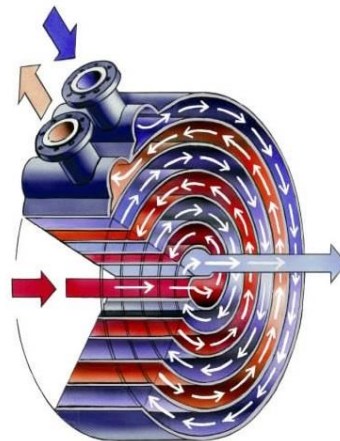
Figure I.8 : Echangeur tubes à ailettes.

### I.4.5. Echangeur spiral

L'échangeur de chaleur en forme de spirale est composé de deux canaux concentriques formés par deux plaques en métal enroulées en forme hélicoïdale. Des taquets soudés sur les plaques régulent la distance entre les canaux en prenant en compte le débit des fluides et les pertes de charge pour maximiser le transfert thermique. La conception en spirale augmente la surface d'échange de chaleur, améliorant les performances thermiques dans un espace compact.



(a) [8]



(b) [9]

Figure I.9 : Echangeur spiral.

# Chapitre I : Analyse Bibliographique

---

## I.5. Fonctionnement et Mécanismes de Transfert de Chaleur

Le transfert de chaleur est un phénomène physique qui résulte de la différence de température entre deux systèmes ou milieux. Il s'agit d'un processus spontané qui tend à égaliser les températures, entraînant un mouvement d'énergie thermique d'une région à haute température vers une région à basse température.

Les principaux mécanismes impliqués dans ce processus sont la conduction, la convection et le rayonnement.

### I.5.1. Modes de transfert

#### I.5.1.1. Conduction

La conduction thermique est un mode de transfert d'énergie thermique qui se produit sans déplacement macroscopique de matière. Elle est principalement influencée par les propriétés thermiques du matériau, telles que la conductivité thermique. Dans les échangeurs de chaleur, la conduction thermique est couramment observée dans les matériaux solides, tels que les parois des tubes ou les plaques d'échange.

#### I.5.1.2. Convection

La convection est un mode de transfert de chaleur qui implique le déplacement de matière, généralement un fluide, d'une région à une autre. Ce mode de transfert est caractérisé par le mouvement du fluide dû à des différences de densité causées par des variations de température. Dans les échangeurs de chaleur, la convection est souvent associée à des écoulements forcés ou naturels qui facilitent le transfert de chaleur entre le fluide et les surfaces d'échange.

#### I.5.1.3. Rayonnement

Le rayonnement thermique est un mode de transfert de chaleur par lequel l'énergie thermique est émise par un corps sous forme de rayonnement électromagnétique. Contrairement à la conduction et à la convection, le rayonnement peut se produire dans le vide, car il ne

## **Chapitre I : Analyse Bibliographique**

---

nécessite pas de milieu matériel pour se propager. Bien que moins dominant dans de nombreux échangeurs de chaleur, le rayonnement joue un rôle important dans les applications à haute température et à basse pression.

### **I.5.2. Facteurs Influant sur l'Efficacité**

#### **I.5.2.1. Matériaux de construction et propriétés thermiques**

Le choix des matériaux pour la construction des échangeurs de chaleur est un facteur critique, car ils déterminent la conductivité thermique, la résistance à la corrosion, la durabilité et d'autres caractéristiques essentielles de l'appareil. Par exemple, certains matériaux peuvent avoir une meilleure conductivité thermique, ce qui permet un transfert de chaleur plus efficace. D'autres peuvent être choisis pour leur résistance à des environnements chimiquement agressifs. Les propriétés thermiques des matériaux, telles que leur conductivité, capacité thermique et coefficients d'expansion thermique, ont un impact direct sur l'efficacité globale de l'échangeur.

#### **I.5.2.2. Conditions opérationnelles : température, pression, et débit**

Les conditions opérationnelles d'un échangeur de chaleur définissent le contexte dans lequel il fonctionne. Une température élevée ou une pression excessive peut affecter la performance et la durabilité de l'échangeur. Le débit, quant à lui, influence le temps de séjour du fluide dans l'échangeur, ce qui peut avoir un impact sur l'efficacité du transfert de chaleur. Il est donc crucial de comprendre et de contrôler ces paramètres opérationnels pour garantir un fonctionnement optimal de l'échangeur et maximiser son efficacité.

### **I.6. Systèmes d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS)**

L'énergie géothermique se présente comme une ressource renouvelable pratique et respectueuse de l'environnement, offrant une source constante d'énergie thermique à basse température pour le chauffage et la climatisation. Les échangeurs de chaleur à tubes géothermiques sont de plus en plus utilisés pour réduire les pertes de chaleur dues à la ventilation et améliorer le confort intérieur. Ces échangeurs de chaleur, appelés Échangeurs de

## Chapitre I : Analyse Bibliographique

Chaleur à Tubes Géothermiques (ETHE), permettent à la fois le chauffage et la climatisation en facilitant le transfert de chaleur entre l'air ambiant et les couches souterraines [10].

### I.6.1. Principe de fonctionnement d'un échangeur thermique air-sol (ECAS)

Les systèmes ECAS étaient principalement classés en tant que systèmes ECAS en boucle ouverte et systèmes ECAS en boucle fermée.

La figure I.10 illustre le fonctionnement du système échangeur de chaleur air-sol (ECAS) boucle ouverte. Pour contrôler la vitesse de l'écoulement de l'air dans ce système, un souffleur est utilisé à l'entrée. Les tuyaux enterrés, situés entre 1 et 6 mètres sous la surface, transportent l'air forcé. L'air entrant est préchauffé par le sol souterrain plus chaud pendant les saisons froides et refroidi par le sol souterrain plus chaud pendant les saisons plus chaudes. La convection et la conduction jouent un rôle dans ce processus. Ensuite, le refroidissement économe en énergie des bâtiments est effectué avec l'air conditionné.

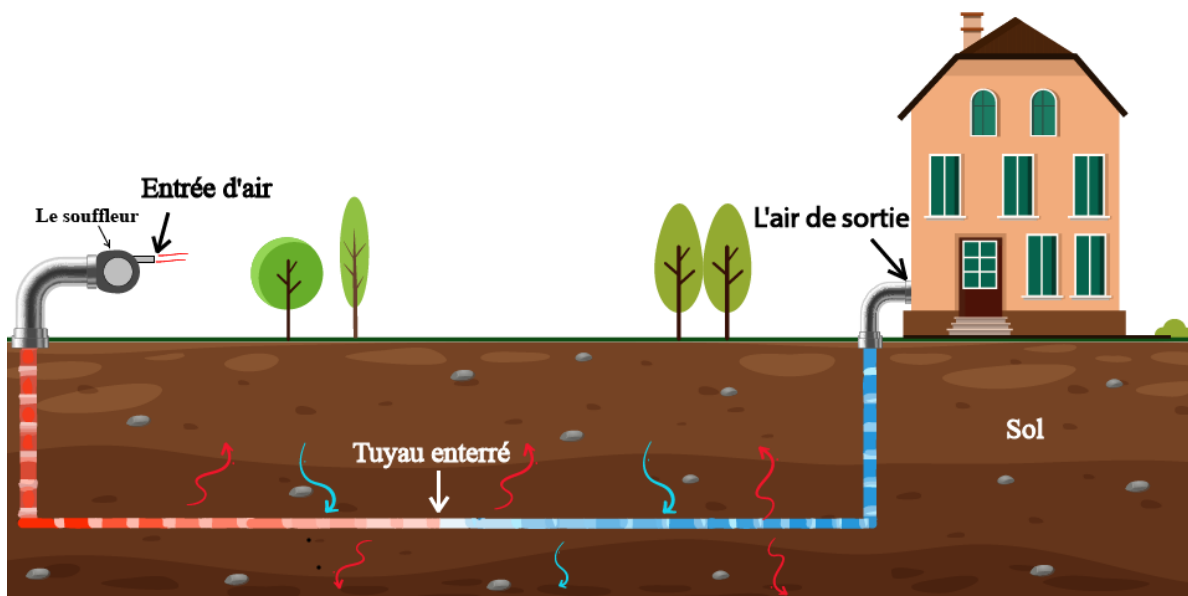


Figure I.10 : Echangeur de chaleur air-sol (ECAS) boucle ouverte.

Dans le système ECAS en boucle fermée, comme illustré à la Figure I.11, la recirculation de l'air depuis le bâtiment à travers les conduites enterrées est effectuée. Le système ECAS en boucle fermée n'est pas préféré par rapport au système ECAS en boucle ouverte car il ne satisfait pas aux besoins en air frais du bâtiment [11].

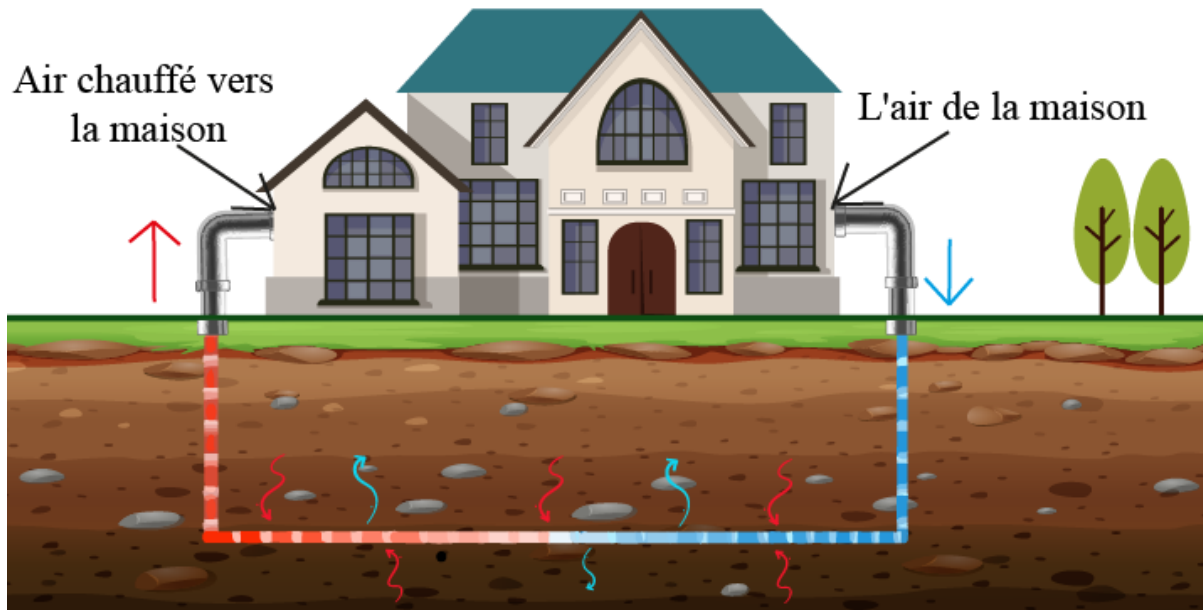


Figure I.11 : Echangeur de chaleur air-sol (ECAS) boucle fermée.

L'échangeur de chaleur air-sol se base sur la convection thermique entre l'air et la surface interne du tuyau, suivi de la conduction thermique entre les surfaces interne et externe du tuyau, et enfin, la conduction thermique entre la surface externe du tuyau et le sol environnant. Cette succession de mécanismes garantit une répartition uniforme de la chaleur dans le sol, contribuant ainsi au maintien de sa température.

### I.6.2. Diverses configurations de tuyauterie du système ECAST

Les systèmes d'échangeur de chaleur air-sol à tunnel (ECAST) offrent une variété de configurations de tuyauterie afin d'optimiser l'efficacité du transfert thermique en fonction des conditions du site et des préférences de conception.

La disposition horizontale, la plus simple, se caractérise par une seule couche de tuyaux droits, ce qui facilite l'installation. À l'inverse, la configuration serpentine maximise le contact entre l'air et le sol, augmentant ainsi le transfert thermique, mais au détriment d'une complexité accrue.

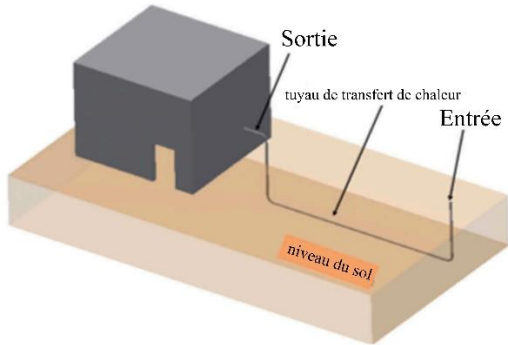
La disposition spiralée allie compacité, adaptée aux espaces restreints, à une surface d'échange thermique augmentée.

La disposition en grille garantit une distribution thermique uniforme, tandis que la configuration hélicoïdale optimise la longueur du tuyau dans un espace réduit, augmentant davantage la surface d'échange.

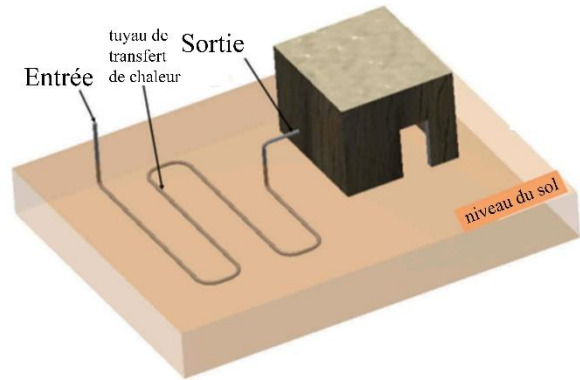
# Chapitre I : Analyse Bibliographique

Les ECASTs à plusieurs couches intègrent plusieurs niveaux de tuyauterie pour une capacité de transfert thermique renforcée.

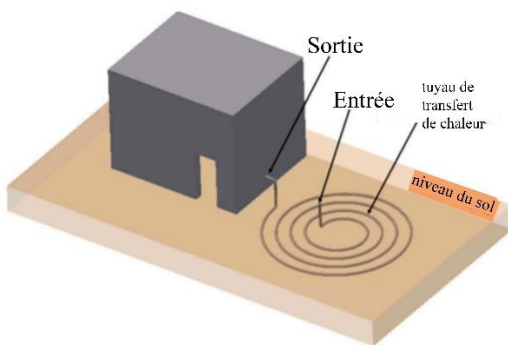
Enfin, la disposition verticale, avec des tuyaux orientés verticalement, exploite le gradient thermique vertical du sol pour un échange thermique efficace dans des espaces horizontaux limités. Chaque configuration présente des avantages spécifiques, et le choix optimal dépend des exigences précises du projet et des contraintes du site.



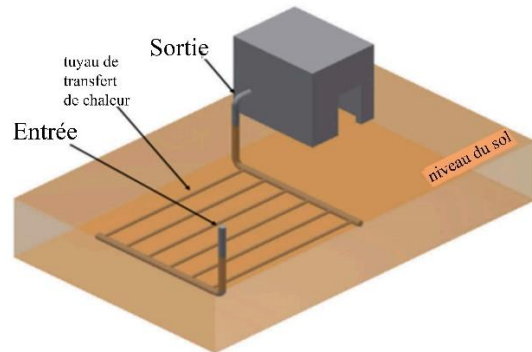
Configuration de tuyauterie droite.



Configuration de tuyauterie serpentine.



configurations de tuyauterie spiralées



Configuration de tuyauterie en grille

Figure I.12 : Différents agencements de tuyaux pour le système ECAST [13].



Figure I.13 : Conceptions d'échangeurs géothermiques verticaux [12]. (a) tube en U unique, et (b) tubes en U doubles.



## **Chapitre I : Analyse Bibliographique**

---

### **I.6.3. Avantages et inconvénients de l'échangeur de chaleur air-sol**

Les échangeurs de chaleur air-sol (ECAS) présentent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de chauffage et de refroidissement conventionnels. Leur principal atout est leur efficacité énergétique, qui repose sur l'exploitation de la température stable du sol pour fournir chauffage ou refroidissement, réduisant ainsi la dépendance aux sources conventionnelles énergivores. Cela se traduit par des économies d'énergie à long terme et des bénéfices environnementaux, en particulier une diminution de l'empreinte carbone grâce à une moindre utilisation de combustibles fossiles. De plus, les ECAS nécessitent peu d'entretien une fois installés et ont une durée de vie souvent supérieure à celle des systèmes traditionnels. Enfin, leur polyvalence permet leur intégration tant dans des bâtiments existants que nouveaux.

Cependant, les ECAS présentent également des limites. Un inconvénient majeur est le coût initial élevé d'installation, lié aux besoins en excavation et en équipement. De plus, ils nécessitent un espace suffisant pour les boucles souterraines ou les forages, qui peut ne pas être disponible dans tous les environnements. La performance des ECAS peut également varier en fonction des conditions du sol, telles que le type, la teneur en humidité et la conductivité thermique. Une conception ou un entretien inappropriés peuvent introduire des contaminants dans le système, présentant des risques pour la santé. Enfin, dans les climats extrêmes, les ECAS peuvent nécessiter un chauffage ou un refroidissement supplémentaire pour maintenir un confort optimal, annulant potentiellement leur avantage en efficacité. De plus, la conception et l'installation des ECAS requièrent une expertise spécifique pour garantir des performances et une sécurité optimales.

### **I.6.4. les paramètres influant sur l'efficacité d'échangeur thermique air-sol (ECAS)**

La performance du dispositif de refroidissement à l'aide de tuyaux enterrés est principalement déterminée par des facteurs tels que la vitesse de l'air, la longueur, le diamètre, le matériau constitutif, ainsi que la profondeur du tuyau [13].

#### **I.6.4.1. Effet des Conditions Géographiques et Climatiques**

Les conditions climatiques propres à un site sont des déterminants essentiels de la pertinence d'un système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS). En effet, l'évaluation de la

## Chapitre I : Analyse Bibliographique

---

faisabilité d'un tel système avant son déploiement repose sur l'analyse des données météorologiques locales, notamment les températures maximale, minimale et moyenne annuelle de l'air ambiant, l'humidité relative (RH) et les profils thermiques du sol non perturbé à des profondeurs dépassant 3 mètres [14]. Ces données permettent de déterminer le différentiel de température entre l'air et le sol, qui est un facteur clé du transfert de chaleur entre les deux milieux [14].

Une étude menée par Li et al. [15] a illustré ce principe en mettant en place un dispositif expérimental ECAST à Herbin, en Chine. Les résultats de cette étude ont montré que les caractéristiques géophysiques et climatiques locales exercent une influence notable sur les performances du système.

### **I.6.4.1.2. Effet des Propriétés du Sol**

Les propriétés thermophysiques du sol environnant déterminent les performances thermiques des systèmes d'échangeurs de chaleur air-sol-tunnel (ECAST). La conductivité thermique, la chaleur spécifique et la densité du sol sont des propriétés importantes qui affectent l'efficacité du système [10].

### **I.6.4.1.3. Conductivité thermique du sol**

La conductivité thermique du sol est un facteur fondamental de l'efficacité des échangeurs de chaleur géothermiques, car elle régit le transfert de chaleur dans les systèmes couplés au sol. Cette propriété est influencée par plusieurs facteurs, notamment des caractéristiques intrinsèques, telles que la densité sèche, la taille des particules, l'agencement des particules et la minéralogie [16]. Des paramètres environnementaux, tels que la température du sol, le contenu en humidité et la densité, modulent également sa conductivité thermique. Il est à noter que les sols saturés présentent généralement une conductivité thermique six à huit fois supérieure à celle des sols secs de même composition [17].

### **I.6.4.1.4. Contenu en humidité du sol**

Parmi les facteurs influençant la conductivité thermique du sol, la teneur en humidité du sol se distingue comme le plus déterminant. Les films d'eau présents dans les pores du sol

## Chapitre I : Analyse Bibliographique

---

comblent les espaces entre les particules, augmentant ainsi la surface de contact et facilitant le flux thermique. Cela entraîne une augmentation de la conductivité thermique jusqu'à ce que les vides du sol soient complètement occupés. Au-delà d'une certaine teneur en humidité, l'augmentation supplémentaire n'apporte plus d'amélioration significative, atteignant ainsi un maximum appelé le contenu en humidité critique. Il est à noter que le sable saturé d'eau présente une conductivité thermique six à huit fois supérieure à celle d'un sable saturé d'air de même composition [17].

### **I.6.4.1.5. Densité du sol**

La conductivité thermique du sol est positivement corrélée à sa densité. En effet, une densité de tassement plus élevée augmente la surface de contact entre les particules du sol, ce qui offre un chemin plus efficace pour le flux de chaleur [18]. La conductivité thermique du sol influence significativement les performances des échangeurs de chaleur air-sol (ECAS). Les sols plus denses ont généralement une conductivité thermique plus élevée, mais une diffusivité thermique moindre. Cette différence de propriétés thermiques affecte les taux de transfert de chaleur et les temps de réponse du système. De plus, la densité du sol peut influencer la résistance à l'écoulement de l'air au sein de l'échangeur, ce qui peut avoir un impact sur la distribution de l'air et l'efficacité globale du système. Une caractérisation détaillée de la densité du sol, des propriétés thermiques et de la résistance à l'écoulement de l'air est essentielle pour optimiser les performances des ECAS et garantir un échange de chaleur efficace.

### **I.6.4.2. Influence des Paramètres Thermiques et d'Écoulement de l'Air**

#### **I.6.4.2.1. Température de l'air d'entrée**

Dans les échangeurs de chaleur air-sol (ECAS), la température de l'air d'entrée exerce une influence significative sur l'efficacité opérationnelle. Le gradient thermique entre l'air entrant et l'environnement souterrain module directement l'efficacité du transfert de chaleur et la capacité intrinsèque du système à réguler thermiquement. Des températures d'air d'entrée plus basses peuvent perturber le comportement aérodynamique et accroître le potentiel de condensation d'humidité. Un contrôle précis de la température de l'air d'entrée est essentiel tant pour l'optimisation énergétique que pour améliorer l'adaptabilité du système.

## Chapitre I : Analyse Bibliographique

Niu et al. [19] ont minutieusement examiné les effets des variations de la température de l'air d'entrée sur les performances des ECAS en utilisant un modèle de volume de contrôle unidimensionnel en régime permanent. Comme le montre la figure I.14, des températures d'air d'entrée plus élevées ont entraîné une augmentation notable du taux de diminution de la température de l'air à l'intérieur du conduit ECAS. Plus précisément, pour des températures d'air d'entrée comprises entre 26 °C et 34 °C, les taux de déclin de température les plus élevés et les plus bas ont été observés à 34 °C et 26 °C, respectivement. De plus, sous un rapport d'humidité relative de 60 %, des seuils distincts de condensation ont été observés à différentes profondeurs (10 m, 11 m, 13 m, 15 m et 17,5 m) correspondant à ces températures d'air d'entrée.

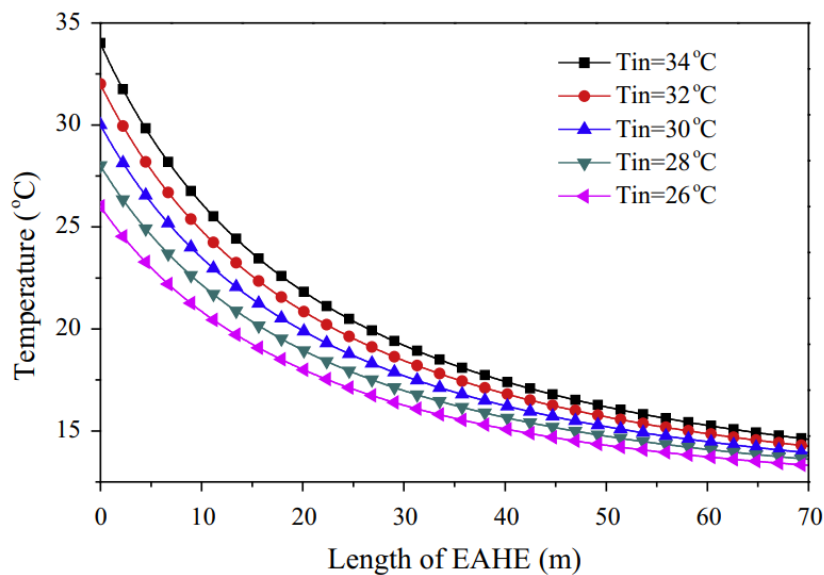


Figure I.14 : Performance des ECAS sous différentes températures de l'air d'entrée [19].

### I.6.4.2.2. Vitesse de l'air

La performance du système ECAST est fortement influencée par la vitesse de l'air circulant dans le tuyau enfoui. En effet, une augmentation de la vitesse de l'air réduit la différence de température totale entre la température d'entrée et de sortie [20]. L'air circule plus rapidement et le temps de contact avec la surface du tuyau est donc plus court.

Les travaux de Dubey et al. [21] ont confirmé cette relation en montrant qu'en augmentant la vitesse de l'air de 4,1 à 11,6 m/s, la température de l'air a diminué de 8,6 à 4,18 °C. De plus, le COP du système a diminué de 6,4 à 3,6.

### I.6.4.3. Influence des Propriétés du Tuyau sur le Système ECAST

#### I.6.4.3.1. Longueur du Tuyau

Les performances thermiques des échangeurs de chaleur air-sol (ECAS) sont complexes et variées en fonction de la longueur du tuyau. En effet, la différence de température entre l'air d'entrée et de sortie augmente considérablement à mesure que la longueur du tuyau augmente [22-23]. Cependant, ce taux de changement diminue au-delà d'un point critique appelé longueur de saturation ( $L_{sat}$ ). Cette longueur de saturation augmente avec des débits d'air plus élevés [24].

Des études ont examiné la longueur optimale du tuyau pour les ECAST s, plusieurs suggérant un bénéfice limité au-delà de longueurs spécifiques. [25] n'ont trouvé aucun avantage significatif à dépasser 70 m. De même, [26] ont identifié la longueur du tuyau comme le paramètre dominant affectant les performances thermiques, surpassant des facteurs tels que la vitesse de l'air, le diamètre, le matériau et la profondeur.

#### I.6.4.3.2. Diamètre du tuyau

Le diamètre du tuyau est un facteur crucial influençant l'efficacité des échangeurs de chaleur air-sol (ECAST). Des études empiriques ont révélé des résultats nuancés. [27] ont observé une diminution de la baisse de température de l'air de sortie avec l'augmentation du rayon du tuyau dans un système de refroidissement par tuyau terrestre. De même, [26] ont constaté que des tuyaux de plus petit diamètre (0,062 m) offraient le refroidissement le plus efficace dans un système ECAST horizontal par rapport aux options plus grandes (0,4 m).

#### I.6.4.3.3. La profondeur du tuyau

La profondeur des tubes enterrés joue un rôle crucial dans l'efficacité des échangeurs de chaleur air-sol (ECAS). Ceci est mis en évidence par les travaux de [28] qui ont évalué les performances thermiques d'un système d'échangeur de chaleur air-sol à tunnel (ECAST) en période de rafraîchissement estival. Leur étude a comparé des configurations de tubes positionnés à des profondeurs de 1,6 m et 3,2 m. La configuration la plus profonde (3,2 m) a fourni des températures d'air de sortie plus favorables (25,7°C à 30,7°C) par rapport à la configuration de 1,6 m (27,2°C à 31,7°C). Ces résultats concordent avec des recherches

## Chapitre I : Analyse Bibliographique

ultérieures mettant en évidence les variations temporelles de la température du sol [29-32]. Alors que les fluctuations diurnes affectent principalement les 0,5 m supérieurs, les variations annuelles pénètrent plus profondément, atteignant jusqu'à 4,0 m. Cela souligne l'importance de prendre en compte la profondeur lors de la conception des systèmes ECAS pour des performances thermiques optimales.

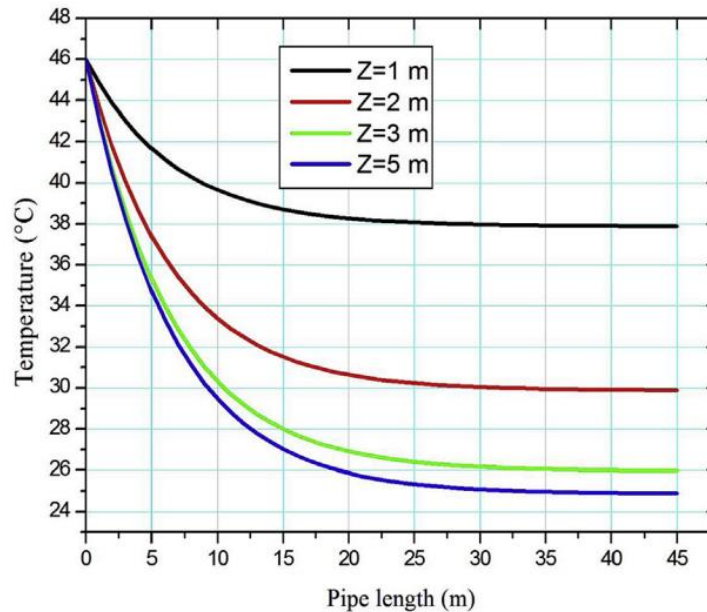


Figure I.15 : Air temperature along the tube length at different depths [33].

### I.6.4.3.4 Conductivité thermique du matériau

L'influence du matériau du tuyau sur les performances thermiques des échangeurs de chaleur air-sol (ECAS) a fait l'objet d'études approfondies à l'échelle internationale. Divers matériaux ont été examinés, notamment les plastiques, la fonte, l'aluminium, le béton et le polyéthylène. De manière générale, les résultats suggèrent que le choix du matériau a un impact marginal sur l'efficacité thermique [34-38].

## I.7. Recherche bibliographique

### I.7.1. Etudes basées sur l'approche analytique

Cette section explore les approches analytiques utilisées pour modéliser et évaluer les performances des échangeurs de chaleur air-sol (ECAS). [39] ont développé un modèle de

## Chapitre I : Analyse Bibliographique

---

convection-diffusion transitoire en 1D pour simuler la température et l'humidité de l'air. Leur étude a montré que les deux simulations présentent des différences minimales. Serageldin et al. [52] ont utilisé un modèle quasi-mathématique en 1D dans MATLAB pour étudier les conditions météorologiques égyptiennes. Ils ont ensuite utilisé la CFD pour analyser les températures de l'air et du sol. Leurs résultats ont mis en évidence l'influence de la température ambiante et de la longueur du tuyau sur les performances des ECAS. Barakat et al. [40] se sont concentrés sur les applications des ECAS pour les entrées de turbines à gaz. Ils ont développé un modèle transitoire en 1D dans MATLAB. Leurs résultats ont souligné la relation entre les dimensions du tuyau et la température de sortie, ainsi que le potentiel de réduction de la consommation de carburant avec l'utilisation des ECAS. Bisioniya et al. [41] ont adopté des méthodes analytiques, par éléments finis et CFD à travers des modèles de 1D à 3D. Leurs résultats ont démontré la polyvalence des approches pour analyser les ECAS. Rouag et al. [42] ont mis en œuvre un modèle semi-analytique en 1D pour simuler les profils de température du sol autour des systèmes ECAS. Ils se sont concentrés sur les processus de conduction thermique. Do et al. [43] ont proposé un modèle simple en 1D à l'état stable pour les ECAS en boucle fermée dans les climats chauds et humides. Ils ont mis l'accent sur les solutions analytiques et la validation par rapport aux données expérimentales. Niu et al. [44] ont utilisé la méthode du volume de contrôle transitoire pour analyser le transfert de chaleur 2D dans un système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS). Ils ont discrétisé le domaine en unités de contrôle et ont effectué des simulations à l'aide de MATLAB 8. Leur étude a révélé une corrélation directe entre la température de l'air du sol et la température de l'air de sortie, démontrant ainsi le potentiel du système pour l'échange thermique. La validité du modèle a été confirmée par rapport aux données expérimentales d'une configuration à Omaha, renforçant davantage sa capacité de refroidissement. S'appuyant sur ce travail, la référence [45] a présenté un modèle numérique 2D pour un système ECAS au Mexique, en se concentrant sur la conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement. Les simulations réalisées avec différents nombres de Reynolds ont confirmé l'efficacité du système. Par la suite, la référence [46] a introduit un modèle transitoire 2D combinant les mécanismes de transfert de chaleur par conduction et convection. Ce modèle a été validé par rapport aux données expérimentales, démontrant sa précision dans la prédiction des performances de l'ECAS.

### I.7.2. Etudes basées sur l'utilisation des logiciels de simulation

L'utilisation croissante de la dynamique des fluides numériques (CFD) dans la recherche est manifeste dans son application aux échangeurs de chaleur air-sol (ECAS). Misra et al. [47-48] ont utilisé FLUENT 6.3 pour modéliser la distribution de température autour d'un tube enterré horizontalement à l'aide d'un maillage non structuré. Ils ont examiné l'impact de la conductivité thermique du sol sur l'efficacité de l'ECAS et prédit une température constante de la paroi du tube à 300,2 K avec une vitesse d'air interne de 5 m/s. Bansal et al. [49,50] ont développé un modèle CFD transitoire et implicite validé au sein de FLUENT. Leur modèle montre une bonne concordance avec les données empiriques issues d'une configuration à Ajmer. Rosà et al. [51] ont utilisé ANSYS-CFX® pour simuler la dynamique de l'ECAS en mode chauffage et refroidissement. Ils ont découvert que des vitesses d'air plus élevées compromettent l'efficacité thermique pendant le refroidissement pour des dimensions de tube et un espacement fixés. Serageldin et al. [52] ont utilisé un modèle CFD 3D à volume fini pour aborder les équations de moment et d'énergie dans le fluide et le sol. Leur modèle validé a guidé une étude paramétrique sur l'influence des variables de conception et opérationnelles sur les températures du sol et du fluide. Agrawal et al. [53] ont étudié des facteurs clés, à savoir les dimensions du tube, la vitesse de l'air et la température de l'air d'entrée, en utilisant des analyses CFD englobant les 16 permutations de la méthode Taguchi. Ils visent à optimiser les conditions thermiques intérieures dans les climats arides. Wang et al. [54] ont cherché des formulations mathématiques centrées sur la conception pour modéliser les performances de refroidissement de l'ECAS dans les habitats bovins. Ils visent à affiner un modèle CFD pour une opération de refroidissement à long terme.

### I.7.3. Etudes basées sur l'expérimentale

Jassim et al. [55] ont étudié l'intégration des "wind catchers" dans les systèmes ECAS pour réduire la consommation énergétique en Irak aride. Ces dispositifs architecturaux, captant et dirigeant l'air, ont été évalués dans un bâtiment de deux étages. Les résultats ont montré une réduction de température de 18°C avec un agrandissement du "wind catcher", et une augmentation du COP à 5.24 avec une vitesse d'air accrue. Mohamed et al. [56] ont analysé les ECAS à Marrakech, révélant une baisse de température estivale de 19,8°C par rapport à l'hiver, confirmant l'efficacité supérieure des ECAS durant les mois chauds. Yang et al. [57] à



## Chapitre I : Analyse Bibliographique

---

Changqing, en Chine, ont constaté que la profondeur d'enfouissement impactait la température de sortie, avec une stabilisation au-delà de 7 m. Les capacités thermiques variaient en fonction du débit d'air et de la température de sortie. Vaz et al. [58] à Viamo, Brésil, ont validé des modèles d'échangeurs thermiques souterrains, soulignant leur rôle dans la réduction de la consommation énergétique conventionnelle pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

### I.8. Conclusion

Ce chapitre présente une revue exhaustive de la littérature scientifique portant sur les échangeurs de chaleur, en s'attardant plus particulièrement sur les échangeurs air-sol (ECAS). Cette revue est divisée en deux parties distinctes. La première partie offre un panorama général des échangeurs de chaleur, tandis que la seconde se focalise sur les ECAS.

Points clés issus:

- Le type d'échangeur de chaleur intégré à un système dépend de plusieurs facteurs, dont son application et son domaine d'utilisation spécifique.
- Les études consacrées aux ECAS peuvent être menées selon trois approches distinctes : analytique, numérique et expérimentale. La méthode numérique s'avère être la plus populaire en raison de son efficacité et de son rapport coût-efficacité supérieur comparé aux méthodes expérimentales.
- Concernant les performances estivales, la littérature suggère que les systèmes ECAS ouverts dotés de ventilateurs externes procurent de meilleurs résultats que les systèmes fermés.
- Les performances thermiques et dynamiques des ECAS sont influencées par une multitude de facteurs. La majorité des études se concentrent sur les caractéristiques des tuyaux (longueur, diamètre, épaisseur, matériau). D'autres recherches se sont penchées sur l'impact des formes et de la vitesse de l'air entrant dans l'échangeur.

# **Chapitre II**

## **Conception expérimentale et méthodologie de modélisation**

### II.1. Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie de la conception expérimentale en soulignant ses objectifs, ses avantages et ses terminologies clés. Il explore l'application de cette méthode dans la prédiction des réponses à l'aide d'une modélisation mathématique avancée. Ensuite, le chapitre examine les types de plans d'expériences les plus courants et leurs équations associées. Pour chaque approche de modélisation, des techniques de mise en œuvre de plans d'expériences à l'aide de simulations numériques sont présentées. Le chapitre se penche ensuite sur la planification et la conception d'expériences, en démontrant des techniques d'analyse de la variance pour maximiser l'extraction d'informations. Enfin, il examine les logiciels de conception d'expériences courants et leurs fonctionnalités pour le calcul des coefficients, la visualisation des modèles par des graphiques et des surfaces de réponse, et l'analyse des résultats par des outils tels que les tables ANOVA.

### II.2. Introduction à la méthode des plans d'expériences

La conception d'expériences (DOE) est une technique puissante pour optimiser la qualité d'un produit ou d'un processus en réduisant efficacement et efficacement la variabilité des performances autour des valeurs cibles. Elle constitue une approche robuste pour explorer, comprendre et établir des relations causales entre les paramètres du système et leurs indicateurs de performance correspondants.

Lors d'une expérience DOE, les paramètres soigneusement sélectionnés, qui sont supposés influencer les performances, sont systématiquement modifiés afin de recueillir des données qui élargissent, confirment ou affinent notre compréhension de leur impact.

Le pionnier du DOE est Sir R.A. Fisher, qui a travaillé à la station agricole de Rothamsted au début des années 1920. Antony et Kaye (2000) définissent le DOE comme une méthodologie puissante pour identifier les paramètres cruciaux d'un processus et leurs configurations optimales qui maximisent les indicateurs de performance.

Les plans d'expériences sont largement utilisés dans divers domaines scientifiques, notamment l'agronomie, la biologie, la chimie, l'électronique, le marketing, la mécanique et la physique. Elles sont utilisées pour une large gamme d'applications, allant de la recherche fondamentale à l'évaluation et la satisfaction des besoins des clients.

La compréhension de la méthode des plans d'expériences repose sur deux concepts essentiels : l'espace expérimental et la modélisation mathématique des variables d'intérêt.

### II.3. Objectifs et avantages des plans d'expériences

Les plans d'expériences (DOE) sont des méthodes statistiques utilisées pour concevoir des expériences de manière à obtenir des informations précises et fiables sur l'effet des facteurs sur une variable de réponse. Ils sont utilisés dans une grande variété de domaines, notamment la recherche, l'industrie et le contrôle de la qualité.

#### II.3.1. Objectifs

Les objectifs des plans d'expériences sont les suivants :

- Optimisation des ressources : Les DOE permettent de réaliser des expériences de manière plus efficace, en utilisant moins de ressources (temps, argent, matériel).
- Évaluation structurée : Les DOE permettent d'examiner de manière systématique l'effet des variables sur la réponse, ce qui permet d'identifier les facteurs les plus influents.
- Réduction de la variabilité : Les DOE permettent d'élaborer des expériences qui minimisent l'impact des sources d'erreur et de variabilité, ce qui conduit à des conclusions plus fiables.
- Analyse approfondie : Les DOE permettent une analyse statistique robuste pour évaluer les relations entre les variables et déduire des conclusions basées sur des preuves solides.
- Prédiction et modélisation : Les DOE permettent d'établir des modèles prédictifs qui peuvent être utilisés pour comprendre le système, faire des prévisions ou optimiser des processus.

### II.3.2. Avantages

Les plans d'expériences offrent les avantages suivants :

- Efficacité expérimentale : Les DOE permettent d'obtenir des informations riches en utilisant un nombre minimal d'expériences, économisant ainsi du temps et des ressources.
- Identification des interactions : Les interactions entre différentes variables peuvent être identifiées et étudiées, ce qui serait difficile ou impossible avec des approches expérimentales traditionnelles.
- Validation des hypothèses : Les DOE fournissent une structure pour tester des hypothèses spécifiques de manière rigoureuse, garantissant que les conclusions sont basées sur des preuves empiriques solides.
- Amélioration continue : En mettant en œuvre des plans d'expériences régulièrement, les organisations peuvent adopter une approche d'amélioration continue, optimisant constamment les processus et les produits.
- Flexibilité et adaptabilité : Les plans d'expériences peuvent être adaptés à diverses situations et domaines d'application, offrant une méthode flexible pour aborder une variété de problèmes de recherche et d'industrie.

### II.4. Termes et concepts communs des plans d'expériences

La figure II.1 illustre les éléments fondamentaux influençant les performances du processus ou du système sous investigation. Les facteurs sont des variables d'entrée ( $x$ ) qui ont un impact sur une variable de sortie (ou plusieurs) ( $y$ ) appelée réponse.

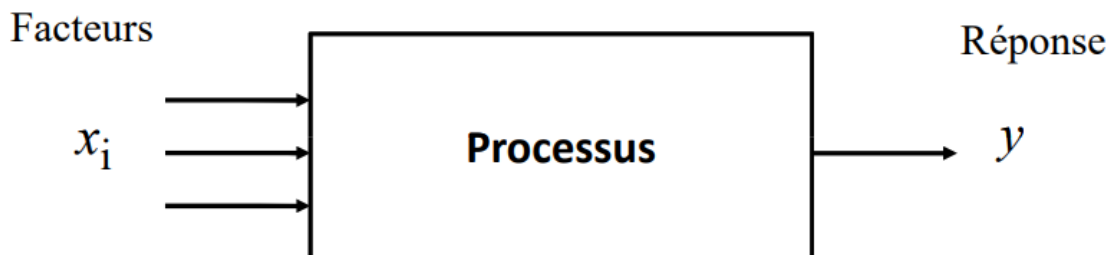


Figure II.1 : Entrées et sorties d'une expérience.

La méthodologie de la conception des expériences (DOE) vise à établir et caractériser la relation entre deux catégories distinctes de variables : la réponse et le facteur.

- Les variables de réponse représentent les quantités physiques d'intérêt dans l'étude, reflétant directement la performance ou le comportement du système.
- Les variables de facteur désignent les quantités physiques ajustables que l'expérimentateur manipule pour observer leur impact sur la réponse. On présume que les variations du facteur influencent la réponse, et la DOE vise à quantifier et comprendre ces relations.

### II.4.1. Niveaux des Variables

Les variables indépendantes, également appelées facteurs, sont les variables d'entrée qui exercent une influence sur le comportement d'un système. Chaque facteur peut prendre un ensemble de valeurs prédéfinies, appelées ses niveaux. Ces niveaux sont souvent représentés par des valeurs symboliques discrètes, telles que -1 pour un niveau bas et +1 pour un niveau élevé [59]. L'ensemble complet des valeurs possibles qu'un facteur peut prendre dans ces limites définit son domaine de variation, également appelé son domaine [60].

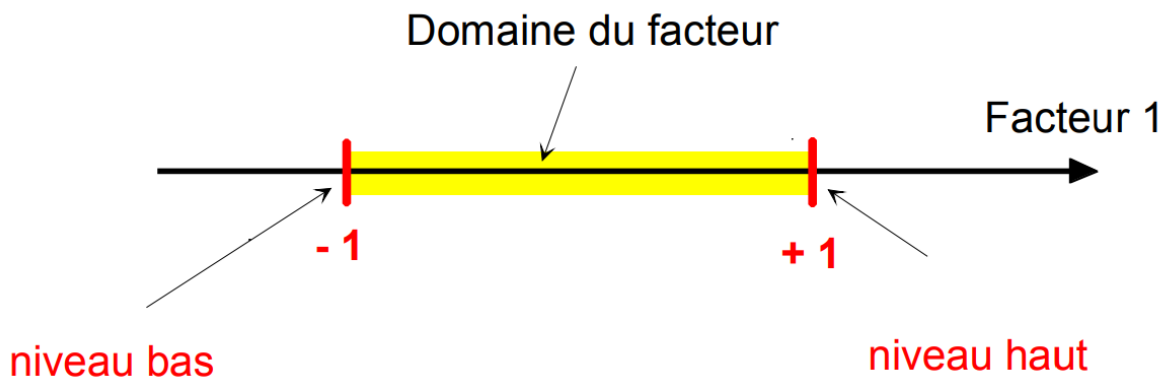


Figure II.2 : Représentation des Niveaux et du Domaine de Variation d'un Facteur [60].

### II.4.2. Répétitions

Pour améliorer la précision des estimations et réduire la variabilité, les expériences sont souvent répétées plusieurs fois pour chaque combinaison de niveaux des variables. Le

nombre de répétitions dépend de la variabilité attendue et de la puissance statistique souhaitée.

### II.4.3. Espace expérimental

L'introduction d'un second facteur exige l'utilisation d'un autre axe gradué et orienté. Analogue au premier, cet axe définit le niveau élevé du facteur, son niveau bas, et son domaine de variation. De manière cruciale, le second axe est positionné orthogonalement au premier, formant ainsi un système de coordonnées cartésiennes. Ce système définit l'espace expérimental, un espace euclidien à deux dimensions.

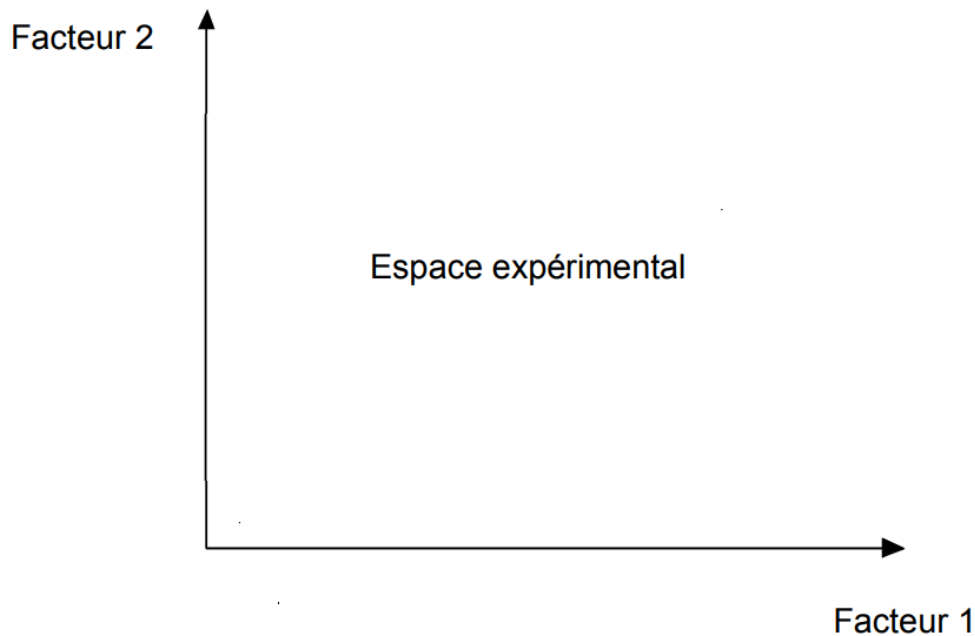


Figure II.3 : Représentation des facteurs dans l'espace expérimental [60].

### II.4.5. Points expérimentaux

Le niveau  $x_1$  du facteur 1 et le niveau  $x_2$  du facteur 2 peuvent être représentés comme les coordonnées d'un point dans l'espace expérimental (Figure II.4). [60]. Cela établit une correspondance unique entre des expériences spécifiques et des points au sein du système d'axes établi. Par conséquent, il est courant de désigner une expérience comme un "point expérimental", "point d'expérience", ou simplement "point". En conséquence, un plan

d'expériences se présente comme une collection de ces points expérimentaux, tous situés à l'intérieur de l'espace expérimental défini [60].

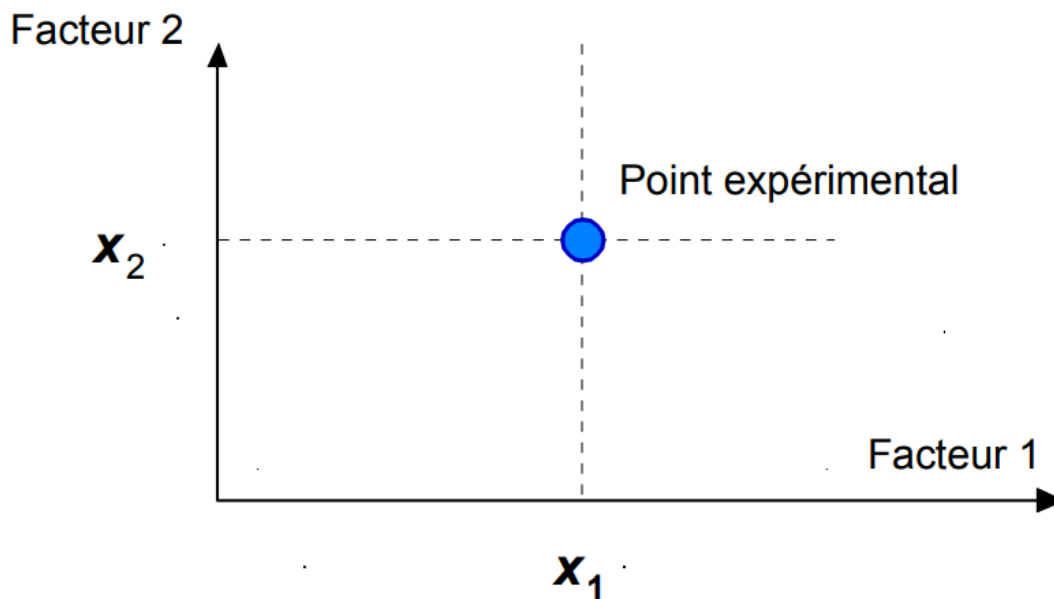


Figure II.4 : Représentation de Point dans l'Espace Expérimental [60].

### II.4.6. Domaine d'étude

Définition du Domaine d'Étude : Le concept de "domaine d'étude" découle de l'agrégation des domaines pertinents des facteurs, représentant la région spécifique à l'intérieur de l'espace expérimental choisie pour l'investigation. Ce domaine englobe la gamme de valeurs pour chaque facteur considéré comme pertinent pour l'étude. Les expérimentations individuelles, utilisant chacune une configuration bien définie de valeurs des facteurs, peuvent être visualisées comme des points répartis à travers le domaine d'étude (Figure II.5).



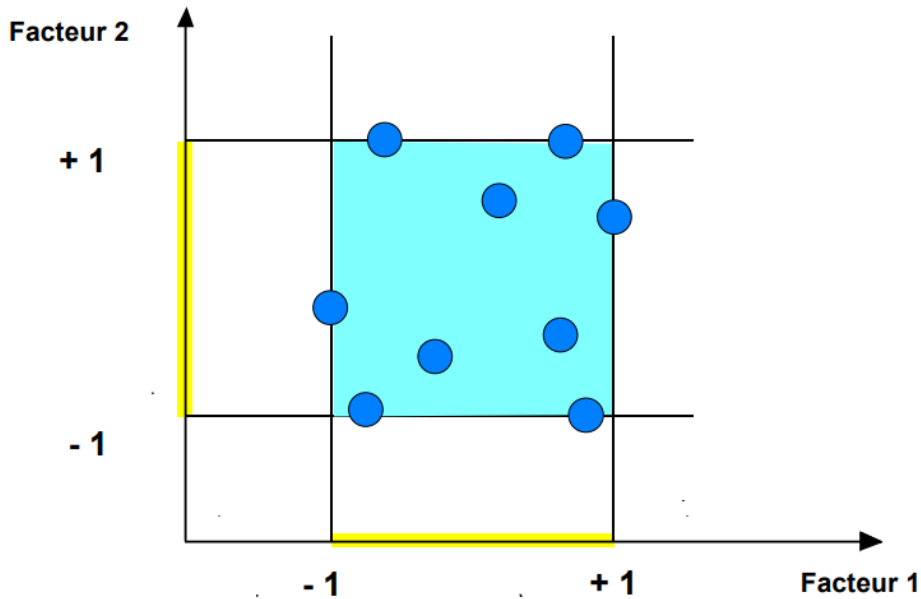


Figure II.5 : Le domaine d'étude est défini par la réunion des domaines des différents facteurs (ici, il n'y a pas de contraintes) [60].

Le domaine d'étude peut ne pas englober toutes les combinaisons possibles de valeurs de facteurs en raison de contraintes prédéfinies. La figure II.6 illustre un tel scénario, où le domaine d'étude initial est délimité, ce qui donne un sous-domaine réduit accessible aux expériences réalisées. Il est important de noter qu'une partie du domaine original reste inexplorée.

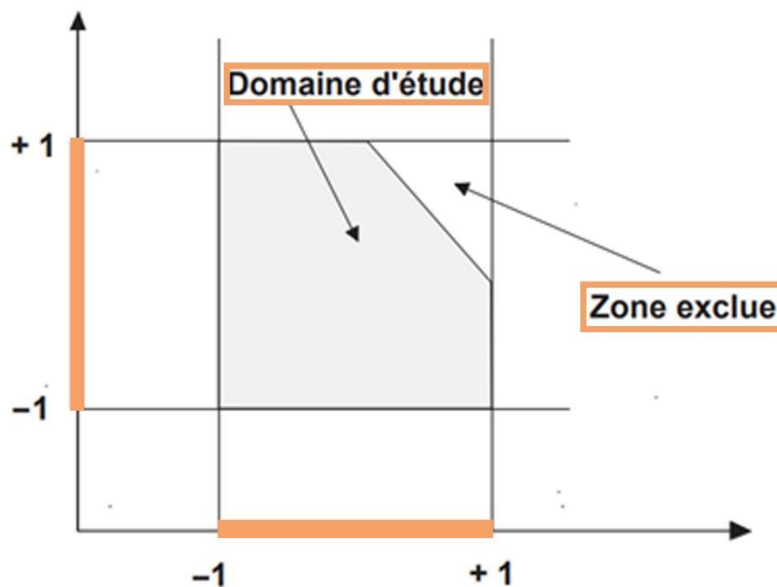


Figure II.6 : Le domaine d'étude sous contraintes est représenté par la partie grisée.

### II.5. Modélisation mathématique a priori de la réponse

La modélisation mathématique est un composant essentiel de la conception d'expériences (DOE, Design of Experiments en anglais). Elle joue un rôle crucial dans la planification, la réalisation, et l'interprétation des expériences. Voici une explication approfondie des notions de modélisation mathématique et de modélisation expérimentale dans le contexte du DOE :

#### II.5.1. Modélisation mathématique

Cette approche suppose qu'une fonction mathématique prédéfinie, généralement un polynôme, lie la variable de réponse ( $y$ ) aux niveaux des facteurs ( $x_i$ ). Pour estimer les coefficients inconnus de ce modèle, une expansion en série de Taylor-MacLaurin est réalisée, en négligeant les termes d'ordre supérieur sous l'hypothèse de dérivées constantes. Cela conduit à une approximation polynomiale de la surface de réponse.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \dots \quad (\text{II.1})$$

Dans ce cadre :

- $y$  désigne la variable de réponse mesurée, acquise avec une précision spécifiée lors d'expériences contrôlées.
- $x_i$  représente le niveau prédéfini attribué au facteur  $i$  pour un essai spécifique, supposé être connu sans erreur, conformément à l'hypothèse classique de la régression qui postule l'absence d'erreur de mesure.
- $a_0$ ,  $a_i$ ,  $a_{ij}$ ,  $a_{ii}$  sont les coefficients inconnus du modèle polynomial prédéterminé, estimés à partir des données expérimentales.

Ce modèle est appelé "modèle postulé" ou "modèle a priori".

#### II.5.2. Modélisation expérimentale

Cette section détaille deux ajouts cruciaux au modèle précédemment décrit. Premièrement, nous introduisons le concept de manque d'ajustement. Ce terme reconnaît la divergence inhérente entre le modèle a priori, basé sur nos hypothèses initiales, et le véritable modèle sous-jacent qui régit le phénomène observé. En d'autres termes, il existe un écart

systematique entre les prédictions du modèle et les données réelles. Cette divergence est quantifiée comme le "manque d'ajustement".

Deuxièmement, nous identifions la randomicité intrinsèque des réponses. Des mesures répétées au même point expérimental donnent souvent des résultats légèrement différents, présentant un certain degré de variabilité. Ces variations observées sont attribuées à l'erreur expérimentale, découlant d'incertitudes dans le processus de mesure ou de la stochasticité inhérente au système.

Ces deux divergences, le manque d'ajustement et l'erreur expérimentale, sont souvent combinées en un seul terme, représenté par  $\varepsilon$ . Par conséquent, le modèle final employé par l'expérimentateur peut être exprimé comme :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (\text{II.2})$$

### II.6. Système d'équations

Une valeur de réponse unique est fournie par chaque point expérimental, qui est ensuite modélisée à l'aide d'une fonction polynomiale. Les coefficients de ce polynôme sont les inconnues à déterminer lors du processus d'ajustement. À l'issue de la conception expérimentale, un système d'équations est généré, englobant les  $n$  essais et leurs réponses correspondantes sous forme de  $n$  équations, tandis que les  $p$  coefficients du modèle pré-sélectionné constituent  $p$  inconnues. Ce système peut être succinctement exprimé en notation matricielle :

$$y = Xa + \varepsilon \quad (\text{II.3})$$

Où :

- $y$  représente le vecteur des réponses.
- $X$  est la matrice des coefficients ou matrice du modèle, déterminée par les points expérimentaux sélectionnés pour la mise en œuvre du plan et le modèle envisagé.
- $a$  désigne le vecteur des coefficients.
- $\varepsilon$  est le vecteur des résidus.

Le système d'équations formé lors de la modélisation des données expérimentales est souvent surdéterminé, c'est-à-dire qu'il y a plus d'équations que d'inconnues. En règle générale, il existe  $n$  équations inconnues et  $p+n$ , où  $n$  est le nombre d'observations et  $p$  le nombre de paramètres ou coefficients à évaluer.

## Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation

---

On procède à l'estimation de ces coefficients en utilisant la technique des moindres carrés. La somme des carrés des résidus, qui sont les différences entre les valeurs observées et prédites, est réduite avec cette méthode.

Formule de la Régression :

La formule que vous avez mentionnée pour estimer les coefficients est :

$$\hat{a} = (X'X)^{-1} X'y \quad (\text{II.4})$$

Où :

- $X'$  est la matrice transposée de  $X$ .
- $(X'X)^{-1}$  est l'inverse de la matrice produit  $X'X$ .
- $y$  est le vecteur des réponses observées.
- $\hat{a}$  est le vecteur des estimations des coefficients.

### II.6.1. Matrices Clés

Deux matrices sont essentielles dans la théorie des plans d'expériences et la régression :

- **La matrice d'information  $X'X$**  : Elle donne des informations sur l'importance relative des différents facteurs et sur la multicollinéarité éventuelle entre eux.
- **La matrice de dispersion  $(X'X)^{-1}$**  : C'est l'inverse de la matrice d'information. Elle est utilisée pour estimer la variance des coefficients et pour effectuer des tests d'hypothèses sur ces coefficients.

### II.7. Types de Plans Expérimentaux

Les plans d'expériences sont des outils essentiels pour la conception et l'analyse des études expérimentales. Parmi les différents types de plans expérimentaux, on distingue :

#### II.7.1. Plan Factoriel Complet (PFC)

Les plans factoriels permettent l'investigation simultanée de plusieurs facteurs quantitatifs et/ou qualitatifs influençant une variable réponse. Leur objectif principal est

d'identifier les effets principaux significatifs et d'explorer les interactions potentielles, selon le design spécifique utilisé. Bien que les facteurs quantitatifs permettent des prédictions, le choix des modèles prédictifs peut être restreint par certains designs. Par exemple, les plans à deux niveaux limitent la relation entre la réponse et les facteurs à la linéarité, ce qui peut ne pas refléter avec précision les scénarios réels.

### II.7.1.1 Plans factoriels complets à deux niveaux

Pour deux facteurs, le domaine d'étude est représenté sous la forme d'un carré. La Figure II.7 illustre un plan factoriel complet à deux facteurs. Le modèle mathématique envisagé est un modèle linéaire par rapport à chaque facteur :

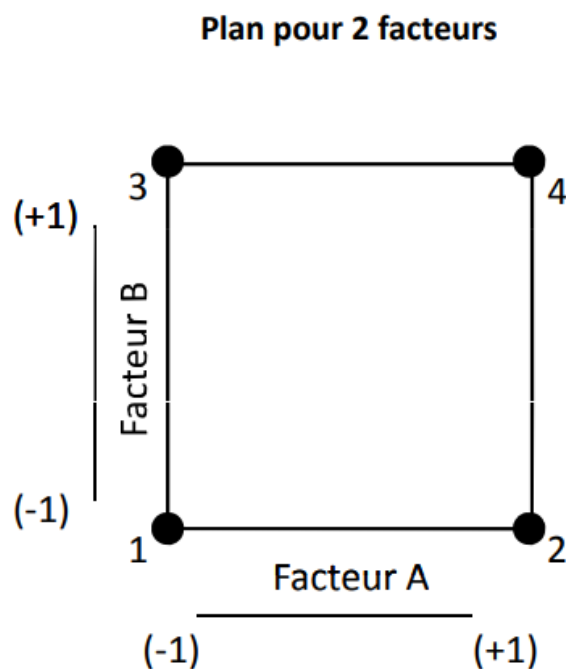


Figure II.7 : Plans factoriels complets  $2^2$  [61].

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (\text{II.5})$$

- $y$  est la réponse
- $x_i$  représente le niveau attribué au facteur  $i$ .
- $a_0$  est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude.
- $a_1$  est l'effet (ou effet principal) du facteur 1.

- $a_2$  est l'effet (ou effet principal) du facteur 2.
- $a_{12}$  est l'interaction entre les facteurs 1 et 2.
- $\varepsilon$  est l'écart.

Pour trois facteurs, le domaine d'étude s'étend dans trois dimensions, formant un cube plutôt qu'un simple carré. La Figure II.8, bien que mentionnée comme représentant un plan factoriel complet à deux facteurs, ne serait pas pertinente pour illustrer le plan à trois facteurs. Toutefois, pour un plan à trois facteurs, une représentation tridimensionnelle serait nécessaire pour visualiser les interactions entre les trois variables.

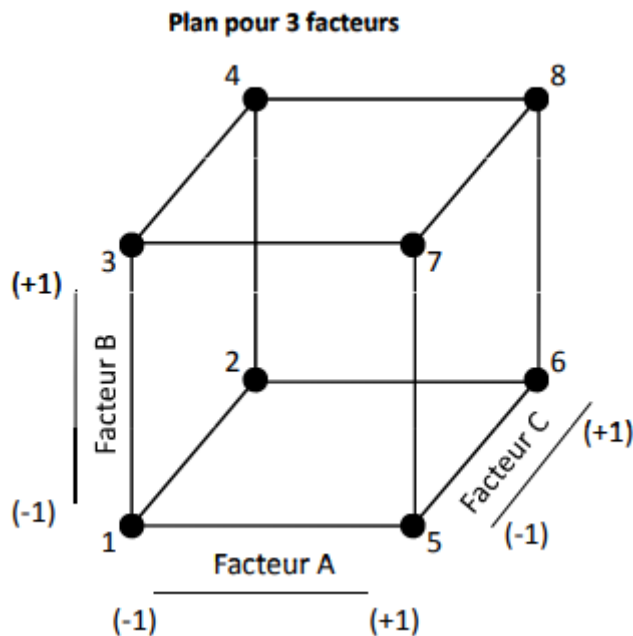


Figure II.8 : Plans factoriels complets et  $2^3$ .

Le modèle mathématique pour un plan factoriel complet à trois facteurs serait structuré de manière similaire à celui des plans à deux facteurs, mais avec des termes supplémentaires pour tenir compte des interactions entre trois facteurs simultanément. Le modèle linéaire pour trois facteurs pourrait s'exprimer mathématiquement comme :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 + \varepsilon \quad (\text{II.6})$$

## Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation

Où  $y$  est la réponse,  $a_0$  est l'effet moyen,  $a_1, a_2, a_3$  sont les effets principaux,  $a_{12}, a_{13}, a_{23}$  représentent les interactions entre deux facteurs, et  $a_{123}$  capturent les interactions triples entre les trois facteurs.

Pour  $k$  facteurs dans un plan factoriel complet, le modèle mathématique peut être formulé comme suit :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i < j < \dots < k} \dots \sum_{i < j < \dots < k} a_{ij \dots k} x_i x_j \dots x_k + \varepsilon \quad (\text{II.7})$$

### II.7.1.1.1. Matrice d'expériences

La matrice d'expériences représente les combinaisons des niveaux (+1 et -1) pour chaque facteur. Par exemple, avec 2 facteurs, on a 4 essais, et pour  $k$  facteurs, un plan est désigné comme  $2^k$ , nécessitant  $2^k$  essais, ce qui peut rapidement devenir volumineux, comme 128 essais pour 7 facteurs. Pour réduire le nombre d'essais tout en étudiant tous les facteurs, on utilise des plans factoriels fractionnaires à deux niveaux.

L'algorithme de Yates est spécialement conçu pour construire des plans d'expériences, en particulier pour les plans factoriels. Les plans factoriels complets  $2^2$  (pour deux facteurs) et  $2^3$  (pour trois facteurs) sont parmi les plans les plus couramment utilisés.

Voici comment construire manuellement les matrices d'expériences pour ces plans en utilisant l'algorithme de Yates :

Tableau II.1 : Matrices d'expériences pour les plans factoriels complets  $2^2$ .

exp	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1

Tableau II.2 : Matrices d'expériences pour les plans factoriels complets  $2^3$ .

Exp	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

### II.7.1.1.2. Effets globaux et effets moyens

L'effet d'un facteur dans un plan expérimental évalue comment une variation ou un changement dans ce facteur influence la réponse observée. Pour quantifier cet effet, on observe généralement comment la réponse  $y$  évolue lorsque le facteur "X" est modifié.

L'Effet Global:

La différence entre la réponse  $y$  pour les deux niveaux du facteur est appelée "effet global". Mathématiquement, cela peut être exprimé comme :

$$Effect_{global} = y_2 - y_1 \quad (II.8)$$

Effet Moyen :

Parfois, pour des raisons d'interprétation ou de mise à l'échelle, on utilise l'effet moyen plutôt que l'effet global. L'effet moyen est simplement la moitié de l'effet global et est calculé comme suit :

$$Effect_{Moyen} = \frac{y_2 - y_1}{2} \quad (II.9)$$



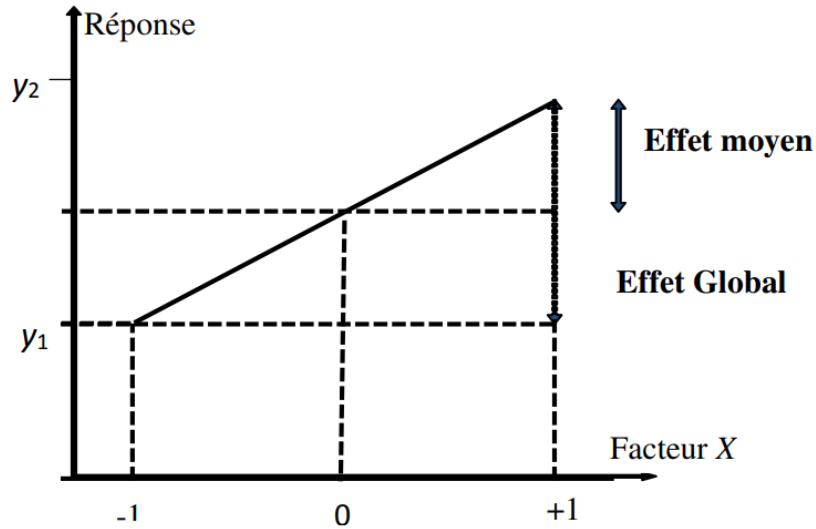
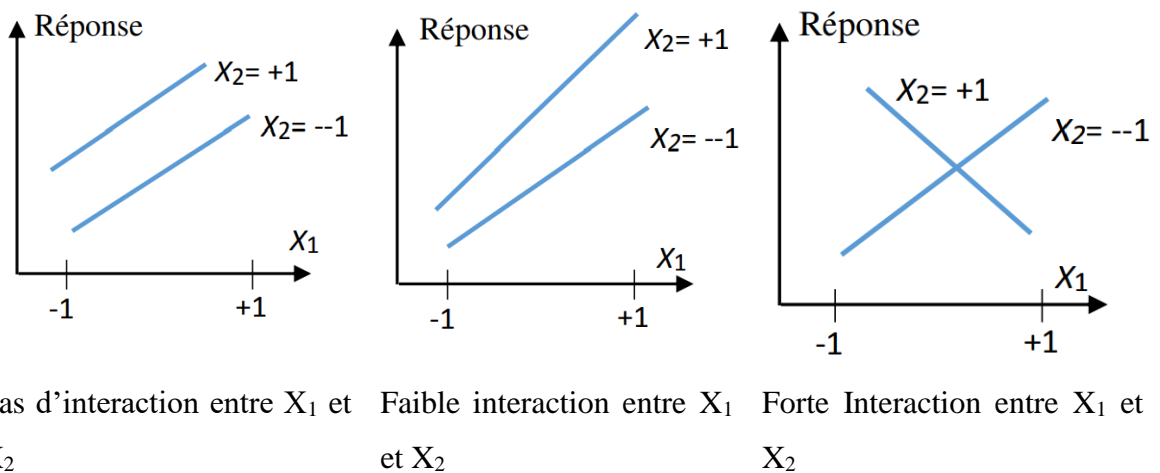


Figure II.9 : Définition de l'effet global et de l'effet moyen.

### II.7.1.1.3. Effets d'interaction

Une interaction entre deux facteurs,  $X_1$  et  $X_2$ , est présente lorsque l'effet de  $X_1$  sur la réponse varie en fonction du niveau de  $X_2$ , ou vice versa. En l'absence d'interaction, les courbes illustrant les effets d'un facteur  $X_i$  aux divers niveaux du facteur  $X_j$  restent parallèles [60].



Pas d'interaction entre  $X_1$  et  $X_2$       Faible interaction entre  $X_1$  et  $X_2$       Forte Interaction entre  $X_1$  et  $X_2$

Figure II.10 : Analyse des interactions entre les facteurs  $X_1$  et  $X_2$ .

### II.7.1.1.4. Avantages du Plan Factoriel Complet à 2 Niveaux

- Évalue les effets principaux des facteurs ainsi que leurs interactions à deux niveaux.
- Facile à mettre en œuvre et à interpréter.
- Peut être utilisé pour identifier rapidement les facteurs les plus influents.

### II.7.1.1.5. Inconvénients du Plan Factoriel Complet à 2 Niveaux

- Limité à l'étude des effets à deux niveaux, ce qui peut ne pas refléter toutes les nuances d'une étude complexe.
- Ne capture pas les interactions à des niveaux supérieurs, qui peuvent être essentielles dans certains contextes.
- Peut nécessiter des analyses complémentaires pour des modèles plus complexes ou des effets non linéaires.

### II.7.1.2. Plans factoriels fractionnaires a deux niveaux $2^{k-q}$

Les plans factoriels fractionnaires sont des plans d'expériences qui, par rapport aux plans factoriels complets, permettent d'étudier l'impact de tous les facteurs en réduisant le nombre d'expériences nécessaires. Un plan fractionnaire, par exemple, peut nécessiter deux fois moins d'expériences que son équivalent complet.

En fin de compte, un système d'équations composé de  $n$  avec  $p$  coefficients inconnus, où  $p$  est supérieur à  $n$ . Il est rare de résoudre directement ce système.

Étant donné que le nombre d'équations ne peut pas être augmenté, la stratégie consiste à réduire le nombre d'inconnues. Les coefficients sont structurés de manière à obtenir  $n$  inconnues exactes pour effectuer cette réduction.

Par conséquent, on considère que le système est constitué de  $n$  équations liées à  $n$  ensembles de coefficients. Les contrastes sont des ensembles de coefficients qui indiquent qu'ils sont liés ou aliénés.

En général, un plan factoriel fractionnaire est défini par  $N = 2^{k-p}$  :

- N est le nombre d'essais.
- k représente les facteurs examinés.
- p indique le niveau de fraction, par exemple, 1 pour 1/2.

Ainsi,  $2^{4-1}$  signifie huit essais pour quatre facteurs. Ces plans permettent d'inclure de nombreux facteurs avec moins d'essais, mais certaines interactions peuvent être confondues. Ils sont souvent utilisés pour identifier les facteurs dominants sans nécessairement étudier toutes les interactions.

### II.7.1.2.1. Application au plan factoriel fractionnaire $2^{3-1}$

Pour analyser trois facteurs en seulement quatre essais, nous avons utilisé une matrice orthogonale d'Hadamard. Cette matrice permet de combiner les effets des facteurs de manière à obtenir des essais qui sont orthogonaux les uns aux autres. La répartition des quatre points sélectionnés est illustrée dans la Figure II.11.

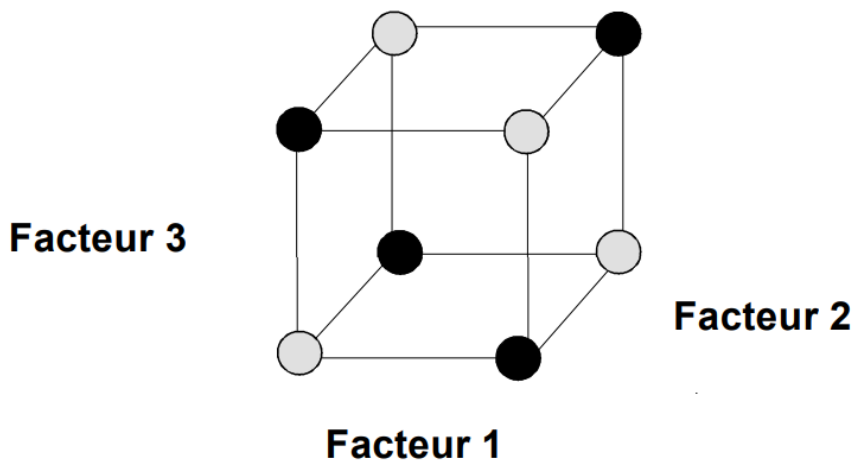


Figure II.11 : Un plan factoriel complet  $2^3$  peut être divisé en deux plans factoriels fractionnaires  $2^{3-1}$ , un plan noir et un plan gris [61].

Le modèle mathématique pour la réponse d'un plan factoriel à trois facteurs est décrit par huit coefficients, noté comme équation 2.

En réalisant quatre essais, on se retrouve avec un système composé de quatre équations ayant 8 inconnues :

$$y = Xa \quad (\text{II.10})$$

La résolution du système (II.10) est problématique, car avec seulement quatre essais, nous ne pouvons déterminer que quatre inconnues. Nous optons donc pour le modèle 2, noté par l'équation suivante :

$$y = l_0 + l_1x_1 + l_2x_2 + l_3x_3 \quad (\text{II.11})$$

Avec

$$l_0 = a_0 + a_{123} \quad (\text{II.12})$$

$$l_1 = a_1 + a_{23}$$

$$l_2 = a_2 + a_{13}$$

$$l_3 = a_3 + a_{12}$$

La détermination des contrastes " $l_i$ " une tâche relativement simple. En revanche, l'interprétation de ces contrastes afin de retrouver les coefficients associés est un défi plus complexe.

### II.7.1.2.2. Les Avantages des Plans Factoriels Fractionnaires à Deux Niveaux $2^{k-q}$

- **Économie d'essais** : Réduit le nombre d'expériences nécessaires.
- **Étude de plusieurs facteurs** : Permet d'examiner de nombreux facteurs simultanément.
- **Identification rapide** : Aide à cerner rapidement les facteurs influents.

### II.7.1.2.3. Inconvénients des Plans Factoriels Fractionnaires à Deux Niveaux $2^{k-q}$

- **Confusions d'effets** : Peut mélanger certains impacts.
- **Interprétation complexe** : Nécessite une expertise pour une interprétation claire.
- **Limitation des interactions** : Ne capture pas toutes les interactions potentielles.

### II.7.1.3. Autre plan à deux niveaux

#### II.7.1.3.1. Les plans de Koshal

Les plans de Koshal sont des plans d'expériences qui permettent d'étudier l'effet principal des facteurs, sans prendre en compte les interactions entre facteurs. L'équation (II.13) présente le modèle mathématique des plans de Koshal.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \varepsilon \quad (\text{II.13})$$

La Figure II.12 montre un plan de Koshal pour 3 facteurs.

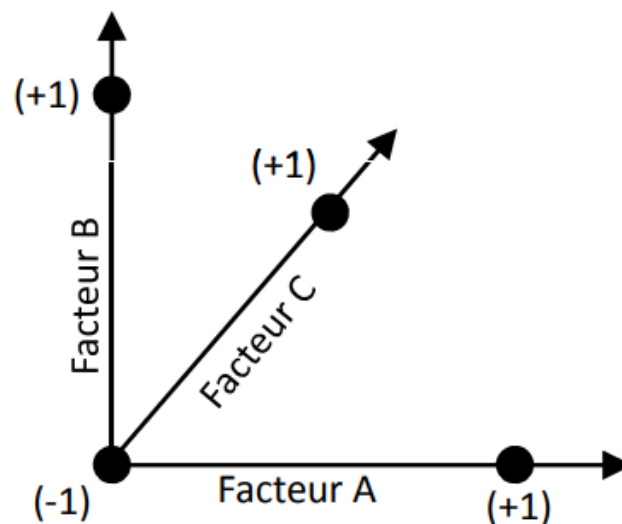


Figure II.12 : Plan de Koshal pour trois facteurs [61].

#### II.7.1.3.2. Avantages des plans de Koshal

- Simplicité et facilité d'interprétation des effets principaux.
- Réduction du nombre d'expériences nécessaires pour évaluer les effets principaux de plusieurs facteurs.

### II.7.1.3.3. Inconvénients des plans de Koshal

- Ne permettent pas d'étudier les interactions entre les facteurs.
- Peuvent manquer des informations cruciales sur les relations complexes entre les variables.

### II.7.1.3.4. Les plans de Rechtschaffner

Les plans de Rechtschaffner sont des conceptions de plans factoriels fractionnaires épurés qui permettent d'élucider les effets principaux des facteurs et les interactions d'ordre deux. Avant même l'expérimentation, les interactions d'ordre supérieur sont supposées négligeables. En conséquence, le modèle mathématique sélectionné à l'entame de cette étude se présente comme suit :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (\text{II.14})$$

## II.8. Les Plans pour surfaces de réponse

Les plans de second ordre, également appelés plans pour surfaces de réponse [62], sont une technique de modélisation expérimentale qui permet d'explorer l'espace du processus, d'établir une relation d'approximation pertinente entre le rendement et les variables du processus, et de déterminer les configurations optimales des variables du processus conduisant à des réponses optimales.

Le modèle polynomial de second ordre est formulé par l'équation (II.15)

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum_{i < j}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (\text{II.15})$$

Où  $Y$  est la réponse prévue,  $a_0$  est le coefficient constant du modèle,  $a_i$  est le  $i^{\text{eme}}$  coefficient linéaire du paramètre d'entrée  $x_i$ ,  $a_{ii}$  est le  $i^{\text{eme}}$  coefficient quadratique du paramètre d'entrée  $x_i$ ,  $a_{ij}$  est le coefficient d'interaction entre les paramètres d'entrée  $x_i$  et  $x_j$ , et  $\varepsilon$  est l'erreur du modèle.

Il existe divers types de plans du second ordre, parmi lesquels les principaux sont énoncés ci-dessous.

II.8.1. Les plans composites centrés

Le plan composite centré de Box-Wilson, également appelé plan composite centré, combine un plan factoriel ou fractionnaire avec des points centraux et des points en étoile pour estimer la courbure. Les points factoriels sont à une distance de  $\pm 1$  unité des centres, tandis que les points en étoile sont à une distance  $|\alpha| > 1$ , où  $\alpha$  et le nombre de points en étoile dépendent des propriétés du plan et du nombre de facteurs. Typiquement, un plan comporte deux fois plus de points en étoile que de facteurs. Le plan composite centré circonscrit (CCC) est sa forme originale, caractérisée par une symétrie et nécessitant 5 niveaux par facteur.

La figure II.13 illustre un plan composite centré à trois facteurs. Les points numérotés de 1 à 8 représentent les points expérimentaux d'un plan fractionnaire  $2^3$ . Le point 15 représente le point central, qui peut être reproduit à plusieurs reprises. Les points 9 à 14 constituent les points axiaux, qui définissent le motif en étoile du plan.

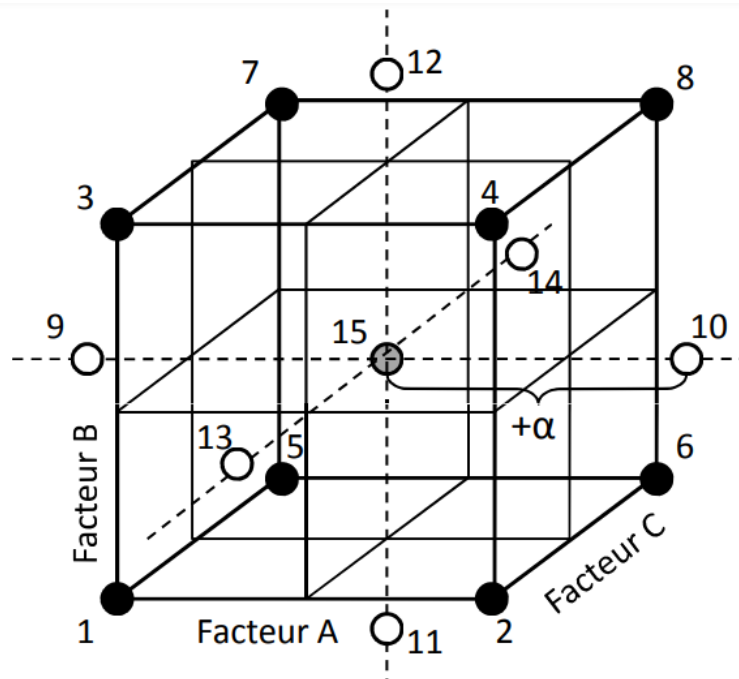


Figure II.13 : Plan composite centré pour 3 facteurs [61].

Pour maintenir la rotabilité, la valeur de  $\alpha$  dépend du nombre d'essais expérimentaux dans la partie factorielle du plan composite centré.

$$\alpha = (2^{k-p})^{1/4} \tag{II.16}$$

## Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation

Dans cette formulation,  $k$  désigne le nombre de facteurs sous investigation, tandis que  $p$  représente la valeur de la fraction. Plus précisément, pour  $p : 0$  signifie l'absence de fraction, 1 correspond à  $1/2$ , 2 équivaut à  $1/4$ , 3 représente  $1/8$ , et ainsi de suite.

Les plans de Doehlert [63] se caractérisent par une distribution uniforme des points dans l'espace expérimental. Comme illustré à la figure II.14 pour un plan à deux facteurs, ces points, équidistants du centre et disposés sur un cercle trigonométrique, forment un hexagone. Si l'expérimentateur souhaite étendre l'exploration, il peut aisément ajouter des points supplémentaires tout en conservant la structure initiale. La figure II.14 illustre qu'avec trois points additionnels (essais 8, 9 et 10), un nouveau plan de Doehlert est formé, comprenant les essais 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1. Ce format est adaptable à plusieurs facteurs.

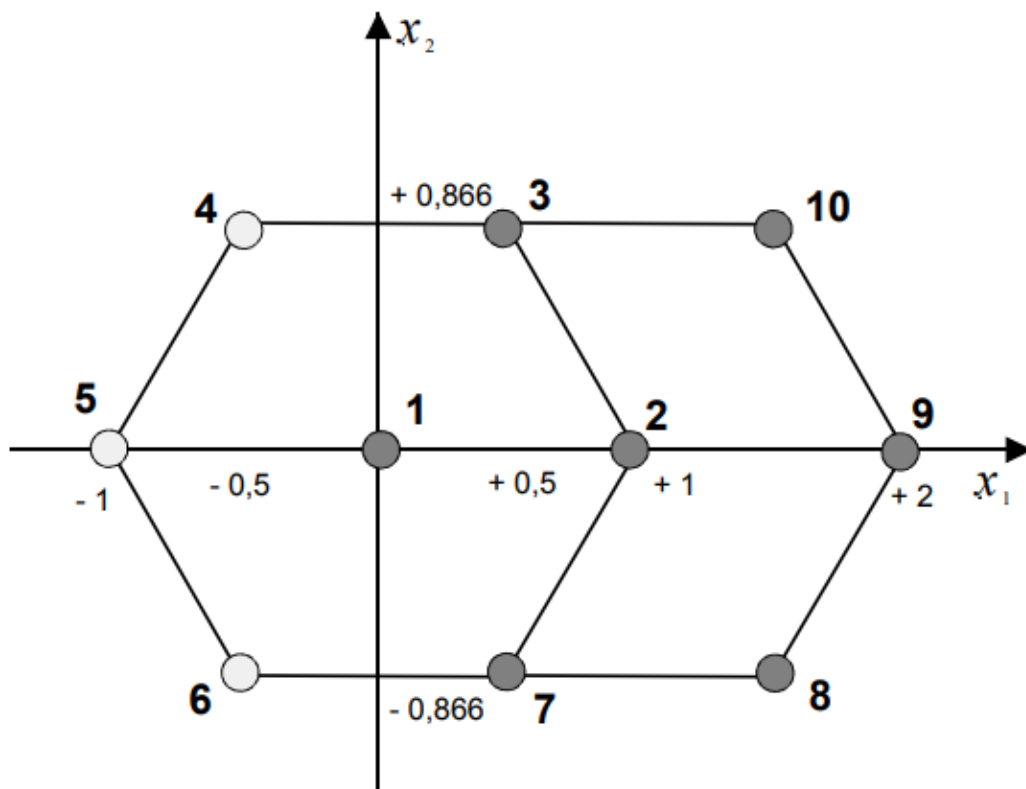


Figure II.14 : La stratégie de Doehlert. Un premier plan de Doehlert est présenté dans les points 1 à 7. Les expériences supplémentaires sont illustrées par les trois points 8, 9 et 10. Un deuxième plan de Doehlert est représenté par les points 2, 7, 8, 9, 10, 3 et 1 [60].



### II.8.2. Les plans de Box-Behnken

Les points expérimentaux des plans de Box-Behnken, illustrés à la figure 19, se situent au centre des arêtes du cube. Ce plan, comprenant douze essais, peut être complété par un ou plusieurs points centraux, comme présenté dans le tableau II.3 avec un point central. Habituellement, 3 ou 4 points centraux sont utilisés en pratique.

Les plans de Box-Behnken [64] visent une optimisation spécifique : l'erreur de prédiction est constante pour tous les points d'une sphère centrée à l'origine, conformément au critère d'isovariance par rotation. Le plan de Box-Behnken le plus reconnu est celui pour trois facteurs.

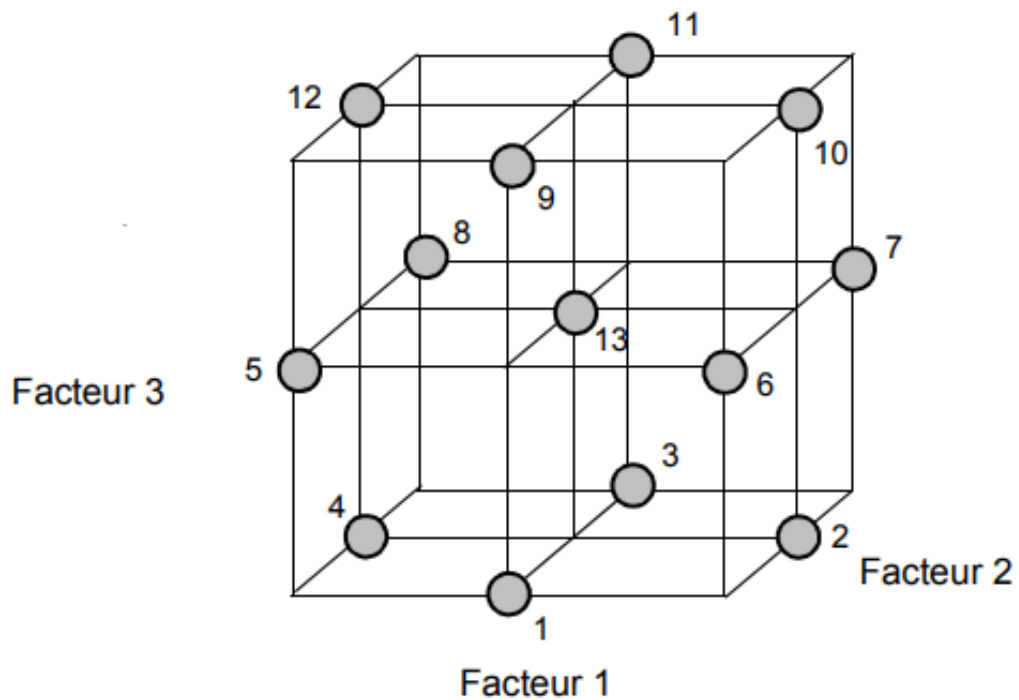


Figure II.15 : Plans de Box-Behnken [61].

Tableau II.3 : Plan de Box- Behnken pour 3 facteurs.

n° essai	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3
1	0	-1	-1
2	1	0	-1
3	0	1	-1
4	-1	0	-1
5	-1	-1	0
6	1	-1	0
7	1	1	0
8	-1	1	0
9	0	-1	1
10	1	0	1
11	0	1	1
12	-1	0	1
13	0	0	0

### II.8.3. Représentation graphique

#### II.8.3.1. Surface de réponse

Les surfaces de réponse sont des outils graphiques qui permettent d'illustrer les variations d'un phénomène spécifique dans un espace tridimensionnel. Le plan horizontal de cet espace représente le domaine de variation de deux facteurs, tandis que l'axe vertical exprime la variation de la réponse selon le modèle empirique. Lorsque le nombre de facteurs est supérieur à deux, les autres variables doivent être maintenues constantes à un niveau spécifique qui n'apparaît pas dans le plan horizontal. La Figure II.16 présente un exemple concret de plusieurs surfaces de réponse. Ces surfaces permettent de visualiser l'impact des variations des facteurs sur la réponse du modèle empirique dans un contexte tridimensionnel.

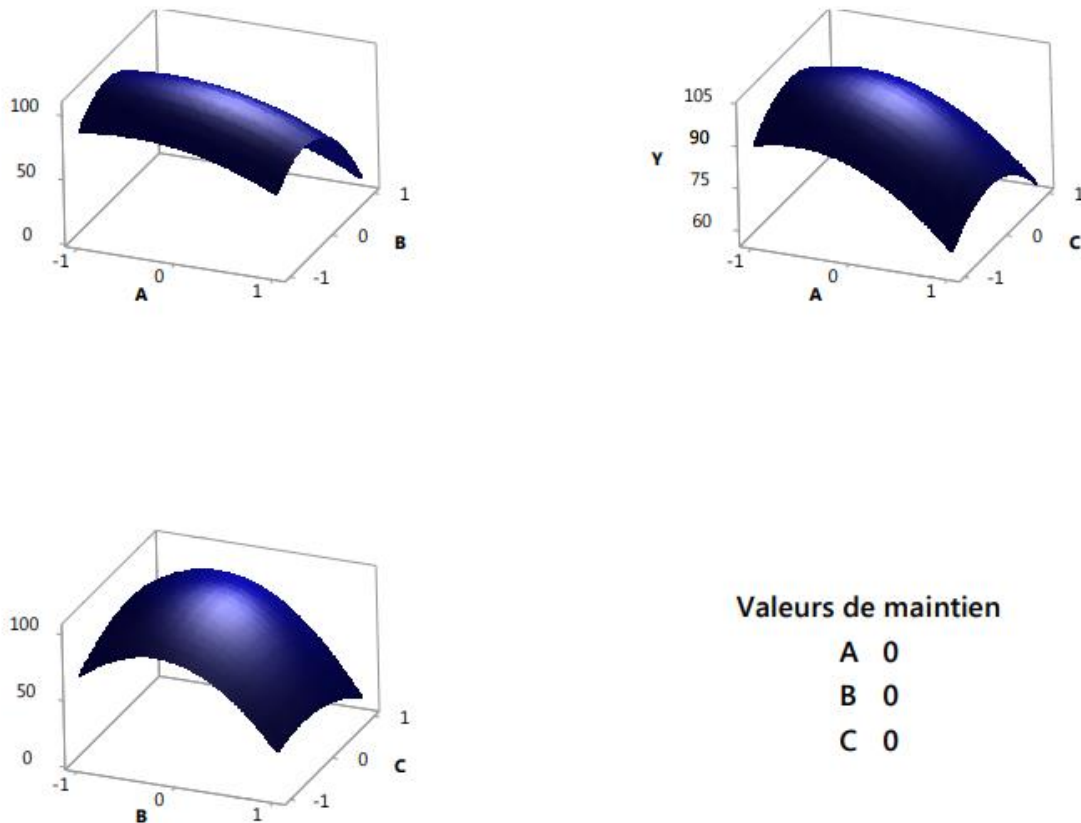


Figure II.16 : Exemple de surfaces de réponse [61].

### II.8.3.2. Courbe iso-réponse

Les courbes iso-réponse sont une méthode de représentation graphique qui permet de projeter une surface tridimensionnelle, également connue sous le nom de surface de réponse, sur un plan à deux dimensions. Ces courbes se présentent sous la forme de lignes de niveau, analogues aux courbes topographiques que l'on retrouve sur une carte. De manière similaire aux surfaces de réponse, cette représentation graphique se concentre sur deux facteurs à la fois, tandis que les autres facteurs sont maintenus à un niveau constant. La Figure II.17 offre un exemple concret illustrant plusieurs contours dans le contexte d'un plan impliquant trois facteurs. Ces courbes iso-réponse facilitent la compréhension visuelle des interactions entre les facteurs et de leur influence sur la réponse du modèle empirique dans un espace bidimensionnel.

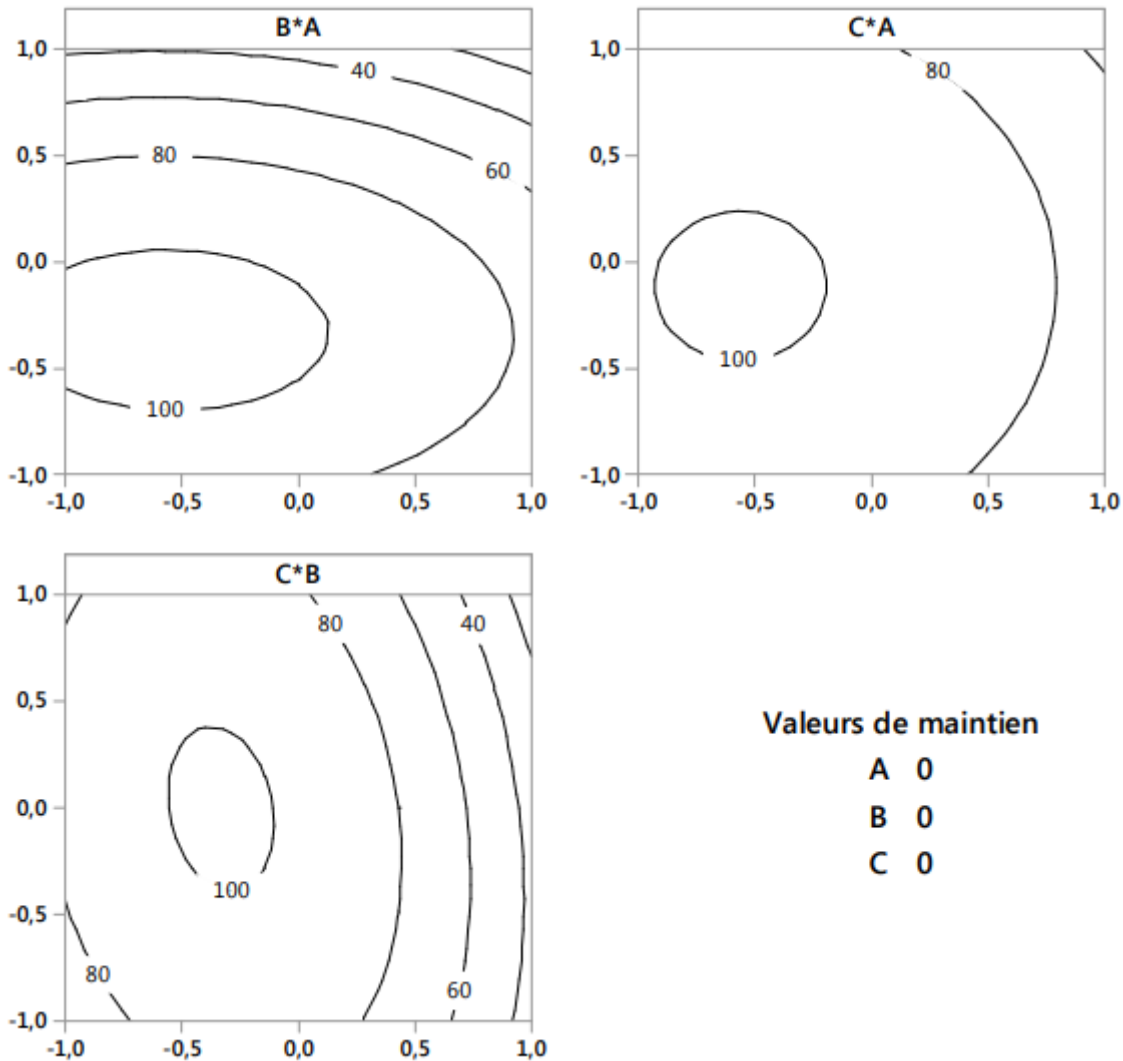


Figure II.17 : Plan de Box-Behnken pour 3 facteurs [61].

### II.9. Les plans pour simulations numériques

Les plans d'expériences pour simulations numériques sont des méthodes structurées pour étudier les phénomènes à l'aide de simulations informatiques. Ils constituent une alternative efficace aux expérimentations réelles lorsque celles-ci sont coûteuses, impraticables ou trop longues.

Les plans d'expériences pour simulations numériques présentent plusieurs caractéristiques spécifiques :

- **Coût élevé des expérimentations :** Les simulations numériques sont particulièrement utiles lorsque la réalisation d'expériences physiques est coûteuse, dangereuse ou

chronophage. Elles permettent d'explorer virtuellement différentes conditions sans les contraintes associées aux expériences réelles.

- Structure analogue aux plans d'expériences : Les simulations numériques sont organisées de manière similaire aux essais des plans d'expériences. Cela implique une planification systématique des combinaisons de paramètres d'entrée à étudier, avec l'objectif d'optimiser les résultats.
- Absence d'erreur expérimentale : Contrairement aux expériences réelles, les simulations numériques n'incluent pas d'erreur expérimentale. Cependant, d'autres incertitudes peuvent subsister, telles que des approximations numériques ou des erreurs de modélisation.
- Complexité des modèles a priori : Les modèles utilisés pour interpréter les résultats des simulations peuvent être complexes. La conception des plans doit prendre en compte cette complexité, notamment la présence d'interactions entre les facteurs et d'autres phénomènes non linéaires.
- Optimisation des ressources de calcul : Étant donné que les simulations numériques peuvent nécessiter des ressources informatiques considérables, les plans sont souvent conçus pour optimiser l'utilisation de ces ressources, en ajustant l'échantillonnage en fonction des informations déjà obtenues.

### II.10. Planification et Conception d'Expériences

Les plans d'expériences (DOE) sont des méthodes systématiques de conception et d'analyse d'expériences permettant d'obtenir des informations valides et fiables. Les sept étapes suivantes sont typiquement associées à la mise en œuvre de DOE :

- Définition des objectifs : Avant de commencer, il est essentiel de définir clairement les objectifs de l'expérience. Que cherche-t-on à comprendre ou à améliorer ?
- Sélection des facteurs : Identifier les variables qui peuvent influencer le résultat de l'expérience (facteurs) et décider des niveaux à tester pour chaque facteur.
- Choix du plan expérimental : Il existe différents types de plans d'expériences (comme le plan factoriel complet, le plan fractionnaire, etc.). Choisir le plan le plus adapté en fonction du nombre de facteurs, de leurs niveaux et de l'objectif de l'expérience. Le tableau II.4 montre un simple guide exemple de sélection d'un plan.

Tableau II.4 : Guide de sélection d'un plan.

Nombre de facteurs	Objectif comparatif	Objectif de dépistage	Surface de réponse
1	Plan totalement aléatoire à 1 facteur	-	-
2-4	Plan de bloc aléatoire	Factoriel complet ou fractionnaire	Central composite ou Box-Behnken
5 ou plus	Plan de bloc aléatoire	Factoriel fractionnaire ou Plackett-Burman	Dépistage en premier pour réduire le nombre de facteurs

- Conception de l'expérience : Basée sur le plan choisi, créer une séquence d'essais à réaliser, en assignant des niveaux spécifiques à chaque facteur.
- Exécution de l'expérience : Réaliser les expériences selon le plan défini, en suivant rigoureusement la séquence et les niveaux prescrits.
- Analyse des données : Une fois les données recueillies, utiliser des méthodes statistiques pour analyser les résultats et évaluer l'effet de chaque facteur, ainsi que leurs interactions éventuelles.
- Interprétation et conclusions : Sur la base des analyses, tirer des conclusions concernant l'impact des facteurs sur le résultat et, si possible, proposer des recommandations pour optimiser ou améliorer le processus ou le produit étudié.

### II.11. Techniques d'analyse

#### II.11.1. Test de Signification des Effets

Dans le cadre de la modélisation statistique, les coefficients du modèle sont utilisés pour interpréter l'impact des facteurs et de leurs interactions. Cependant, il est important de tenir compte de leur importance statistique pour déterminer si un effet est significatif ou non. Pour ce faire, on utilise généralement une valeur critique pour la statistique de test correspondante (t ou F), qui dépend du degré de liberté souhaité et du niveau de confiance associé au test. Si la valeur absolue du coefficient dépasse la valeur critique, cela indique que l'effet du facteur correspondant est significatif.

## Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation

---

Avant de calculer la valeur de  $t$ , il est important d'évaluer l'écart-type des résidus, qui est calculé à l'aide de calculs statistiques. L'écart-type des résidus,  $S_i$ , est calculé en déduisant la variance des écarts entre les valeurs expérimentales ( $Y_i$ ) et les valeurs estimées prédites par le modèle ( $\hat{Y}_i$ ). La formule (II.16) est utilisée pour calculer  $S_i$  :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p} \quad (\text{II.16})$$

Où "n" représente le nombre d'observations dans le modèle et "p" est le nombre de variables indépendantes.

La réalisation du test et son interprétation s'articulent autour des hypothèses nulle ( $H_0$ ) et alternative ( $H_1$ ) concernant l'effet  $a_i$ . L'hypothèse nulle stipule que l'effet  $a_i$  est nul, c'est-à-dire non significatif, et est notée  $H_0$ . Toute autre hypothèse différente de  $H_0$  est dénommée hypothèse alternative et est symbolisée par  $H_1$ , avec un niveau de confiance de  $\alpha$  indiquant que l'effet diffère significativement de zéro. Ainsi, nous formulons :

- $H_0$  : l'effet  $a_i$  est nul, ce qui signifie que  $a_i$  n'est pas significatif.
- $H_1$  : l'effet  $a_i$  n'est pas nul, c'est-à-dire que  $a_i$  est significatif.

La valeur à tester,  $t_i$ , est le rapport du coefficient  $a_i$  sur son écart-type  $S_i$ .

$$t_i = \frac{\beta_i}{S_i} \quad (\text{II.17})$$

Pour déterminer la valeur critique,  $t_{crit}$ , permettant de tester la signification d'un effet avec un risque  $\alpha$  donné, le test de Student est utilisé. Le rapport  $t$  est comparé à cette valeur critique, qui est définie pour un risque  $\alpha$  et un degré de liberté ddl équivalent à  $n-p$ . Cette valeur critique peut être directement extraite de la table de Student.

$$t_{crit} = v(\alpha, ddl) \quad (\text{II.18})$$

Après le calcul des rapports  $t_i$ , ces valeurs sont comparées à la valeur critique,  $t_{crit}$ , pour déterminer la signification ou non des effets. Si la valeur absolue de  $t_i$  est supérieure à  $t_{crit}$ , l'hypothèse  $H_0$  est rejetée au profit de l'acceptation de  $H_1$ , indiquant que l'effet  $a_i$  est significatif. En revanche, si la condition  $|t_i| \leq t_{crit}$  est satisfaite, l'hypothèse  $H_0$  est acceptée, signifiant que l'effet  $a_i$  n'est pas significatif, et  $H_1$  est rejetée. Cette méthodologie assure une démarche rigoureuse pour évaluer la pertinence des effets dans le contexte du modèle statistique considéré.

### II.11.2. Test de validation du modèle

L'ANOVA (analyse de la variance) et le test de Fisher-Snedecor (F) sont couramment utilisés pour évaluer l'efficacité et la précision d'un modèle de régression. Le test F compare la variance résiduelle à la variance expliquée par le modèle, tout en testant l'hypothèse nulle selon laquelle tous les coefficients de régression sont nuls. Ce processus fournit des informations précieuses sur la signification globale du modèle.

De plus, la Somme des Carrés Due (SSD) est calculée pour décomposer la variance totale de la variable dépendante en deux parties : la variance expliquée par le modèle (SSE) et la variance résiduelle (SSR). Cette décomposition joue un rôle crucial dans la détermination de la proportion de la variance totale qui peut être attribuée au modèle.

$$SSD = SSE + SSR \quad (\text{II.19})$$

$$SSD = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.20})$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.21})$$

$$SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.22})$$

Les équations (II.19) et (II.20) présentent la somme totale des écarts carrés (SSD) comme une mesure fondamentale de la variation totale dans la variable dépendante d'un modèle de régression. Elle est calculée en additionnant les carrés des écarts de chaque observation par rapport à la moyenne de la variable dépendante.

L'équation (II.21) représente la somme des écarts carrés dus à la régression (SSE), qui représente la proportion de la variance dans la variable dépendante causée par les facteurs indépendants du modèle. L'équation (II.22) représente la somme des écarts carrés des résidus (SSR), qui est la partie de la variation qui demeure inexpliquée par le modèle.

La table d'Analyse de la Variance (ANOVA) est présentée dans le Tableau II.5. La validité d'un modèle peut être déterminée en effectuant une analyse de contraste (ANOVA) et en calculant diverses normes statistiques avec un niveau de risque  $\alpha$ . En outre, la capacité du



## Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation

modèle à prédire de manière précise et à concorder avec les données mesurées peut également être évaluée.

Tableau II.5 : Fisher test [59].

Variation Source	Ddl	Sum of squares	Mean squares	F <sub>abs</sub>
Regression (model)	p-1	SSE	MCF=SSE/(p-1)	MCF/MCR
Residuals	n-p	SSR	MCR=SSR/(n-p)	
Total	n-1	SSD		

Pour analyser la variance de l'étude, le Tableau II.5 a été créé pour évaluer la validité du modèle. Les résultats obtenus ont été utilisés pour comparer  $F_{cal}$  et  $F_{crit}$ . Comme  $F_{abs} > F_{crit}$ , le modèle de régression est considéré comme valide. Cela implique que le modèle s'ajuste bien aux données et est capable de prédire de manière précise la variable dépendante.

### II.11.3. Mesures statistiques pour évaluer le modèle

L'analyse de la variance (ANOVA) est une technique statistique utilisée pour comparer les variances de deux ou plusieurs groupes. En réalisant une ANOVA sur un modèle de régression, diverses mesures statistiques peuvent être obtenues, telles que le coefficient de détermination R carré ( $R^2$ ) et le R carré ajusté ( $R^2_{adj}$ ).

$$R^2 = \frac{SSE}{SSR} \quad (II.23)$$

$$R^2_{ajuste} = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{n-p} \quad (II.24)$$

Le coefficient de détermination R carré ( $R^2$ ) mesure la proportion de la variance totale de la variable dépendante qui est expliquée par le modèle de régression. Le R carré ajusté ( $R^2_{adj}$ ) est une version ajustée de  $R^2$  qui tient compte du nombre de variables indépendantes dans le modèle.

## Chapitre II : Conception expérimentale et méthodologie de modélisation

---

Lorsque les valeurs de  $R^2$  et  $R^2_{adj}$  sont proches de 1, cela signifie que le modèle s'ajuste bien aux données observées.

La Somme des Carrés des Erreurs Résiduelles Prédites (PRESS), est une mesure de l'ajustement du modèle à chaque point du plan. Elle est calculée en prédisant initialement l'emplacement anticipé de chaque point à partir d'un modèle comprenant tous les autres points, à l'exception du point en question. Les carrés des résidus (la différence entre les valeurs réelles et prédites) sont ensuite sommés.

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{-i})^2 \quad (\text{II.25})$$

Le PRESS est utile pour déterminer la valeur de  $R^2_{prédit}$ , qui est une estimation de la valeur de  $R^2$  que l'on obtiendrait si le modèle était appliqué à un nouveau jeu de données.

Le R carré prédit ( $R^2_{prédit}$ ) est une mesure de la capacité d'un modèle de régression à prédire les valeurs d'une variable dépendante pour de nouvelles observations. Il est calculé en retirant systématiquement chaque observation de l'ensemble de données, en estimant l'équation de régression sur le reste des données, puis en évaluant la précision des prédictions du modèle pour l'observation retirée.

$$R^2_{prédit} = 1 - \frac{PRESS}{STCE} \quad (\text{II.26})$$

Le  $R^2$  prédit est souvent utilisé pour évaluer la robustesse d'un modèle de régression. Une valeur élevée de  $R^2$  prédit indique que le modèle est capable de prédire les valeurs de la variable dépendante avec précision, même pour des observations qui ne sont pas incluses dans l'ensemble de données d'entraînement.

Le  $R^2_{prédit}$  peut être négatif, mais il est toujours inférieur à  $R^2$ . Cela est dû au fait que le  $R^2_{prédit}$  est calculé en utilisant les données d'entraînement pour estimer le modèle, puis en utilisant ce modèle pour prédire les valeurs de la variable dépendante pour les observations retirées.

Même si l'intention n'est pas d'utiliser le modèle pour les prévisions, le  $R^2_{prédit}$  peut fournir des informations précieuses sur la qualité du modèle. Une valeur élevée de  $R^2_{prédit}$

indique que le modèle est capable de capturer les relations sous-jacentes entre les variables et qu'il est donc susceptible de produire des prédictions précises pour de nouvelles observations. La Précision Adequate ( $Pr_{e_{adeq}}$ ) est une mesure de la capacité d'un modèle de régression à distinguer les observations des points du plan. Elle est calculée en divisant l'étendue des valeurs prédites par l'erreur de prédiction moyenne.

$$Pr_{e_{adeq}} = \frac{\max(\hat{y}) - \min(\hat{y})}{\sqrt{\frac{p^* CMR}{n}}} \quad (II.27)$$

Des ratios supérieurs à 4 indiquent une discrimination de modèle adéquate.

### II.12. Les logiciels de plans d'expériences

La sélection parmi les matrices déjà publiées facilite souvent la conception des plans d'expériences. Cependant, le plan doit être adapté à l'étude et non l'inverse. Il est nécessaire de créer un plan personnalisé dans certains cas. Les logiciels destinés aux plans d'expériences disposent de bibliothèques de plans classiques et permettent de créer des plans personnalisés. En particulier, la conception de plans de mélanges et de plans avec des contraintes sur le domaine d'étude nécessite l'utilisation d'un logiciel.

Le calcul des coefficients peut être effectué à l'aide d'un tableur, mais cela nécessite du temps et de la programmation. Il est préférable d'opter pour un programme spécialisé capable de réaliser non seulement le calcul des coefficients, mais également toutes les analyses statistiques nécessaires pour évaluer la qualité du modèle mathématique, telles que les coefficients de détermination, les écarts-types des réponses et des coefficients, la valeur p, etc. Les logiciels de plans d'expérience sont également programmés pour calculer les réponses dans l'ensemble du domaine d'étude, effectuer des analyses de variance, tracer des courbes d'iso des réponses, créer des surfaces de réponse et déterminer les zones d'intérêt.

Il est possible d'effectuer rapidement de multiples analyses et d'examiner les données sous tous les angles grâce à cette gamme de fonctionnalités. Par conséquent, il est possible d'extraire rapidement toutes les informations présentes dans les résultats d'un plan d'expériences. Pour la conception de plans complexes et l'interprétation approfondie des résultats des plans, les logiciels de plans d'expérience sont désormais des outils indispensables.

### II.12.1. Les principales fonctionnalités des logiciels de plans d'expériences

Les logiciels de plans d'expériences offrent une large gamme de fonctionnalités, dont les principales sont les suivantes :

- Conception de plans d'expériences : Les logiciels permettent de concevoir des plans d'expériences adaptés à des besoins spécifiques, notamment des plans de mélanges, des plans avec des contraintes sur le domaine d'étude, etc.
- Calcul des coefficients du modèle : Les logiciels effectuent le calcul des coefficients du modèle mathématique, ainsi que toutes les analyses statistiques nécessaires pour évaluer la qualité du modèle.
- Analyse des résultats : Les logiciels permettent d'effectuer des analyses de variance, de tracer des courbes d'iso réponses, de construire des surfaces de réponse, etc.

### II.13. Conclusion

Ce chapitre explore l'application de méthodes expérimentales rigoureuses dans le développement et l'optimisation des systèmes. Plus précisément, il se concentre sur les raisons pour lesquelles cette approche a été choisie pour améliorer les performances d'un échangeur de chaleur air-sol (ECAS). En respectant des procédures bien définies et en générant des résultats précis, la méthodologie choisie améliore la fiabilité des conclusions. De plus, elle offre une compréhension approfondie des facteurs influençant la réponse de l'ECAS, permettant l'élaboration de recommandations pour l'amélioration des performances. En fin de compte, ces avancées contribuent à une meilleure qualité de vie dans les bâtiments.

# **CHAPITRE III**

**Modélisation mathématique des  
écoulements de fluides avec CFD  
: Focus sur la turbulence et  
utilisation d'Ansys FLUENT**

# Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---

## III.1. Introduction

Ce chapitre présente un aperçu des techniques de modélisation mathématique des écoulements fluides par la Dynamique des Fluides Numérique (CFD), en se focalisant sur les modèles de turbulence employés dans notre recherche.

La modélisation de la turbulence est essentielle pour appréhender le comportement des fluides dans les conduites, où des écoulements complexes naissent des forces de friction et des gradients de vitesse. Nous explorons ensuite les méthodes usuelles de résolution des équations gouvernantes, avant de présenter Ansys FLUENT, un logiciel largement utilisé pour les simulations de dynamique des fluides. Les principales caractéristiques d'Ansys FLUENT et le flux de travail typique de simulation sont abordés de manière exhaustive.

## III.2. Modélisation mathématique des écoulements fluides par la Dynamique des Fluides Numérique (CFD)

La modélisation mathématique d'un écoulement fluide au moyen de la Dynamique des Fluides Numérique (CFD) s'appuie sur un ensemble d'équations fondamentales, appelées équations gouvernantes, qui décrivent la conservation des propriétés physiques telles que la masse, la quantité de mouvement et l'énergie. Pour un écoulement incompressible et stationnaire en coordonnées cartésiennes 3D, les équations de transfert de chaleur et de masse sont formulées comme suit :

Équation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{III.1})$$

Équations de quantité de mouvement :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (\text{III.2})$$

## Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (\text{III.3})$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (\text{III.4})$$

Équation d'énergie, pour un écoulement stationnaire, sans source interne ni dissipation visqueuse.

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] \quad (\text{III.5})$$

Pour résoudre ces équations, il existe plusieurs méthodes telles que :

### III.2.1. Simulation Numérique Directe (DNS)

#### Description

La Simulation Numérique Directe (DNS) est une méthode de simulation des écoulements fluides qui résout numériquement toutes les échelles spatiales et temporelles du problème, y compris les structures les plus petites de la turbulence.

#### Principe

La DNS repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes complètes, sans aucune modélisation. Cela permet d'obtenir des résultats précis et complets, mais nécessite des ressources informatiques importantes.

## **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

### Applications

La DNS est adaptée pour étudier les détails fins des écoulements turbulents, tels que la structure des tourbillons et la distribution des forces de frottement. Elle est également utilisée pour étudier des phénomènes complexes tels que la séparation des flux, la création de vortex et la combustion.

### **III.2.2. Simulation des Grandes Échelles (LES - Large Eddy Simulation)**

#### Description

La Simulation des Grandes Échelles (LES) est une méthode de simulation des écoulements fluides qui résout numériquement les grandes échelles spatiales du problème, tandis que les échelles plus petites sont modélisées à l'aide de sous-modèles de turbulence.

#### Principe

La LES repose sur l'idée que les grandes échelles de la turbulence sont les plus importantes pour la dynamique globale de l'écoulement. Les petites échelles, quant à elles, sont souvent turbulentes et désordonnées, et leur modélisation est difficile et coûteuse en ressources informatiques.

#### Applications

La LES est utilisée dans des cas où la modélisation fine de toutes les échelles n'est pas nécessaire, mais où les grandes structures turbulentes sont cruciales. Par exemple, la LES est utilisée pour étudier les écoulements turbulents dans les moteurs d'avion, les turbines et les échangeurs de chaleur.

### **III.2.3. Modélisation Statistique des Équations de Navier-Stokes (RANS - Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations)**

#### Description

La Modélisation Statistique des Équations de Navier-Stokes (RANS) est une méthode de simulation des écoulements fluides qui repose sur la moyenne temporelle des équations de



## **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

Navier-Stokes pour obtenir des équations moyennées, avec inclusion de modèles de turbulence pour les échelles non résolues.

### **Principe**

La RANS consiste à moyenner les équations de Navier-Stokes dans le temps. Cela permet d'obtenir des équations basées sur les valeurs moyennes statistiques des variables fluides, telles que la vitesse et la pression. Les échelles de turbulence, qui sont trop petites pour être résolues numériquement, sont modélisées à l'aide de sous-modèles de turbulence.

### **Applications**

La RANS est souvent utilisée dans l'industrie où une modélisation moins coûteuse, mais suffisamment précise, est nécessaire. Elle est utilisée pour simuler des écoulements fluides dans des applications telles que la propulsion aéronautique, la production d'énergie et la conception de structures.

### **III.3. Modèle de turbulence**

Les modèles de turbulence sont essentiels pour comprendre les écoulements fluides dans les conduites, qui sont souvent caractérisés par des mouvements turbulents causés par les frottements résultant des gradients de vitesse dans l'écoulement. Une vaste gamme de modèles de turbulence est disponible pour représenter ces phénomènes complexes. Ces modèles visent à fournir des descriptions précises et prédictives des caractéristiques de la turbulence, en tenant compte des interactions complexes entre les différentes échelles de turbulence.

Plusieurs facteurs influencent le choix d'un modèle de turbulence, tels que la physique inhérente de l'écoulement, les pratiques établies pour une classe de problème spécifique, le niveau de précision requis, les ressources informatiques disponibles pour atteindre le niveau de précision souhaité et la durée nécessaire pour la simulation [65].

#### **III.3.1. Modèle k- $\epsilon$ Réalisable**

Le modèle k- $\epsilon$  réalisable [68], un développement relativement récent, s'écarte du modèle k- $\epsilon$  standard de deux manières essentielles. Premièrement, il utilise une nouvelle formulation pour la viscosité turbulente. Deuxièmement, il utilise une nouvelle équation de

## Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---

transport pour le taux de dissipation,  $\epsilon$ , dérivée d'une équation exacte pour le transport de la fluctuation de la vorticité quadratique moyenne. Cette "réalisabilité" signifie que le modèle satisfait à des contraintes mathématiques spécifiques sur les contraintes de Reynolds, ce qui est cohérent avec la physique des écoulements turbulents. Notamment, ni le modèle k- $\epsilon$  standard ni le modèle RNG k- $\epsilon$  ne présentent cette propriété. Un avantage direct du modèle k- $\epsilon$  réalisable est qu'il permet de mieux prédire le taux de dispersion des jets planaires et cylindriques. Il montre également des performances prometteuses pour les écoulements impliquant la rotation, les couches limites sous des gradients de pression adverses forts, la séparation et la recirculation.

Les équations pour le modèle k- $\epsilon$  réalisable sont données par :

 quation de transport de k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (\text{III.6})$$

 quation de transport de  $\epsilon$  :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon + \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \quad (\text{III.7})$$

Les constantes du modèle  $C_2$ ,  $\sigma_k$  et  $\sigma_\epsilon$  ont été déterminées de manière à garantir que le modèle fonctionne bien pour certains écoulements canoniques. Les constantes du modèle sont :

$$C_{1\epsilon} = 1.44; C_2 = 1.9; \sigma_k = 1.2; \sigma_\epsilon = 1.2 \quad (\text{III.8})$$

### III.4. Méthodes de résolution des équations régissantes

Pour résoudre les équations de Navier-Stokes, différentes méthodes numériques sont disponibles. Les méthodes les plus couramment utilisées sont les méthodes des différences finies (MDF), les méthodes des éléments finis (MEF) et les méthodes des volumes finis (MVF).

## **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

### Méthodes des différences finies

Les méthodes des différences finies (MDF) divisent le domaine en un réseau discret. Les dérivées spatiales et temporelles sont alors approximées par des différences finies. Les équations sont discrétisées sur une grille, ce qui permet de résoudre numériquement les variations des variables à chaque point du maillage.

### Méthodes des éléments finis

Les méthodes des éléments finis (MEF) découpent le domaine en éléments géométriques, appelés éléments finis. Les équations sont ensuite formulées et résolues sur chaque élément. Ces éléments sont assemblés pour obtenir une solution globale. Les MEF sont particulièrement adaptées à la modélisation de géométries complexes.

### Méthodes des volumes finis

Les méthodes des volumes finis (MVF) partitionnent le domaine en volumes finis. Les équations sont intégrées sur ces volumes, et les flux à travers les faces sont calculés. Cela permet de représenter les variations locales des quantités physiques, et les équations sont résolues numériquement en tenant compte des flux entre les volumes.

### **III.5. Introduction à FLUENT : Un Aperçu de la Simulation Numérique en Dynamique des Fluides**

La simulation numérique occupe une place prépondérante dans le domaine de l'ingénierie, offrant une approche avancée pour étudier et comprendre les phénomènes complexes liés à la dynamique des fluides. Parmi les outils de pointe dédiés à cette discipline, FLUENT se distingue comme un logiciel de renom, propulsant les chercheurs et les ingénieurs dans le monde fascinant de la modélisation numérique des flux fluides.

## Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---

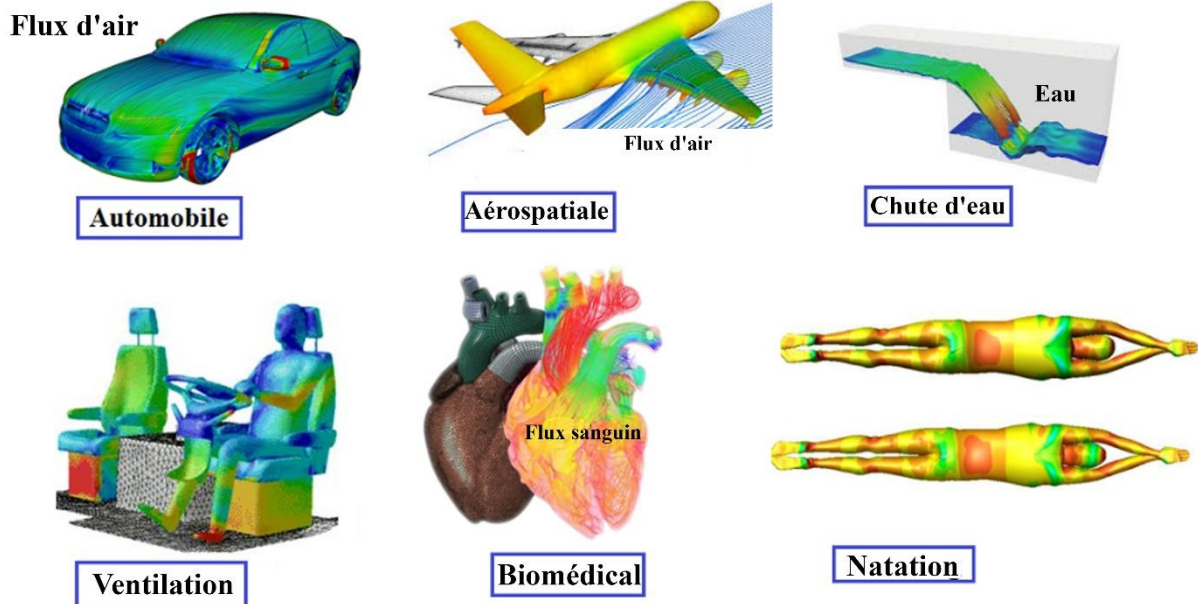


Figure III.1 : Un aperçu des domaines dans lesquels nous pouvons utiliser la simulation numérique.

### III.5.1. Évolution de la Simulation Numérique

Au fil des décennies, l'évolution fulgurante de la puissance informatique a propulsé la simulation numérique au-delà des limites de la pensée traditionnelle, permettant une exploration approfondie et précise des comportements fluides. Dans ce contexte, FLUENT se positionne comme un outil incontournable pour la résolution des équations fondamentales de la dynamique des fluides.

### III.5.2. Les Enjeux de l'Ingénierie Moderne

Les défis complexes auxquels est confrontée l'ingénierie moderne, qu'il s'agisse de la conception de systèmes aéronautiques, de la modélisation des processus industriels, ou de la simulation des écoulements sanguins, exigent des outils sophistiqués capables de capturer la réalité physique avec une précision remarquable. FLUENT se révèle être un partenaire incontournable dans la recherche de solutions novatrices à ces défis.

## **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

### **III.5.3. Importance de la Simulation Numérique**

La simulation numérique, et FLUENT en particulier, joue un rôle crucial dans l'optimisation des conceptions, la réduction des coûts d'essais physiques, et l'accélération du développement de produits novateurs.

### **III.6. Caractéristiques du Logiciel Ansys FLUENT**

#### **III.6.1. Modélisation des Phénomènes**

Ansys FLUENT est spécifiquement conçu pour modéliser l'écoulement des fluides ainsi que les transferts de chaleur et de masse. Cette polyvalence en fait un outil essentiel pour la simulation d'une gamme étendue de problèmes, des plus simples aux plus complexes.

#### **III.6.2. Avantages de l'utilisation d'ANSYS FLUENT pour la modélisation des phénomènes**

**Précision et fiabilité:** FLUENT est un logiciel de simulation numérique validé et testé qui offre des résultats précis et fiables.

**Flexibilité:** FLUENT offre une large gamme de fonctionnalités pour modéliser une grande variété de phénomènes physiques.

**Facilité d'utilisation:** FLUENT dispose d'une interface utilisateur intuitive et conviviale.

**Puissant:** FLUENT est un logiciel puissant qui peut s'attaquer à des problèmes complexes de simulation.

#### **III.6.3. Capacité de Résolution**

Le logiciel peut résoudre des problèmes tant en deux dimensions (2D) qu'en trois dimensions (3D), offrant ainsi une flexibilité adaptée à la complexité des géométries étudiées.

## **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

### **III.6.4. Maillage**

La simulation numérique avec ANSYS Fluent nécessite le maillage. Il consiste à subdiviser le domaine d'étude en un ensemble de petites cellules appelées éléments finis, qui permettent de résoudre les équations de la dynamique des fluides. La précision et la fiabilité des résultats de la simulation sont directement affectées par la qualité du maillage.

ANSYS Meshing est un outil puissant et flexible qui offre une large gamme de fonctionnalités pour créer des maillages de haute qualité pour ANSYS Fluent. Voici quelques-unes des principales caractéristiques de ANSYS Meshing :

Types de maillage: ANSYS Meshing permet de créer différents types de maillages, tels que des maillages structurés, non structurés et hybrides.

Outils de création de maillage: L'outil propose une variété d'outils pour créer des maillages, tels que des outils de balayage, de projection et de pavage.

Outils de modification de maillage: ANSYS Meshing offre des outils pour modifier et affiner le maillage, tels que des outils de lissage, de fusion et de suppression d'éléments.

Outils de qualité du maillage: L'outil propose des outils pour évaluer la qualité du maillage et identifier les éléments qui peuvent affecter la précision de la simulation.

#### **III.6.4.1. Types de maillage pour ANSYS Fluent**

Le choix du type de maillage dépend de la géométrie du domaine d'étude, des exigences de la simulation et des ressources disponibles.

Maillage structuré: Ce type de maillage est le plus simple à créer et est généralement utilisé pour des géométries simples.

Maillage non structuré: Ce type de maillage est plus flexible que le maillage structuré et peut être utilisé pour des géométries complexes.

Maillage hybride: Ce type de maillage combine les avantages des maillages structurés et non structurés.

## Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---

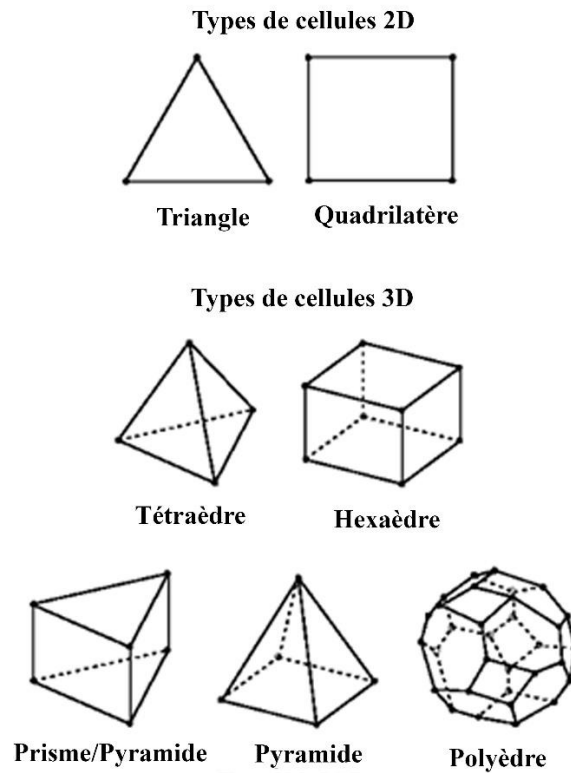


Figure III.2 : Différents types des mailles.

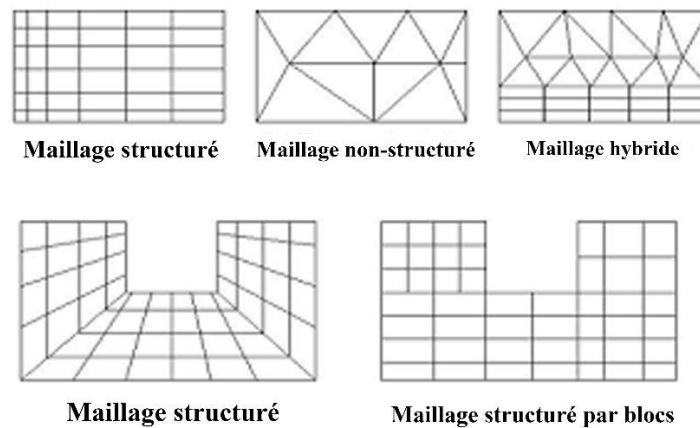


Figure III.3 : Types de maillage utilisé par "FLUENT".

### III.7. Procédure de Simulation dans Ansys workbench

La solution de toute simulation CFD peut être résumée selon le schéma suivant, qui s'applique au logiciel ANSYS workbench.

### Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---

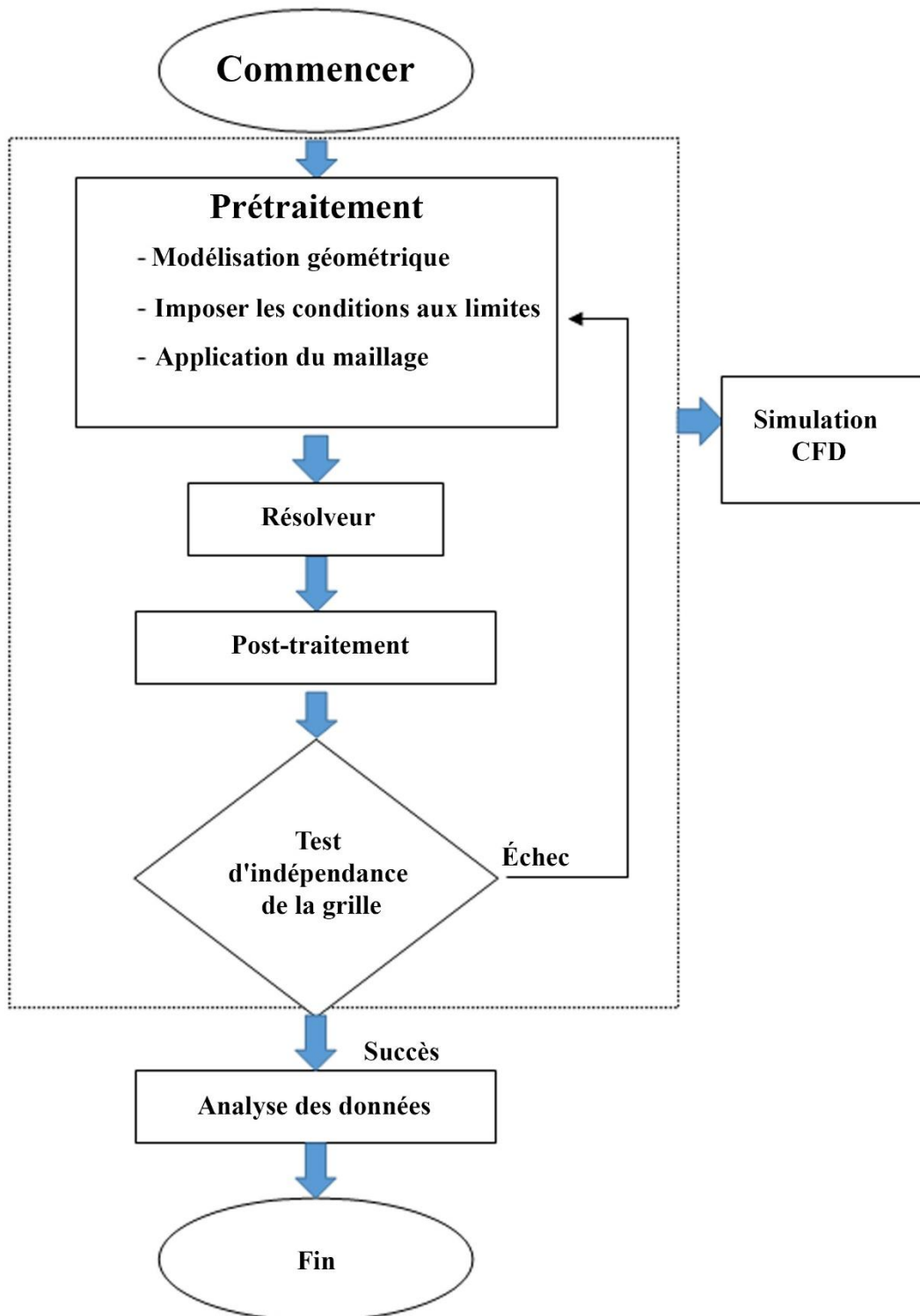


Figure III.4 : organigramme sur les Procédure de Simulation dans Ansys workbench.



# Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

## III.7.1. Préprocesseur (Design Modeler)

La première étape de la simulation consiste à créer une Conception Assistée par Ordinateur (CAO) du domaine physique d'écoulement de fluide à l'aide de Design Modeler. Dans cette étape, il est possible de déterminer la géométrie du système à simuler.

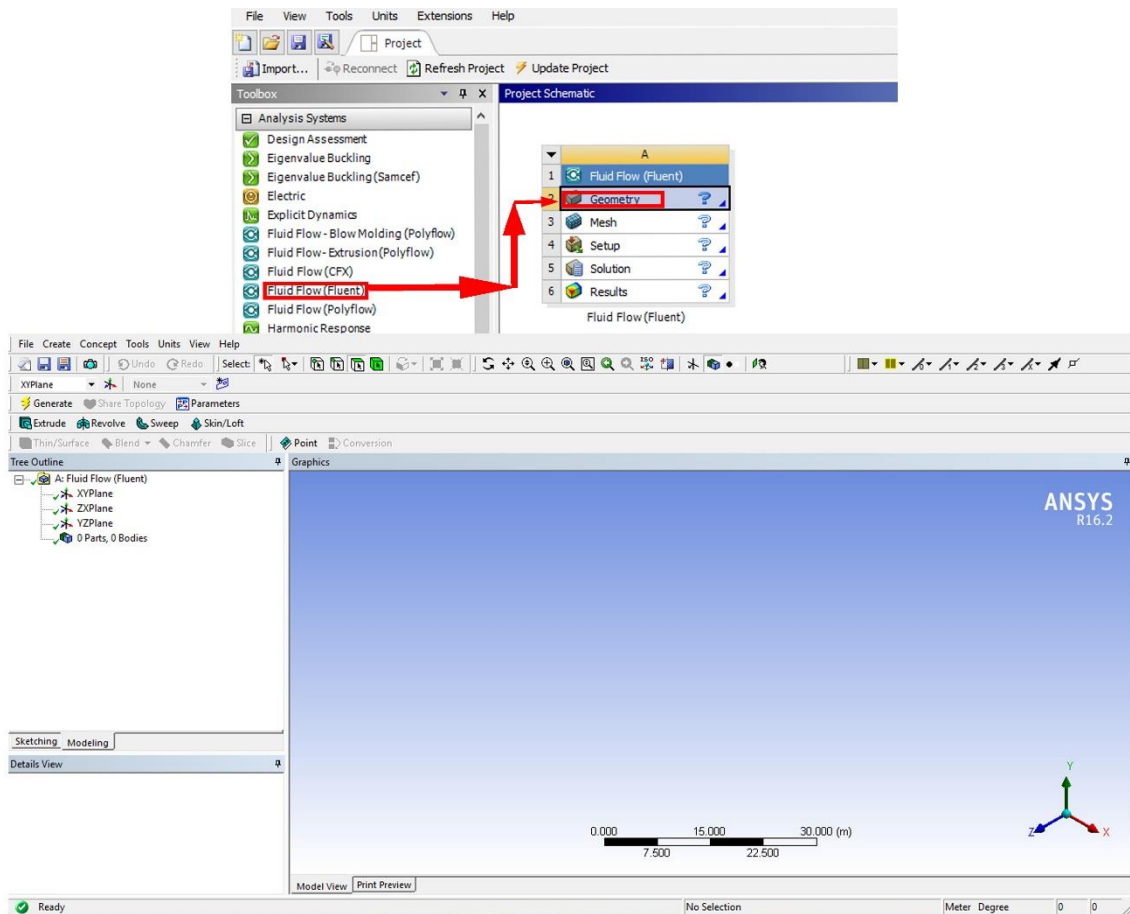


Figure III.5 : Entrez dans l'interface de Design Modeler.

## III.7.2. Génération du Maillage

Une fois la géométrie créée, Ansys Meshing génère le maillage en fonction des paramètres configurés. Les types de maillages choisis influencent directement la qualité des résultats obtenus.

## Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.

---



Figure III.6 : Étapes de maillages.

### III.7.3. Conditions aux limites

Après l'achèvement des dessins géométriques et de leurs maillages, il devient impératif de définir les conditions aux limites. La détermination de ces conditions s'opère en fonction de la nature spécifique du problème abordé, qu'il s'agisse d'entrées, de sorties, de parois, etc.

### III.7.4. Solveur Fluent

Les écoulements fluides et les transferts thermiques peuvent être modélisés, visualisés et analysés à l'aide de la simulation en mécanique des fluides numériques (CFD). Les volumes finis, reconnus pour leur efficacité et leur conservativité, sont la méthode recommandée pour résoudre diverses équations aux dérivées partielles. Cette méthode introduit l'intégralité du flux provenant d'un volume de contrôle dans les volumes voisins. [74].

## **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

### **III.7.5. Post-processeur et Résultats**

Visualisation des résultats:

- Visualiser les résultats de la simulation à l'aide des outils de post-traitement disponibles dans ANSYS FLUENT.
- Créer des graphiques, des contours et des animations pour visualiser les champs de vitesse, de pression, de température et d'autres variables.

Comparaison avec les données expérimentales:

- Comparer les résultats de la simulation avec les données expérimentales disponibles pour valider la simulation.

### **III.7.6. Étude d'indépendance du maillage**

- Effectuer des simulations avec différents niveaux de raffinement du maillage.
- Comparer les résultats des simulations pour différentes tailles de maillage.
- Évaluer l'impact du maillage sur la précision des résultats.
- Choisir un maillage suffisamment fin pour obtenir des résultats précis et fiables.

### **III.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons exploré les fondements de la modélisation mathématique des écoulements de fluides à l'aide de la Dynamique des Fluides Numérique (CFD). Nous avons mis en lumière l'importance des modèles de turbulence dans notre recherche, soulignant leur rôle crucial dans la compréhension des comportements fluidiques complexes, en particulier dans les conduites. La diversité des méthodes de résolution des équations gouvernantes a également été examinée, offrant un aperçu des approches les plus couramment utilisées dans la résolution des problèmes de CFD.

En outre, nous avons présenté en détail Ansys FLUENT, un outil essentiel dans le domaine de la simulation de la dynamique des fluides. Cette introduction a permis de familiariser le lecteur avec les fonctionnalités clés de ce logiciel largement utilisé, ainsi qu'avec le flux de travail typique d'une simulation.

### **Chapitre III : Modélisation mathématique des écoulements de fluides avec CFD : Focus sur la turbulence et utilisation d'Ansys FLUENT.**

---

En résumé, ce chapitre fournit une base solide pour la suite de notre étude. En comprenant les principes de base de la modélisation CFD, en mettant en évidence l'importance des modèles de turbulence et en introduisant Ansys FLUENT, nous sommes désormais bien équipés pour aborder les défis de la simulation numérique dans le chapitre quatre.

# **Chapitre IV**

## **Résultats et interprétations**

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

### IV.1. Introduction

Ce chapitre détaille deux études portant sur l'optimisation des systèmes d'échangeurs de chaleur souterrains à air (ECAST). Les deux ont utilisé une approche de conception factorielle complète, permettant une analyse exhaustive des paramètres clés.

❖ Étude 1 : En s'appuyant sur des données expérimentales, cette étude a mené une analyse statistique examinant trois variables affectant les performances de l'ECAS pendant l'hiver et l'été : la conduction thermique, la longueur du tuyau et la vitesse de l'air. L'objectif était d'identifier les configurations optimales pour le refroidissement estival (maximiser la réduction de la température de l'air) et le chauffage hivernal.

❖ Étude 2 : En utilisant le logiciel Ansys Fluent 16.2, cette étude visait à améliorer encore les performances de l'ECAST dans la région de Timimoun en Algérie. Elle a examiné l'influence de quatre paramètres critiques : la profondeur du tuyau, la longueur du tuyau, la vitesse de l'air et la conductivité thermique des tuyaux en chlorure de polyvinyle (PVC) et en polyéthylène haute densité (PEHD).

### IV.2. Premier modèle

#### IV.2.1. Expérimental

La figure IV.1 illustre la configuration d'un échangeur de chaleur air-sol (ECAS) utilisant deux tuyaux cylindriques horizontaux. Chaque tuyau présente un diamètre intérieur de 0,15 m et une longueur enterrée de 23,42 m. Fabriqués à partir d'une combinaison de PVC et d'acier doux, les tuyaux ont été installés à une profondeur de 2,7 m dans un sol plat caractérisé par un sol sec. Un ventilateur motorisé monophasé d'une puissance de 1 HP fonctionne à 2800 tr/min, maintenant un débit d'air de 0,033 m<sup>3</sup>/s à travers un tuyau vertical connecté aux tuyaux souterrains. Les températures d'entrée et de sortie du tuyau souterrain sont désignées par  $T_{\text{entrée}}$  et  $T_{\text{sortie}}$ , respectivement. Un thermocouple positionné à l'emplacement  $L = 10,03$  m (nommé  $T_1$ ) surveille la température de l'air dans le tuyau. Des vannes permettent de réguler le flux d'air dans chaque tuyau individuel. Les températures d'entrée et les données expérimentales couvrant les saisons estivales et hivernales ont été obtenues à partir des références [49, 50].

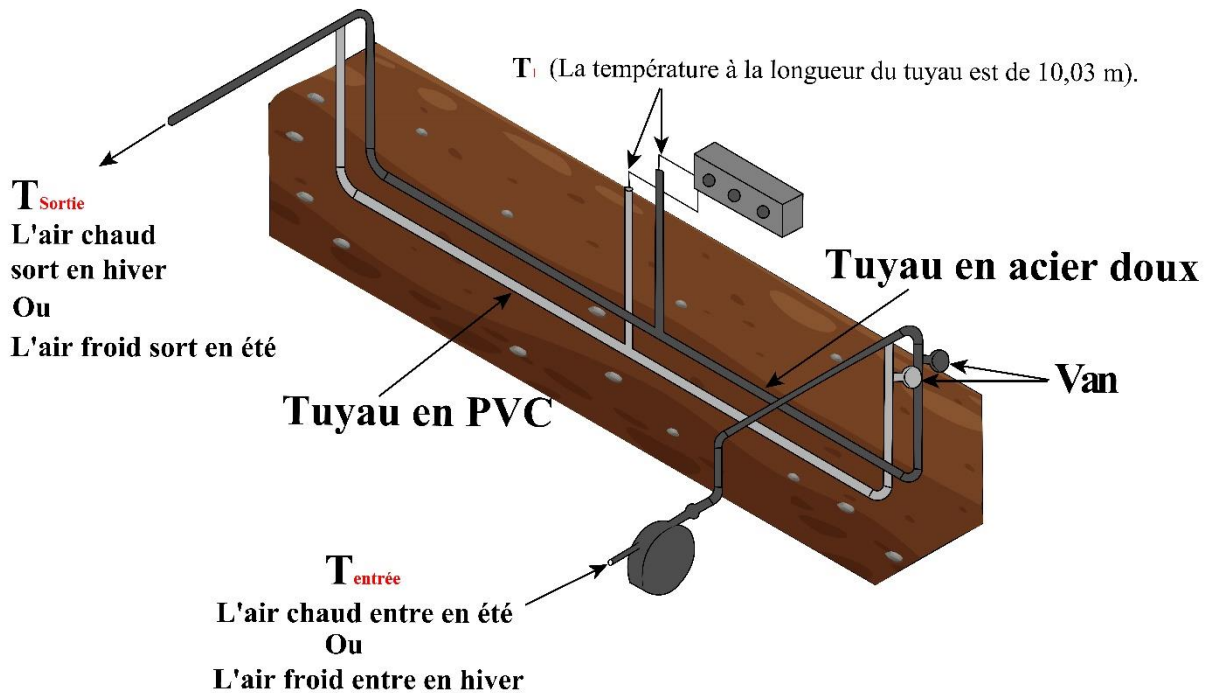


Figure IV.1 : Image Illustrator de l'échangeur air-sol.

### IV.2.2. Plan expérimental

Afin d'évaluer de manière exhaustive les variations systématiques des réponses à travers un ensemble de conditions de mesure, un plan factoriel complet à deux niveaux ( $2^k$ ) a été mis en œuvre. Ce plan a permis d'étudier simultanément toutes les interactions potentielles entre les  $k = 3$  variables indépendantes, éliminant ainsi les effets de confusion qui pourraient survenir lors de l'étude de facteurs isolés [75]. Cette étude a examiné l'influence de trois facteurs clés sur la réponse de température du système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS) : la conductivité du tuyau ( $X_1$ ), variée entre le PVC ( $0,16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) et l'acier doux ( $54 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), la longueur du tuyau ( $X_2$ ) et la vitesse de l'air ( $X_3$ ). La température a servi de variable dépendante (réponse). Le tableau IV.1 présente les trois paramètres et leurs niveaux respectifs utilisés dans l'expérience, désignés par -1 (bas) et 1 (élevé). Le logiciel STATISTICA (Stat Soft, Inc., États-Unis), version 10, a été utilisé pour le traitement et l'analyse des données. Les résultats ont ensuite été analysés avec des intervalles de confiance de 95 %.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV.1 : Plages expérimentales et niveaux des variables indépendantes.

Variable codée ( $X_i$ )	Description	Units	Champ expérimental	
			Valeur minimale (-1)	Valeur maximale (+1)
$X_1$	Conductivité du tuyau	(W/m.k)	0.16	54
$X_2$	Longueur du tuyau	(m)	10.0371	23.42
$X_3$	Vitesse de l'air	(m/s)	2	5

### IV.2.3. Résultats expérimentaux

Le tableau IV.2 présente la matrice de conception du système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS), qui comprend à la fois les variables réelles et les réponses expérimentales. Les variables réelles correspondent aux valeurs effectivement attribuées à la conductivité du tuyau, à la longueur du tuyau et à la vitesse de l'air au cours des essais. Les réponses correspondantes, désignées  $Y_1$  et  $Y_2$ , représentent les résultats de température observés dans des conditions estivales et hivernales.

Tableau IV.2 : Données expérimentales.

Expérience	$X_1$ : Conductivité de la conduite (W/m·K)	$X_2$ : Longueur de la conduite (m)	$X_3$ : Vitesse de l'air (m/s)	Température (K)	
				$Y_1$	$Y_2$
1	0.16	10.037	2	24	35
2	54	10.037	2	24.3	33.6
3	0.16	23.42	2	25.1	33.1
4	54	23.42	2	25.4	31
5	0.16	10.037	5	22.9	37
6	54	10.037	5	23.3	36.5
7	0.16	23.42	5	24.2	34.2
8	54	23.42	5	24.7	33.7



## Chapitre IV : Résultats et interprétations

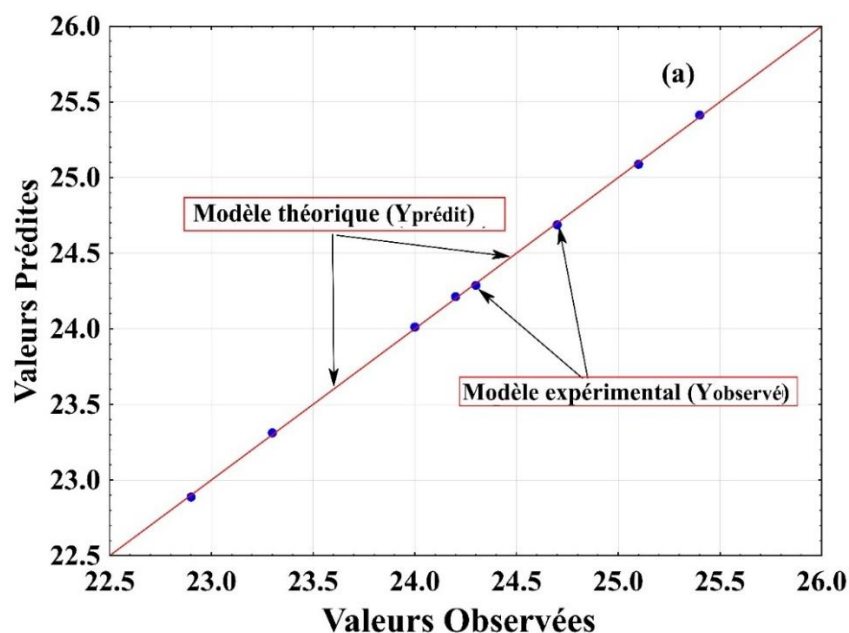
### IV.2.4. Optimisation par plan factoriel complet

Un modèle de régression polynomiale du premier ordre a été développé pour prédire la température d'un échangeur air-sol (ECAS) à partir de données expérimentales. Les équations (IV.1) et (IV.2) présentent le modèle, qui établit la relation entre trois facteurs codés (la conductivité du tuyau,  $X_1$  ; la longueur du tuyau,  $X_2$  ; et la vitesse de l'air,  $X_3$ ) et deux variables de réponse ( $Y_1$  pour l'hiver et  $Y_2$  pour l'été). Ce modèle permet aux chercheurs de prédire la température du système pour des combinaisons spécifiques de facteurs, ce qui facilite l'optimisation de la conception et du fonctionnement de l'ECAS.

$$Y_1 = 24.2375 + 0.1875X_1 + 0.6125X_2 - 0.4625X_3 + 0.0125X_1X_2 + 0.0375X_1X_3 + 0.0625X_2X_3 \quad (\text{IV.1})$$

$$Y_2 = 34.2625 - 0.5625X_1 - 1.2625X_2 + 1.0875X_3 - 0.0875X_1X_2 + 0.3125X_1X_3 - 0.1375X_2X_3 \quad (\text{IV.2})$$

Les figures IV.2a et IV.2b présentent des graphiques de probabilité normale (NPP) pour évaluer la normalité des résidus et les écarts entre les réponses observées et prédites dans nos modèles. La vérification de la normalité des résidus est essentielle pour garantir la validité des inférences statistiques tirées du modèle. L'axe horizontal des deux NPP représente les valeurs prédites, tandis que l'axe vertical représente les valeurs observées. Le regroupement étroit des points de données autour de la ligne de référence diagonale dans les deux figures suggère que les résidus suivent une distribution normale, ce qui confirme la validité de nos modèles et la fiabilité des conclusions qui en découlent.



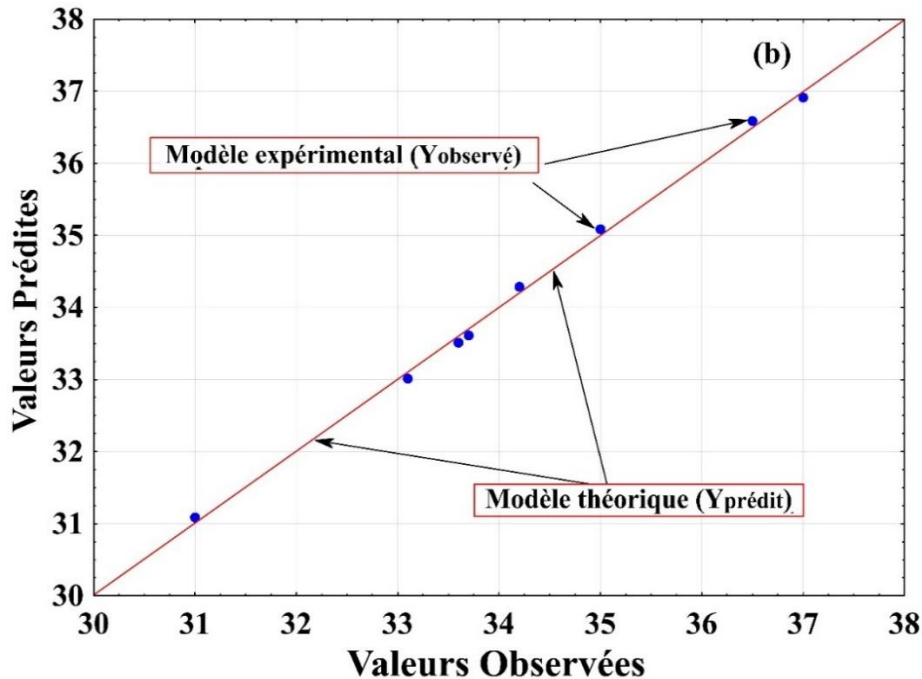


Figure IV.2 : Graphique de probabilité normale des résidus. (a) Représente les résultats de la saison hivernale. (b) Représente les résultats de la saison estivale.

Le tableau IV.3 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) effectuée pour la saison hivernale. La valeur F du modèle de 671,67 indique un ajustement du modèle très significatif ( $p < 0,001$ ). Cela implique une probabilité négligeable de 2,95 % d'observer une telle valeur F par hasard, ce qui appuie fortement la signification statistique du modèle. L'examen des termes individuels du modèle révèle des effets statistiquement significatifs pour la conductivité du tuyau ( $X_1$  ;  $p = 0,0424$ ), la longueur du tuyau ( $X_2$  ;  $p = 0,0130$ ) et la vitesse de l'air ( $X_3$  ;  $p = 0,0172$ ). Il est important de noter qu'aucun des termes d'interaction ( $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$ ,  $X_2X_3$ ) n'a atteint une signification statistique (tous  $p > 0,05$ ). Le terme d'erreur représente la variabilité non expliquée avec une moyenne quadratique (MS) de 0,00125. La somme des carrés (SS) totale sert de mesure globale de la variabilité de la variable de réponse.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV.3 : Résultats de l'ANOVA pour l'hiver.

	Effet	SS	Df	MS	Ratio F	Valeur p
Modèle		5.04	6	0.8396	671.67	0.0295*
(X <sub>1</sub> ) Conductivité de la conduite	0.375	0.28125	1	0.28125	225	0.042379*
(X <sub>2</sub> ) Longueur de la conduite	1.225	3.00125	1	3.00125	2401	0.012990*
(X <sub>3</sub> ) Vitesse de l'air	-0.925	1.71125	1	1.71125	1369	0.017202*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	0.025	0.00125	1	0.01125	1	0.5
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.075	0.01125	1	0.01125	9	0.2048
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.125	0.03125	1	0.03125	25	0.1256
Erreur		0.00125	1	0.00125		
Somme totale des carrés		5.03875	7			

Le tableau IV.4 présente les résultats de l'analyse de variance (ANOVA) pour la saison estivale. La valeur F du modèle de 70,03 indique un ajustement statistiquement significatif ( $p = 0,0912$ ). Bien que ce niveau de signification soit légèrement supérieur au seuil conventionnel de 0,05, il suggère néanmoins que le modèle explique les données mieux que le hasard. L'examen des termes individuels du modèle révèle que seule la longueur du tuyau (X<sub>2</sub>) présente un effet statistiquement significatif ( $p = 0,0441$ ). Il est important de noter que tous les termes d'interaction (X<sub>1</sub>X<sub>2</sub>, X<sub>1</sub>X<sub>3</sub> et X<sub>2</sub>X<sub>3</sub>) n'ont pas de signification statistique (tous  $p > 0,05$ ). Le terme d'erreur représente la variabilité non expliquée avec une moyenne quadratique (MS) de 0,06125.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV.4 : Résultats de l'ANOVA pour l'été.

	Effet	SS	Df	MS	Ratio F	Valeur p
Modèle		25.74	6	4.29	70.03	0.0912
(X <sub>1</sub> ) Conductivité de la conduite	-1.125	2.53125	1	2.53125	41.3265	0.098242
(X <sub>2</sub> ) Longueur de la conduite	-2.525	12.75125	1	12.75125	208.1837	0.044052*
(X <sub>3</sub> ) Vitesse de l'air	2.175	9.46125	1	9.46125	154.4694	0.051112
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	-0.175	0.06125	1	0.06125	1	0.5
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	0.625	0.78125	1	0.78125	12.7551	0.173803
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	0.275	0.15125	1	0.15125	2.4694	0.360791
Erreur		0.06125	1	0.06125		
Somme totale des carrés		25.79875	7			

Figure IV.3 présente des cartes de contours de température à l'intérieur de l'échangeur air-sol (ECAS) à un débit d'air constant de 5 m/s. Cette visualisation met en évidence l'influence conjointe de la longueur des tuyaux (variant de 8 à 24 m) et de la conductivité thermique (de 0 à 60 W/m.K) sur la distribution de la température. On observe que les températures plus élevées (représentées en rouge) se concentrent vers la sortie et s'intensifient avec l'augmentation de la conductivité, comme le montre l'utilisation de tuyaux en acier doux (54 W/m.K). En outre, l'allongement des tuyaux à 21–24 m favorise encore l'extraction de chaleur, suggérant un équilibre optimal pour maximiser les performances de l'ECAS.

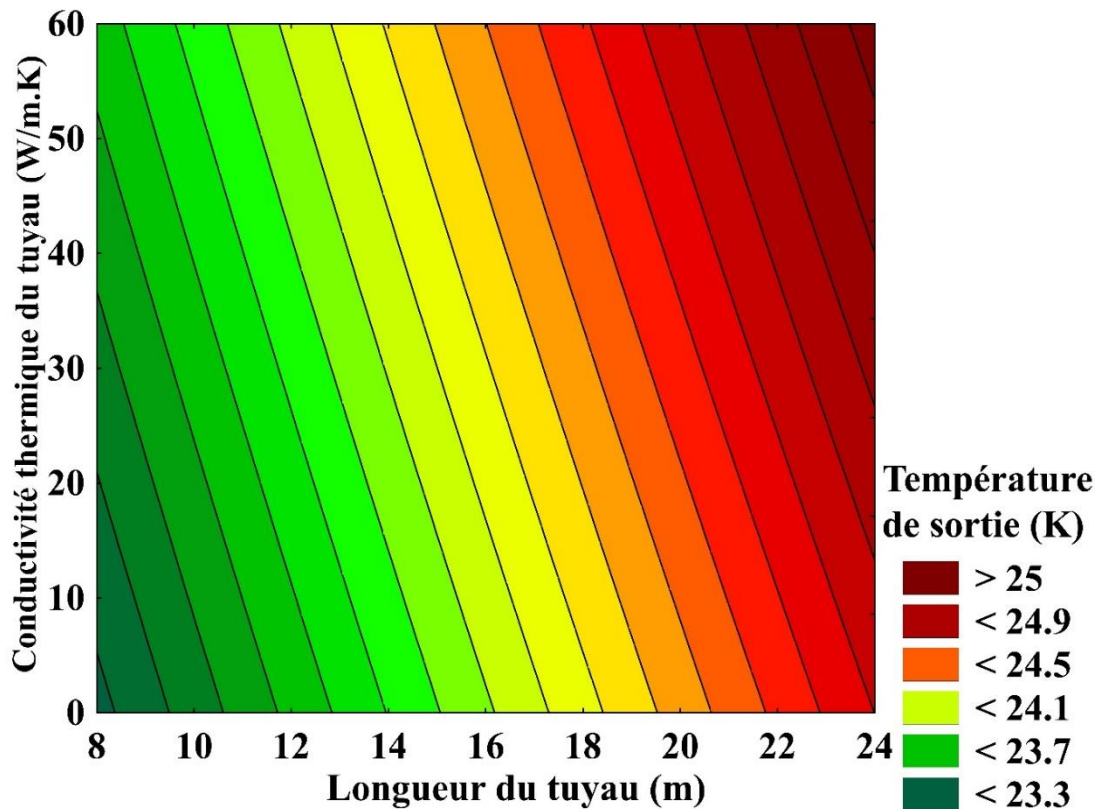


Figure IV.3 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la conductivité du tuyau sur la distribution de la température pour les saisons d'hiver.

Figure IV.4 présente la distribution de la température à l'intérieur de l'échangeur air-sol (ECAS) en fonction de la longueur des tuyaux et de la vitesse de l'air. L'axe horizontal représente la longueur des tuyaux (variant de 8 à 24 m), tandis que l'axe vertical représente la vitesse de l'air (variant de 1,5 à 5,5 m/s). La carte de couleurs indique la température de l'ECAS, avec des tons verts signifiant des températures inférieures à 22,5 °C et des teintes rouges indiquant des températures supérieures à 25 °C. Il est important de noter que l'analyse a été réalisée avec une conductivité thermique constante de 0,16 W/m.K. La figure révèle une diminution significative de la température de l'air avec l'augmentation de la vitesse de l'air. Cette observation peut être attribuée à la réduction du temps de résidence de l'air dans les tuyaux, ce qui limite l'échange de chaleur avec le sol environnant et abaisse la température de l'air sortant.

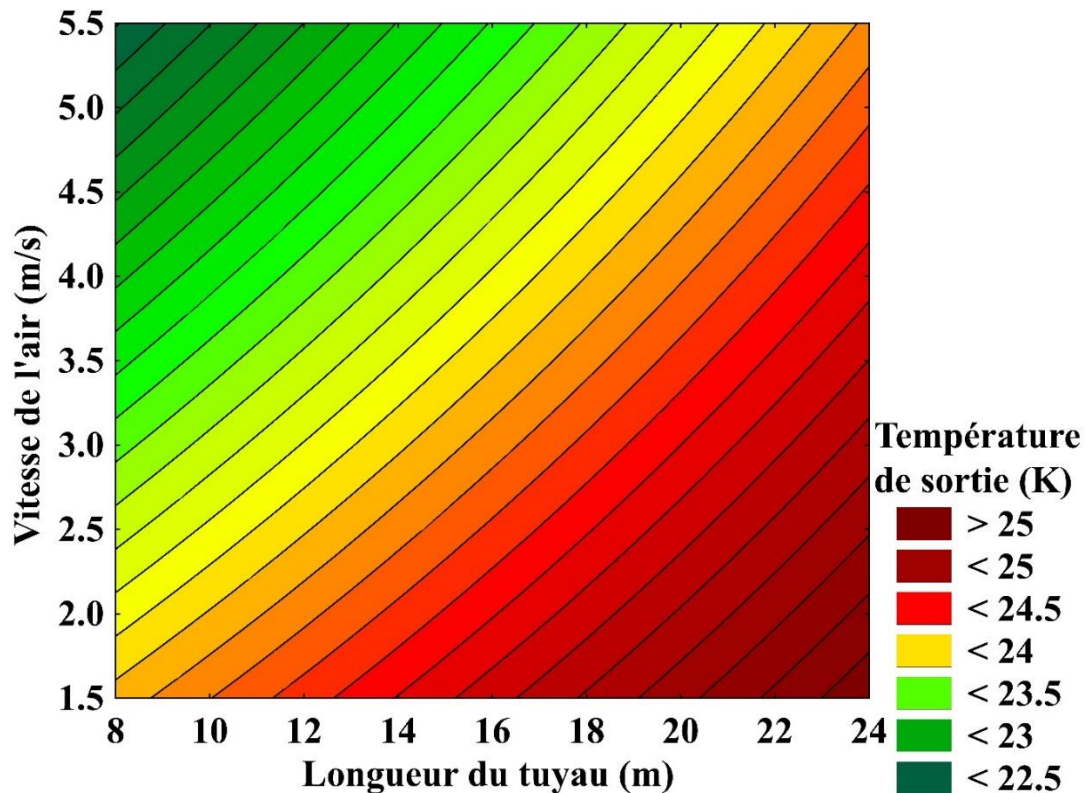


Figure IV.4 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la vitesse de l'air sur la distribution de la température pour les saisons d'hiver.

Les Figures IV.3 et IV.4 illustrent les performances de la saison hivernale, où il est crucial de maximiser la température de l'air pour les applications de chauffage. L'analyse révèle qu'atteindre des températures dépassant 24,5°C nécessite une vitesse de l'air inférieure à 2,5 m/s et une longueur de tuyau dépassant 20 m, avec 22 m représentant l'équilibre optimal. Prolonger le tuyau au-delà de ce point donne des rendements décroissants et devient progressivement impraticable. De plus, l'utilisation de tuyaux à haute conductivité thermique améliore encore la sortie de température.

Figure IV.5 représente la distribution de la température à l'intérieur du tuyau en fonction de la longueur du tuyau et de la vitesse de l'air. L'axe des x représente la longueur du tuyau, variant de 8 à 24 m, tandis que l'axe des y représente la vitesse de l'air, variant de 1 à 5,5 m/s. Une carte de couleurs encode visuellement la plage de température (32,75°C à 37°C), avec des nuances plus froides de vert signifiant des températures plus basses et des nuances plus chaudes de rouge indiquant des températures plus élevées. La température la plus élevée est observée au début du tuyau (8 m), correspondant à l'air ayant la température initiale la plus

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

élevée. Au fur et à mesure que l'air circule dans le tuyau, il subit un refroidissement progressif dû à l'échange de chaleur avec le sol environnant. Cet effet de refroidissement diminue avec l'augmentation de la vitesse de l'air, ce qui suggère un temps de résidence réduit pour l'échange de chaleur avec le sol.

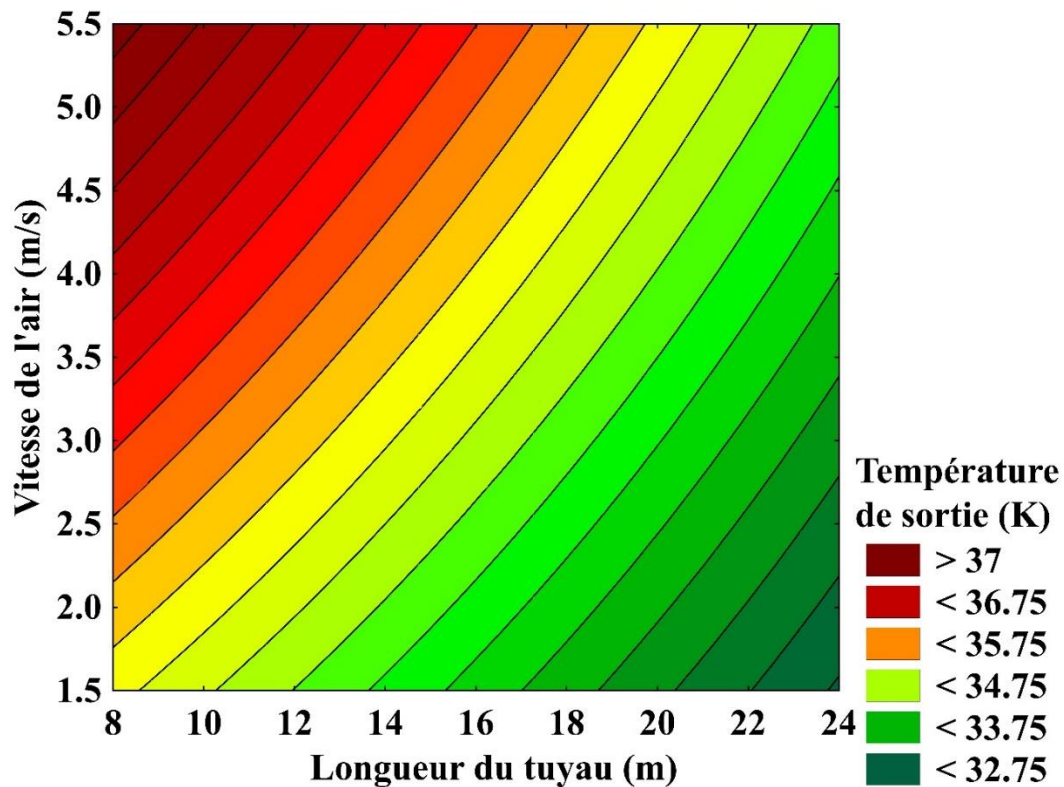


Figure IV.5 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la vitesse de l'air sur la distribution de la température pour les saisons d'été.

La Figure IV.6 présente la distribution de température à l'intérieur du système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS) en fonction de la longueur du tuyau et de la conductivité thermique. L'axe des x représente la longueur du tuyau, allant de 8 à 24 m, tandis que l'axe des y représente la conductivité thermique, variant entre 0 et 60 W/m.K. Le dégradé de couleurs représente la température, avec des teintes de vert indiquant des températures plus fraîches (<32,25°C) et des teintes de rouge signifiant des températures plus chaudes (>36°C).

Comme prévu, les résultats démontrent que les températures les plus fraîches se situent dans le quadrant supérieur droit de la figure, correspondant à des tuyaux plus longs avec une conductivité thermique plus élevée. Cette observation est conforme à la surface accrue des tuyaux plus longs, facilitant un échange de chaleur plus important avec le sol environnant. De plus, les matériaux présentant une conductivité thermique plus élevée offrent

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

une efficacité accrue dans le transfert de chaleur. En revanche, les températures les plus chaudes sont concentrées dans le quadrant inférieur gauche, caractérisé par des tuyaux plus courts avec une conductivité thermique plus faible.

Pour un fonctionnement optimal en été, l'étude suggère d'utiliser une conductivité thermique de 54 W/m.K, des longueurs de tuyau comprises entre 20 et 22 m, et de maintenir un ratio de vitesse d'écoulement d'air inférieur à 2,5 m/s.

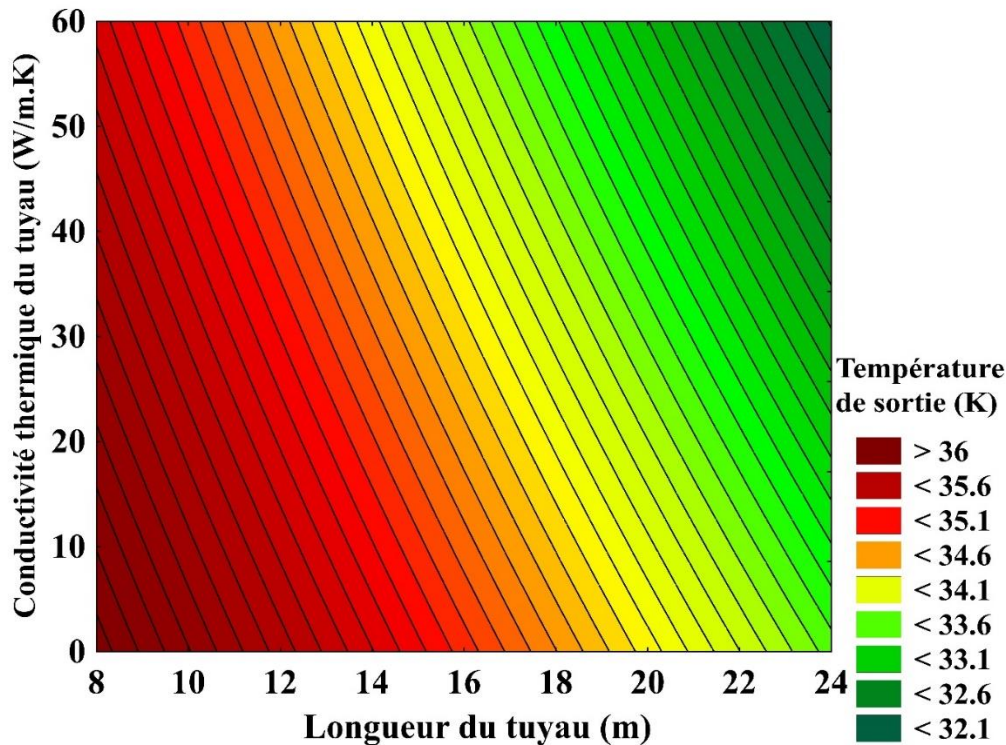


Figure IV.6 : Illustre l'influence de la longueur du tuyau et de la conductivité du tuyau sur la distribution de la température pour les saisons d'été.

### IV.2.5. Pourcentage de contribution de chaque paramètre

Figure IV.7 présente les contributions relatives de chaque composante aux fluctuations de température totales en hiver et en été. La longueur du tuyau est le facteur dominant dans les deux saisons, contribuant à 59,56 % et 49,43 % de la variance en hiver et en été, respectivement. La vitesse de l'air est le deuxième paramètre le plus influent, représentant 33,96 % et 36,67 % de la variation en hiver et en été, respectivement. En revanche, la conductivité thermique a une influence considérablement plus faible, contribuant à 5,58 % en hiver et à 9,81 % en été sur la plage mesurée.



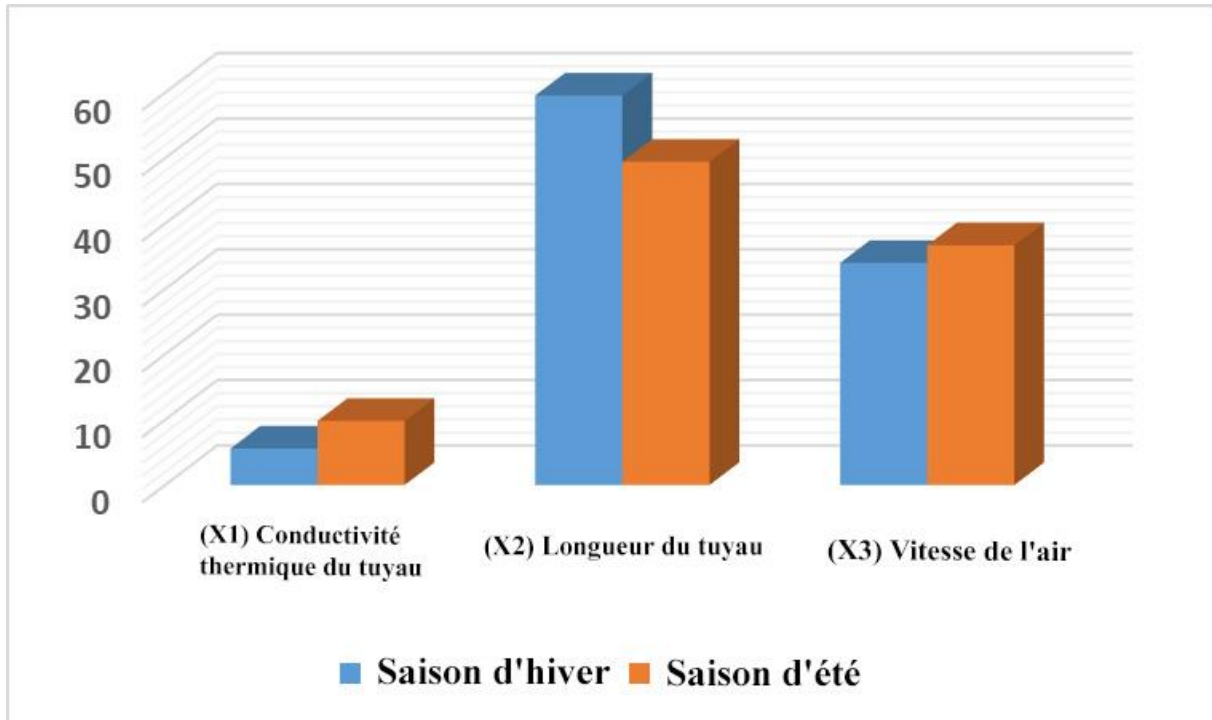


Figure IV.7 : Contribution en pourcentage de chaque paramètre.

### IV.3. Deuxième modèle

#### IV.3.1. Modèle physique et distribution du maillage

Cette étude utilise le logiciel Ansys Fluent 16.2 pour réaliser une simulation numérique par dynamique des fluides (CFD) du système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAST), en se focalisant sur le modèle physique. La méthodologie adoptée comporte les étapes suivantes :

- Construction du modèle géométrique: Le logiciel ANSYS Workbench DESIGN MODELER est utilisé pour construire et affiner le modèle de simulation tridimensionnel. Le domaine de calcul est discrétisé en sous-domaines représentant le "domaine-air", le "domaine-sol" et le "domaine-tuyau", comme illustré dans les Figures IV.8 et IV.9. Cette discrétisation facilite une analyse détaillée du transfert de chaleur au sein de chaque sous-domaine individuel.
- Paramètres du modèle: La géométrie du tuyau est définie par une longueur de 20 m, un diamètre intérieur de 0,1 m et une épaisseur de paroi de 0,01 m. Le sol environnant est modélisé avec une épaisseur de 0,49 m, conformément aux observations présentées dans la référence [76]. Les résultats indiquent que l'influence de l'air atteint une

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

profondeur de 0,25 m en trois heures, s'étendant à 0,3 m et 0,45 m après cinq et huit heures, respectivement.

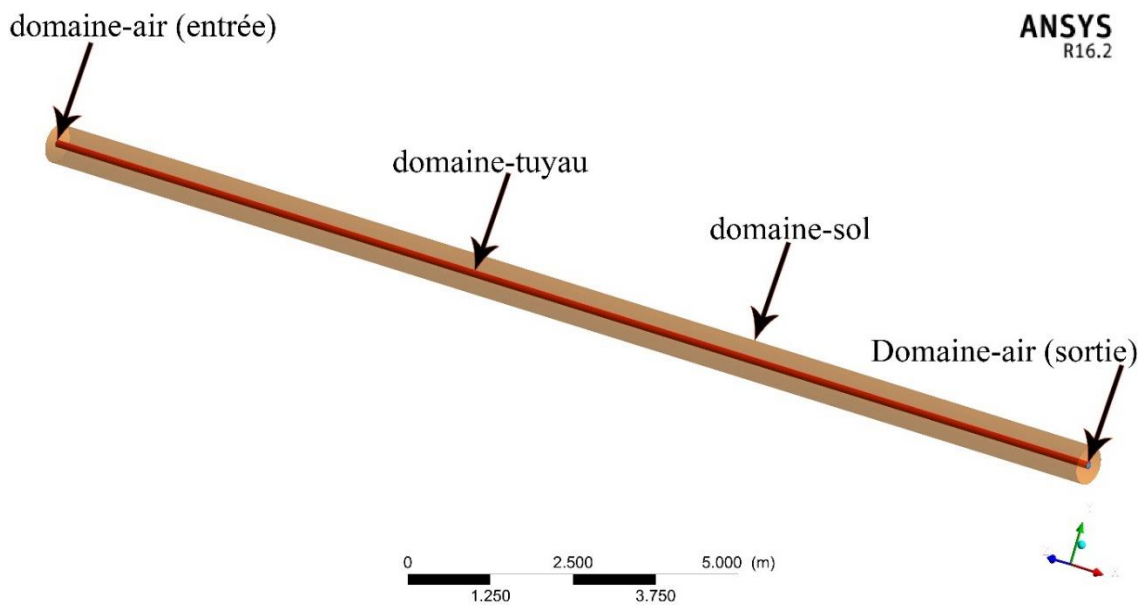


Figure IV.8 : Modèle physique.

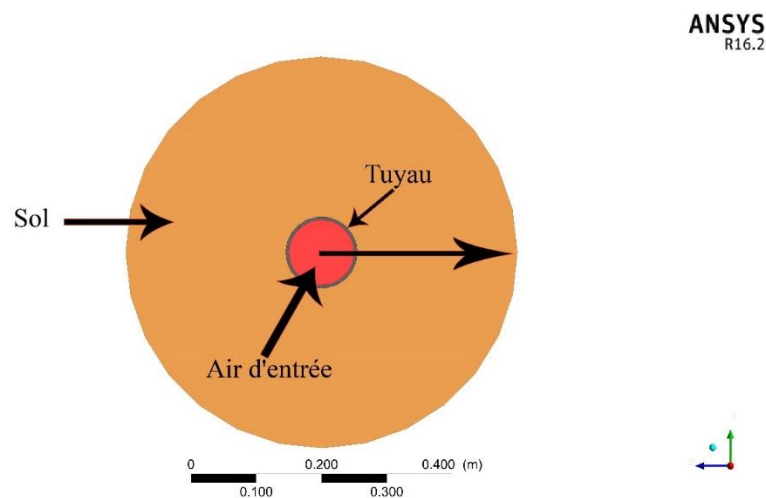


Figure IV.9 : Le plan de section de l'ECAST.

Distribution du Maillage: La simulation a employé une stratégie de maillage hybride 3D, combinant des éléments hexaédriques et tétraédriques pour atteindre un équilibre entre précision et efficacité computationnelle. Le maillage résultant est visualisé dans la Figure IV.10. La taille d'élément de 0,02 m a été choisie après une analyse de sensibilité du maillage pour garantir un bon équilibre entre précision et coût computationnel. Tous les paramètres

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

d'entrée du cas de validation ont été sélectionnés avec soin pour correspondre aux conditions de l'expérience sur le terrain, comme le montre le Tableau IV.5.

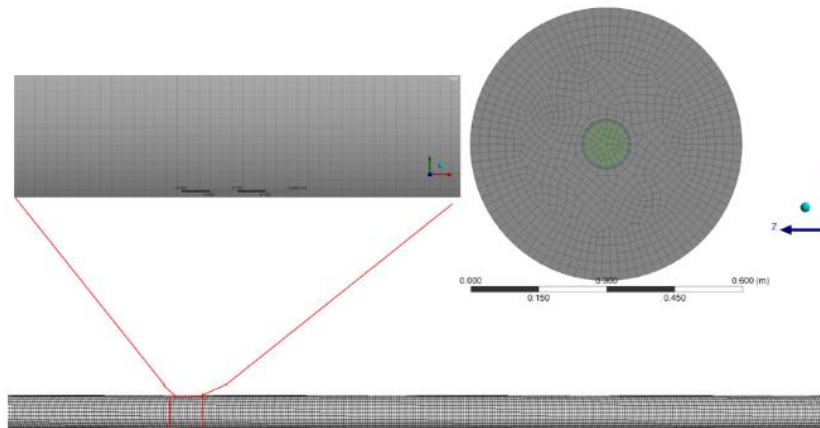


Figure IV.10 : Modèle de maillage pour l'ECAST.

Tableau IV.5 : Paramètres d'entrée pour les simulations.

Paramètre	Units	Valeurs
Diamètre extérieur	m	0.11
Diamètre intérieur	m	0.1
Longueur	m	20
Tuyau PVC		
Conductivité thermique	W/m.K	0.16
Chaleur spécifique	J/kg.K	900
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1380
Sol		
Conductivité thermique	W/m.K	0.52
Chaleur spécifique	J/Kg.K	1840
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	2050
Air		
Conductivité thermique	W/m.K	0.02
Chaleur spécifique	J/kg <sup>-1</sup> .K	1006
Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1.22
Conditions de fonctionnement		
Température d'entrée pour validation [63]	K	313.15
Température d'entrée pour l'étude de l'indépendance du maillage [64]	K	319.15
Températures du sol à des profondeurs de 3m [63]	K	300.2
Vitesse de l'air initiale [63]	m/s	5

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

### IV.3.2. Hypothèses du Modèle

Afin de maximiser l'efficacité computationnelle et de focaliser l'analyse sur les mécanismes clés du transfert de chaleur, le modèle numérique intègre plusieurs hypothèses simplificatrices:

#### 1. Propriétés du Sol:

Le sol est considéré comme isotrope et doté de propriétés thermiques constantes, incluant la capacité calorifique et la conductivité thermique. Cette hypothèse implique une homogénéité du matériau et ne prend pas en compte les variations potentielles dues à la teneur en eau, à la composition ou à la stratification.

#### 2. Écoulement de l'Air:

L'air circulant dans le système est assimilé à un fluide incompressible et ses caractéristiques thermiques sont supposées constantes. Cette simplification facilite les calculs de la dynamique des fluides mais peut ne pas être applicable pour toutes les conditions de fonctionnement ou les pertes de charge.

#### 3. Mécanismes de Transfert de Chaleur:

Le modèle prend en compte les transferts de chaleur par convection et conduction au sein du système. Néanmoins, les transferts de chaleur radiatifs et latents sont négligés. Cette simplification permet d'alléger le bilan énergétique mais peut sous-estimer l'échange de chaleur dans certaines conditions, notamment celles impliquant des températures élevées ou des variations d'humidité.

#### 4. Interface Sol-Tuyau:

Le tuyau et le sol environnant sont supposés être en contact thermique parfait, ce qui implique une résistance thermique négligeable à leur interface. Cette hypothèse élimine une source potentielle de résistance au transfert de chaleur, mais elle peut ne pas correspondre parfaitement à la réalité, notamment en présence de lacunes interfaciales ou de poches d'air.

#### 5. Température Initiale du Sol:

La température du sol adjacent est supposée uniforme et égale à la température initiale de la surface externe du tuyau. Cette simplification facilite la définition des conditions initiales mais peut ne pas refléter les profils complexes de température du sol ou les interactions transitoires.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

### IV.3.3. Conditions aux Limites

La simulation numérique s'appuie sur un ensemble de conditions aux limites rigoureusement définies pour garantir une représentation précise du système physique.

Entrée et Sortie:

- **Entrée d'Air:** L'entrée de l'ECAS est soumise à une condition aux limites de type "Entrée de Vitesse" avec un profil de vitesse uniforme conforme à la référence [76]. De plus, une turbulence d'intensité 5% est appliquée pour reproduire des conditions d'écoulement d'air réalistes.
- **Flux de Chaleur Nul:** Les faces d'entrée et de sortie de l'ECAS se voient attribuer une condition aux limites de flux de chaleur nul, assurant une distribution de température cohérente au sein du système.
- **Domaine du Sol: Parois Supérieure et Inférieure:** Des conditions aux limites isothermes sont appliquées aux parois supérieure et inférieure du domaine du sol, reflétant la température constante à la profondeur d'enfouissement et représentant fidèlement le comportement thermique du sol environnant.
- **Parois Latérales:** Des conditions aux limites adiabatiques sont assignées aux parois latérales, reconnaissant leur influence minime sur le transfert de chaleur au sein de l'ECAS.
- **Limites Distantes:** Des conditions aux limites de température fixe sont imposées aux limites distantes du domaine du sol, représentant les couches plus profondes où la variation de température est négligeable. Ce choix optimise l'efficacité computationnelle tout en capturant les aspects essentiels du transfert de chaleur, corroboré par des études antérieures [78, 52].
- **Interface Sol-Tuyau:** Une condition aux limites couplée de transfert de chaleur est mise en œuvre à l'interface sol-tuyau, intégrant des conditions de non-glissement pour la vitesse et la température sur les surfaces du conduit. Cette condition aux limites est essentielle pour capturer l'interaction cruciale entre l'air circulant dans l'ECAS et le sol environnant.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

### IV.3.4. Analyse de la solution technique et de la convergence

Cette étude numérique utilise l'algorithme de Navier-Stokes basé sur la pression, couplé à la méthode SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) pour le couplage pression-vitesse. La discrétisation du gradient de pression est réalisée par la méthode LSCB (Least Squares Cell-Based), tandis que les termes advectifs dans les équations de transport sont discrétisés par des techniques d'ordre deux (upwind). Le modèle de turbulence k- $\epsilon$  réalisable avec des fonctions de paroi standard est utilisé pour prendre en compte les effets de turbulence. La convergence à chaque pas de temps est atteinte lorsque les critères suivants sont satisfaits :

- Continuité :  $10^{-3}$
- Vitesses :  $10^{-3}$
- k- $\epsilon$  :  $10^{-3}$
- Énergie :  $10^{-6}$
- Un pas de temps de 60 secondes est utilisé.

### IV.3.5. Étude de l'indépendance du maillage pour la température de sortie de l'ECAS

La Figure IV.11 présente les résultats d'une étude de l'indépendance du maillage examinant la sensibilité de la température de sortie de l'ECAS à la résolution du maillage. L'étude a varié la taille des éléments (0,12 m, 0,1 m, 0,06 m et 0,02 m) tout en ajustant le nombre d'éléments correspondant pour maintenir la densité du maillage.

Malgré les variations de la taille des éléments, la température de sortie de l'ECAS a présenté des fluctuations minimales, avec des valeurs respectives de 305,038 K, 305,190 K, 305,290 K et 305,042 K. Cette cohérence démontre l'indépendance du maillage des résultats, garantissant leur précision.

Compte tenu de l'équilibre entre l'efficacité computationnelle et la précision, une taille d'élément de 0,02 m est jugée appropriée pour les simulations ultérieures.

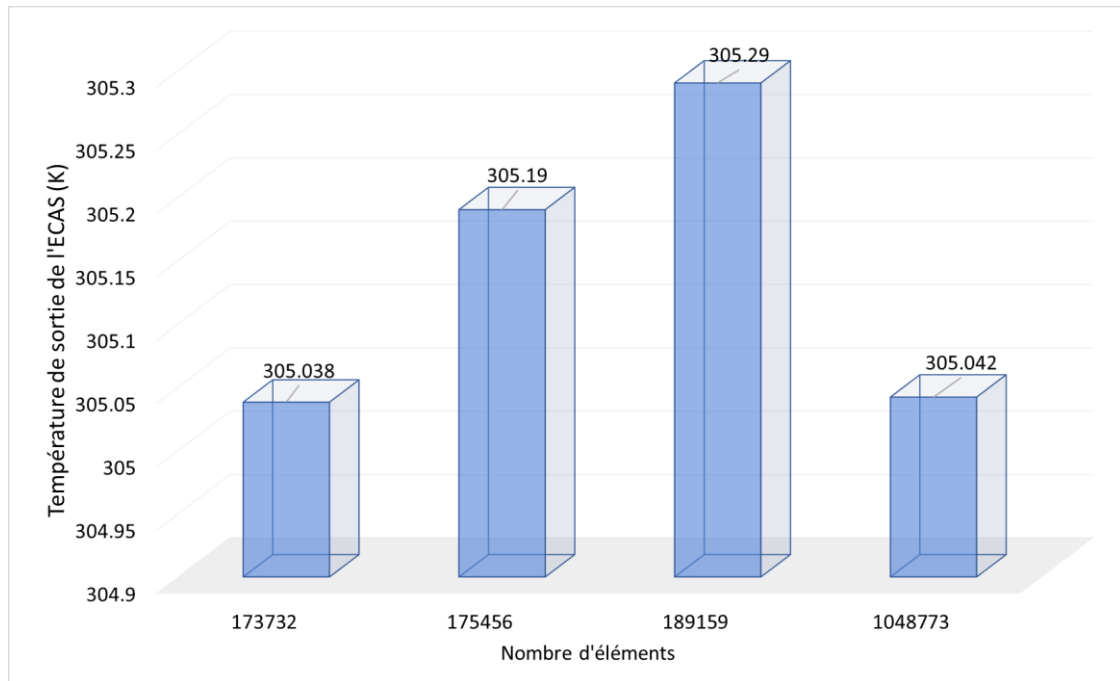


Figure IV.11 : Étude d'indépendance de maillage pour l'ECAS.

### IV.3.6. Validation du modèle de simulation d'échangeur de chaleur air-sol (ECAS)

Afin de garantir la précision et la fiabilité de notre modèle de simulation d'ECAS, un processus de validation rigoureux a été mené. Ce processus consistait à comparer nos résultats computationnels aux données expérimentales obtenues par Misra et al. [77].

La comparaison, illustrée dans les Figures IV.12 et IV.13, a révélé une concordance exceptionnelle entre les deux modèles, avec une erreur relative de seulement 0,2 %.

Cet excellent accord entre les résultats du modèle et les données expérimentales confirme la crédibilité et la validité de notre approche de simulation. Cette validation renforce la confiance dans la capacité du modèle à fournir des analyses et des prédictions précises pour des applications futures.

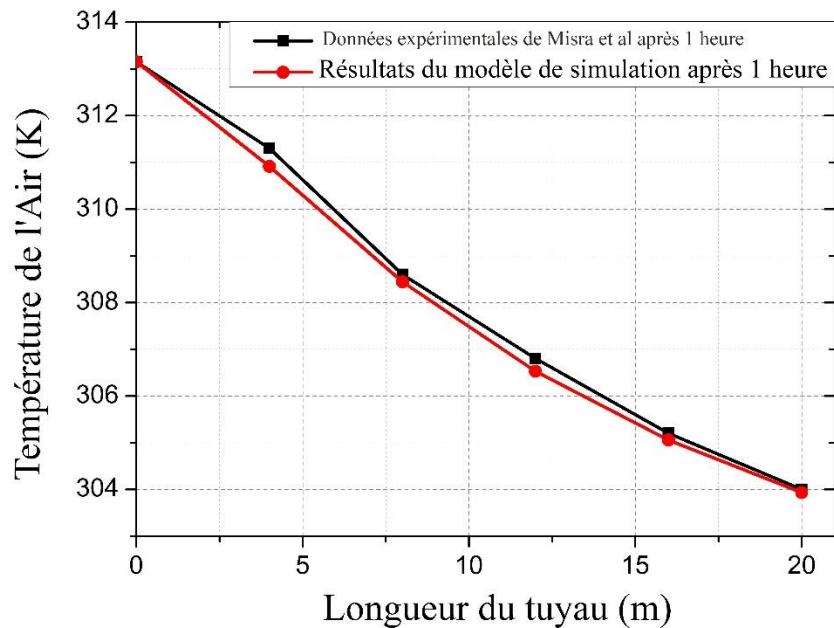


Figure IV.12 : Comparaison des données CFD actuelles et des données expérimentales publiées par [77].

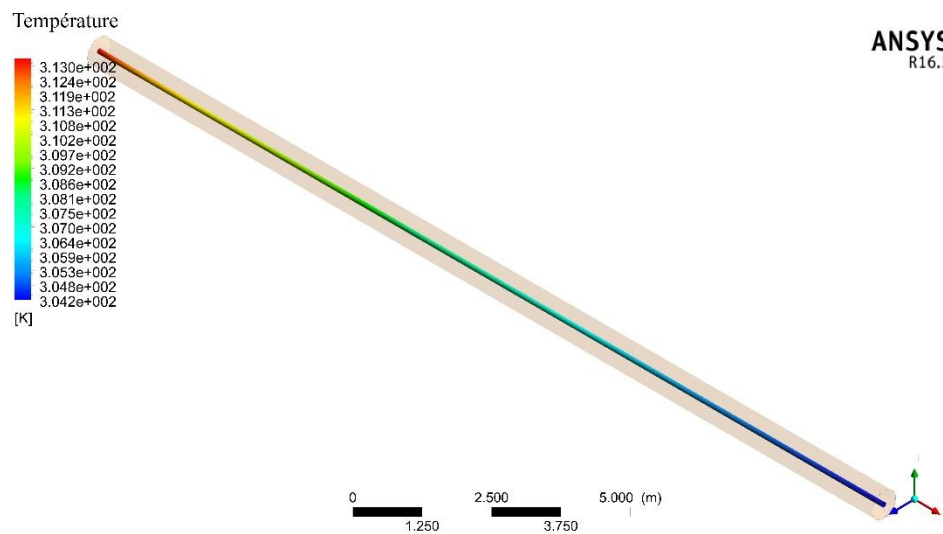


Figure IV.13 : Répartition de la température sur une durée d'une heure.

### IV.3.7 Approche du plan d'expérience factoriel complet

Cette étude utilise une conception expérimentale pour optimiser l'efficacité des systèmes ECAST. Un plan d'expérience factoriel complet ( $2^k$ ) est mis en œuvre pour étudier systématiquement les effets combinés de plusieurs facteurs sur la variable de réponse, une approche courante dans les études multifactorielles [79]. Cette méthodologie permet



## Chapitre IV : Résultats et interprétations

d'explorer efficacement l'espace des paramètres tout en minimisant le nombre d'expériences nécessaires. Après la validation réussie du modèle de simulation par rapport aux données expérimentales de Bansal et al. [77], l'étude a examiné l'influence de quatre variables indépendantes clés ( $k=4$ ) sur les performances de l'ECAS pendant la période estivale :

$X_1$  : Profondeur du Tuyau (m) : Profondeur des tuyaux souterrains dans le système ECAST.

$X_2$  : Longueur du Tuyau (m) : Longueur totale des tuyaux dans le système ECAST.

$X_3$  : Vitesse de l'Air (m/s) : Vitesse de l'écoulement d'air à travers le système.

$X_4$  : Conductivité Thermique du Tuyau (W/m.K). Conductivité thermique des tuyaux, en tenant compte des matériaux PVC et PEHD.

La variable de réponse, représentant la température ( $^{\circ}\text{C}$ ), est utilisée pour évaluer les performances du système ECAST sous différentes combinaisons de ces variables indépendantes. Ces quatre facteurs ont été choisis en raison de leur impact connu sur les performances de l'ECAST. Pour explorer de manière exhaustive l'espace des paramètres, toutes les combinaisons possibles de deux niveaux, faible (-1) et élevé (+1), ont été étudiées. Cette analyse exhaustive est présentée dans le Tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Niveaux des facteurs.

Facteur	Paramètre	Unités	Niveau bas (-1)	Niveau élevé (+1)
$X_1$	Profondeur du tuyau	m	2	5
$X_2$	Longueur du tuyau	m	10	20
$X_3$	Vitesse de l'air	m/s	3	6
$X_4$	Conductivité thermique du tuyau	W/m.k	0.16	0.461

Dans le plan d'expérience factoriel complet, le nombre total de séries uniques dans cette étude est comme suit dans l'équation (IV.3)

$$Runs = L^K = 2^4 = 16 \quad (IV.3)$$

L représente le nombre de niveaux, et k représente le nombre de facteurs.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

### IV.3.8. Analyse statistique

L'influence de chaque facteur sur la variable de réponse a été évaluée par une analyse de variance (ANOVA), utilisant les valeurs de p comme mesure de la signification statistique [80]. Des valeurs de p plus faibles ( $< 0,05$ ) indiquent une association plus forte entre le facteur et la réponse, suggérant une signification statistique.

Plusieurs outils graphiques ont été utilisés pour interpréter visuellement le plan d'expérience factoriel et ses effets:

Graphiques analysant l'influence des facteurs individuels: Ces graphiques permettent de visualiser l'effet de chaque facteur sur la variable de réponse, en maintenant les autres facteurs constants.

Graphiques de contour illustrant les effets d'interaction: Ces graphiques permettent de visualiser comment l'effet d'un facteur sur la variable de réponse dépend du niveau d'un autre facteur. Toutes les analyses de données ont été réalisées dans le logiciel STATISTICA version 10 (StatSoft Inc., États-Unis), assurant une évaluation rigoureuse et complète des résultats expérimentaux.

### IV.3.9. Analyse paramétrique des ECAST dans la région de Timimoun, Algérie

Cette étude vise à optimiser l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur air-sol (ECAST) dans la région de Timimoun, au sud de l'Algérie. À travers une analyse paramétrique, nous identifions les paramètres clés influençant les performances et les optimisons pour une efficacité accrue. En utilisant le logiciel ANSYS Fluent, nous avons mené 16 simulations basées sur un ensemble de conditions de fonctionnement et de propriétés des matériaux résumées dans le Tableau IV.7. Les propriétés du sol spécifiques à la région et les températures ambiantes de l'air ainsi que les températures du sol à 2m et 5m de profondeur pour le mois d'août ont été obtenues à partir de [81].

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV.7 : Paramètres d'entrée pour les simulations.

Composant	Paramètre	Unités	Valeurs
Tuyau en PVC	Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1380
	Chaleur spécifique	J/kg.K	900
	Conductivité thermique	W/m.K	0.16
Tuyau en PEHD	Densité	Kg/m <sup>3</sup>	955
	Chaleur spécifique	J/kg.k	2300
	Conductivité thermique	W/m.K	0.461
Sol argileux sableux	Densité	Kg/m <sup>3</sup>	1800
	Chaleur spécifique	J/kg.K	1340
	Conductivité thermique	W/m.K	1.55
Conditions de fonctionnement	Température d'entrée	K	310.05
	Températures du sol à une profondeur de 2 m	K	303.65
	Températures du sol à une profondeur de 5 m	K	298.95

### IV.3.10. Résultats de simulation et Combinaisons de facteurs pour le système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAST)

Le Tableau IV.8 présente les résultats de simulation du système d'échangeur de Chaleur air-sol (ECAST). Il offre un aperçu complet de l'influence de divers facteurs (profondeur du tuyau, longueur du tuyau, vitesse de l'air, conductivité thermique des tuyaux en PVC et en PEHD) sur la variable de réponse clé : la température en Kelvin. Ce tableau constitue une plateforme essentielle pour la diffusion des résultats de l'expérience de plan factoriel complet, permettant aux lecteurs de saisir facilement les interactions entre ces facteurs et leur effet combiné sur les performances thermiques du système ECAST.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Tableau IV.8 : Expérience de plan d'expérience factoriel complet et valeurs de réponse.

Ordre d'exécution	Profondeur du tuyau (m)	Longueur du tuyau (m)	Vitesse de l'air (m/s)	Conductivité thermique du tuyau (W/m.K)	Température de sortie (K)
1	2	10	3	0.16	306.369
2	5	10	3	0.16	303.665
3	2	20	3	0.16	304.582
4	5	20	3	0.16	300.567
5	2	10	6	0.16	307.282
6	5	10	6	0.16	305.25
7	2	20	6	0.16	305.414
8	5	20	6	0.16	302.01
9	2	10	3	0.461	305.74
10	5	10	3	0.461	302.576
11	2	20	3	0.461	304.164
12	5	20	3	0.461	299.842
13	2	10	6	0.461	306.449
14	5	10	6	0.461	303.804
15	2	20	6	0.461	304.621
16	5	20	6	0.461	300.635

### IV.3.11. Les résultats des expériences à facteur unique

La figure IV.14 examine l'influence de la profondeur du tuyau sur les températures de réponse, en se concentrant sur deux profondeurs : 2 m et 5 m. Les résultats montrent une diminution constante et statistiquement significative ( $p < 0,05$ ) de la température à mesure que la profondeur du tuyau augmente. Cette tendance est quantifiée par une réduction de la température de 305,57 K à une profondeur de 2 m à 302,29 K à une profondeur de 5 m, soit une différence de 3,28 K. Cette relation inverse signifie que des tuyaux plus profonds favorisent des températures plus basses, probablement en raison de l'augmentation de la masse thermique du sol disponible à des profondeurs plus importantes.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

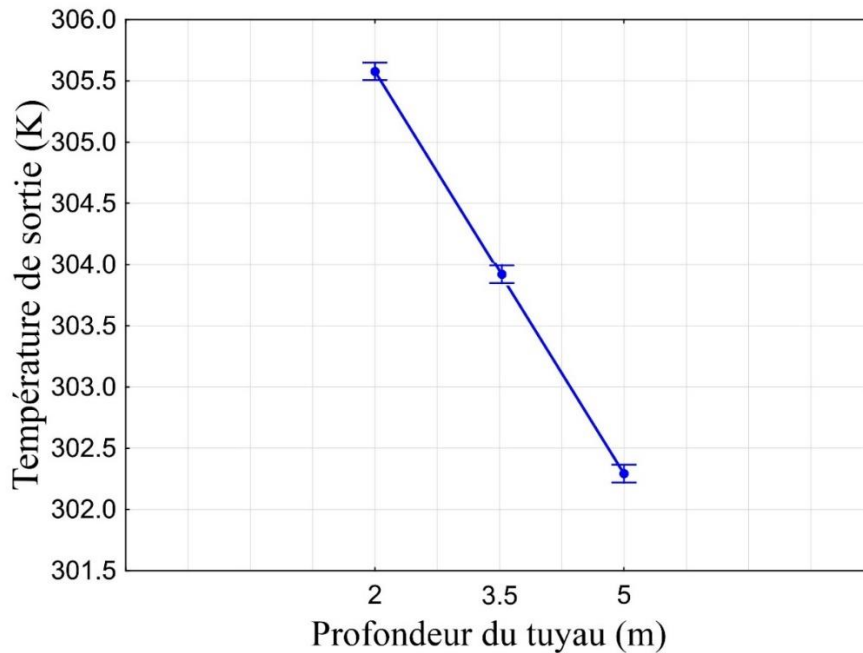


Figure IV.14 : Effet de la profondeur du tuyau sur la température de sortie.

La Figure IV.15 explore l'impact de la longueur du tuyau sur les températures de réponse, examinant spécifiquement des longueurs de 10 m et 20 m. L'analyse révèle une diminution statistiquement significative (mentionner si la valeur de  $p < 0,05$ ) et cohérente de la température lorsque la longueur du tuyau augmente. Quantitativement, les températures diminuent de 305,14 K à 10 m à 302,72 K à 20 m, représentant une différence de 2,42 K. Cette relation inverse suggère que des tuyaux plus longs favorisent des températures plus basses, potentiellement en raison de la surface d'échange de chaleur accrue disponible pour transférer l'énergie thermique vers le sol environnant.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

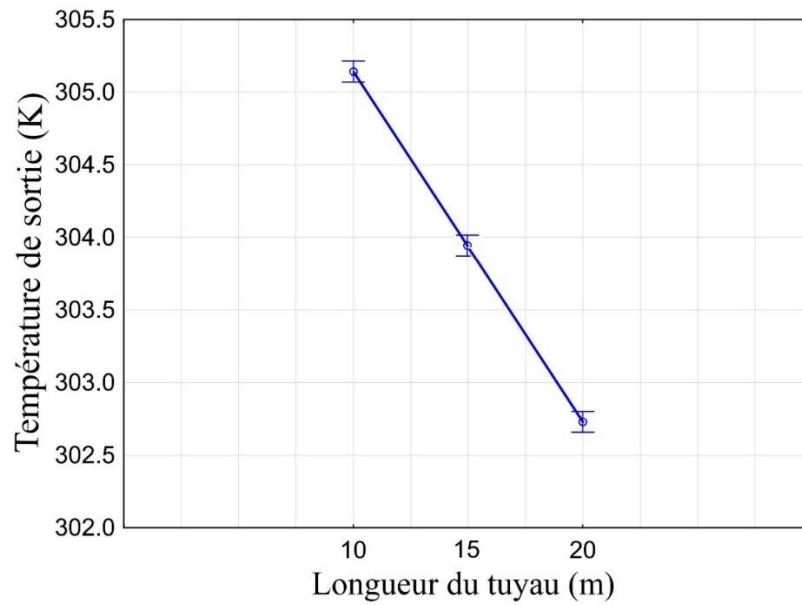


Figure IV.15 : Effet de la longueur du tuyau sur la température de sortie.

Influence de la vitesse de l'air: La figure IV.16 montre l'effet positif de la vitesse de l'air. L'analyse du troisième facteur, la vitesse de l'air, révèle une relation directe : à mesure que la vitesse augmente de 2 à 6 m par seconde, la température augmente en conséquence de 303,43 K à 304,43 K. Cela suggère une corrélation entre des vitesses d'air plus élevées et des températures plus élevées, ce qui indique qu'un débit d'air accru à l'intérieur du système (ECAST) pourrait entraîner des conditions légèrement plus chaudes.

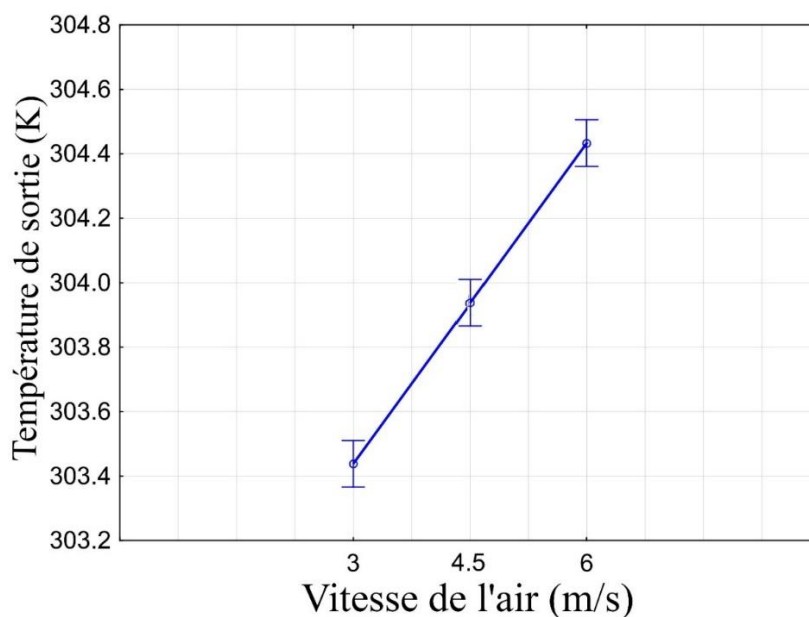


Figure IV.16 : Effet de la vitesse de l'air sur la température de sortie.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

Influence de la Conductivité Thermique du Tuyau : La Figure IV.17 présente les résultats d'une analyse complète du plan d'expérience factoriel examinant l'impact de la conductivité thermique du tuyau sur les températures résultantes. Deux niveaux de conductivité thermique, 0,16 W/m.K et 0,461 W/m.K, ont été évalués. Les données révèlent une relation inverse : à mesure que la conductivité thermique du tuyau augmente de 0,16 W/m.K à 0,461 W/m.K, les températures diminuent de 304,39 K à 303,47 K. Cela signifie que plus la conductivité thermique est élevée, plus l'efficacité de transfert de chaleur est améliorée, ce qui se traduit par des températures plus basses à l'intérieur du système.

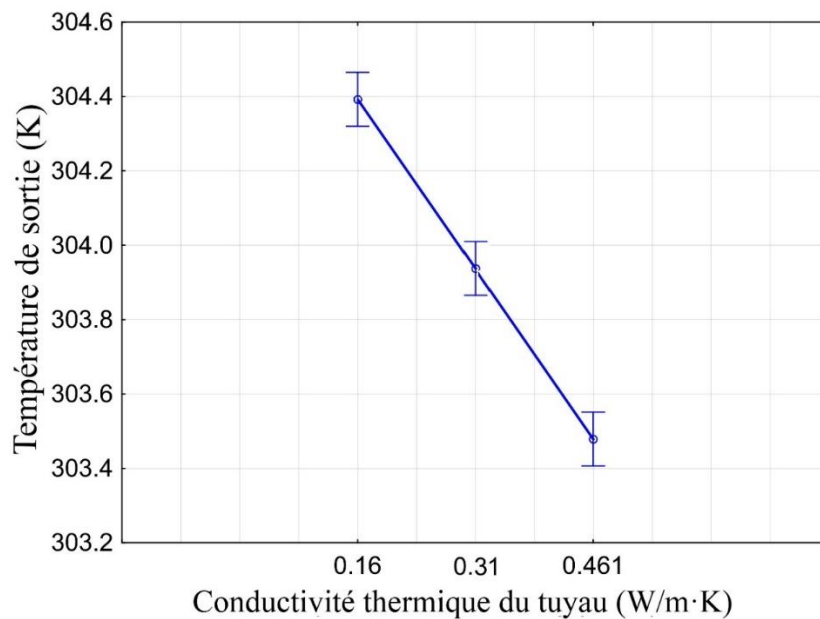


Figure IV.17 : Effet de la conductivité thermique du tuyau sur la température de sortie.

### IV.3.12. Optimisation par Plan d'Expérience Factoriel Complet

Cette étude a utilisé une analyse de régression pour construire un modèle prédictif de la température interne du système ECAST, en s'appuyant sur les données du modèle numérique. Les facteurs codés générés par la conception factorielle complète ont servi de base à l'équation résultante (IV.4), exprimée sous forme de polynôme du premier ordre. Dans cette équation,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  et  $X_4$  représentent les valeurs codées des variables indépendantes, correspondant respectivement à la profondeur du tuyau, à la longueur du tuyau, à la vitesse de l'air et à la conductivité thermique du tuyau.  $Y$  désigne le facteur de réponse, représentant la température de sortie (K).

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

$$Y = 303.94 - 1.64X_1 - 1.21X_2 + 0.49X_3 - 0.45X_4 - 0.32X_1X_2 + 0.13X_1X_3 - 0.12X_1X_4 - 0.05X_2X_3 + 0.04X_2X_4 - 0.09X_3X_4 \quad (IV.4)$$

Le Tableau IV.9 présente les résultats d'une analyse de variance (ANOVA) qui vise à déterminer l'influence des différents composants et de leurs interactions sur l'efficacité thermique du système d'échangeur de chaleur air-sol (ECAST). Le modèle démontre une influence statistiquement significative des variables indépendantes, avec une valeur F de 1202,32 ( $p < 0,0001$ ), indiquant leur impact global sur l'efficacité thermique. Ceci est d'autant plus corroboré par la haute significativité ( $p < 0,05$ ) des facteurs individuels ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  et  $X_4$ ) et de leurs interactions ( $X_1X_2$ ,  $X_1X_3$ ,  $X_1X_4$ ,  $X_2X_3$  et  $X_3X_4$ ). La puissance explicative du modèle est évidente à travers la partition de la somme totale des carrés en variance expliquée (modèle) et non expliquée (résiduelle). Le modèle présente un coefficient de détermination remarquable ( $R^2 = 0,9996$ ), ce qui signifie qu'il explique près de 99,96% de la variabilité observée dans la variable de réponse de l'efficacité thermique.

Tableau IV.9 : Résultats de l'ANOVA.

Source	Somme des carrés	df	Moyenne des carrés	F-value	P-value
model	76.16	10	7.62	1202.32	<0.0001
$X_1$	43.14	1	43.14	6810.16	<0.0001
$X_2$	23.28	1	23.28	3675.24	<0.0001
$X_3$	3.96	1	3.96	625.17	<0.0001
$X_4$	3.34	1	3.34	526.95	<0.0001
$X_1X_2$	1.68	1	1.68	264.95	<0.0001
$X_1X_3$	0.2857	1	0.2857	45.10	0.0011
$X_1X_4$	0.2406	1	0.2406	37.98	0.0016
$X_2X_3$	0.0518	1	0.0518	8.17	0.0355
$X_2X_4$	0.0294	1	0.0294	4.64	0.0837
$X_3X_4$	0.1572	1	0.1572	24.82	0.0042
Residual	0.0317	5	0.0063		
Total SS	76.19	15			
$R^2 = 0.9996$ ; $R^2_{Adj} = 0.9988$ ; $R^2_{Pre} = 0.9957$ .					



## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

La méthodologie de surface de réponse (RSM), utilisant des tracés de contour et de surface, constitue un outil essentiel pour identifier les conditions de fonctionnement optimales et les valeurs de réponse favorables [82]. Les Figures IV.18 et IV.19 présentent des graphiques illustrant les interactions entre la longueur et la profondeur du tuyau, la vitesse de l'air et la profondeur du tuyau. Ces graphiques révèlent que la réduction de la vitesse de l'air à 3 m/s ou moins, combinée à une profondeur de tuyau de 4 m et à une augmentation de la longueur du tuyau, conduit à des températures inférieures à 301 K. Ce résultat est attribué au temps de résidence plus long de l'air à vitesse réduite dans le système d'échange de chaleur, ce qui facilite un transfert de chaleur accru avec le sol environnant et une réduction conséquente de la température. De plus, une profondeur de tuyau accrue permet d'accéder à des couches souterraines dont les températures sont plus stables et plus fraîches grâce aux propriétés isolantes de la Terre. Cet accès plus profond se traduit par des températures atteignables plus basses. Par conséquent, pour optimiser les performances de refroidissement du système ECAST, il est recommandé de maintenir la vitesse de l'air en dessous de 3 m/s et d'utiliser des profondeurs de tuyau de 4 m ou plus. Ces ajustements favorisent un refroidissement constant en minimisant les fluctuations de température induites par la turbulence tout en maximisant le potentiel de refroidissement du sous-sol.

La Figure IV.20 met en lumière l'interaction entre la conductivité thermique du tuyau et sa longueur, qui affecte les résultats de température. L'augmentation simultanée de la conductivité thermique du tuyau et de sa longueur entraîne une diminution de la température (de 306 K à 301,75 K). Cet effet est attribué à l'amélioration du transfert de chaleur facilitée par une conductivité thermique plus élevée dans les tuyaux en polyéthylène haute densité (PEHD). En revanche, les tuyaux en polychlorure de vinyle (PVC) présentent une tendance inverse. Il est important de noter que la conductivité supérieure du PEHD (0,461 W/m·K) permet d'atteindre des températures inférieures à 303 K avec une longueur de tuyau de 15 m, tandis que le même résultat nécessite une longueur de 19 m dans les tuyaux en PVC de conductivité plus faible. Cette disparité, qui dépend du matériau, nécessite des ajustements de la longueur du tuyau pour les températures souhaitées. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser des tuyaux en PEHD avec leur conductivité plus élevée et d'augmenter la longueur à 18 m ou plus pour un refroidissement adéquat.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

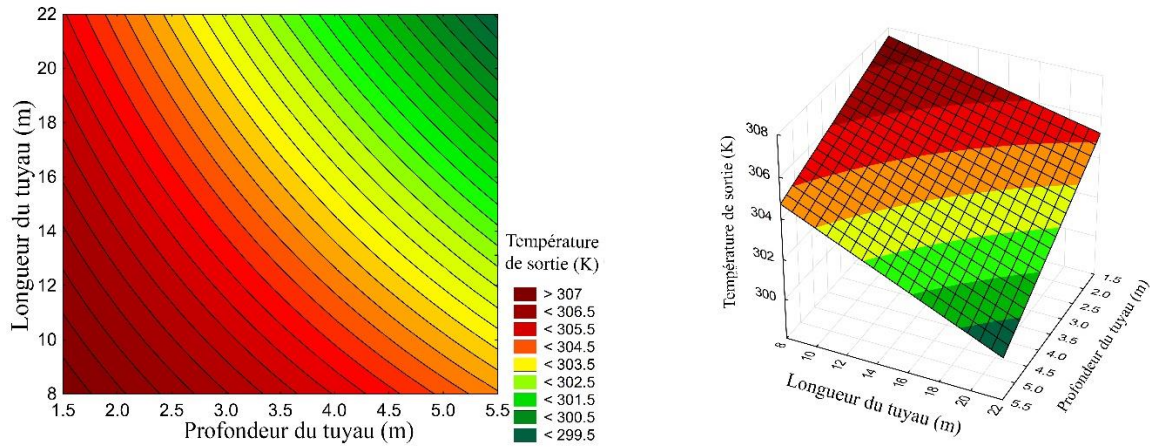


Figure IV.18 : Contour et surface de réponse en fonction de la profondeur du tuyau et de la longueur du tuyau.

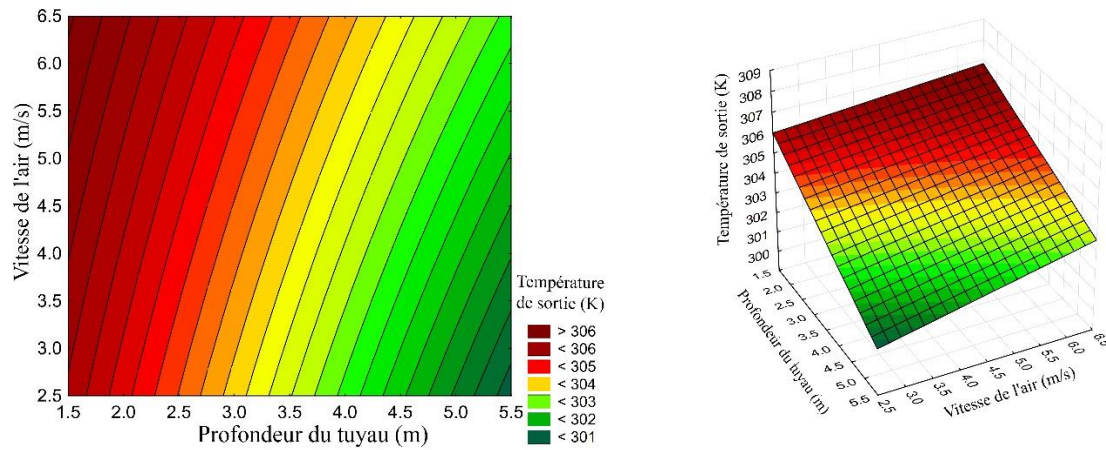


Figure IV.19 : Contour et surface de réponse en fonction de la profondeur du tuyau et de la vitesse de l'air.

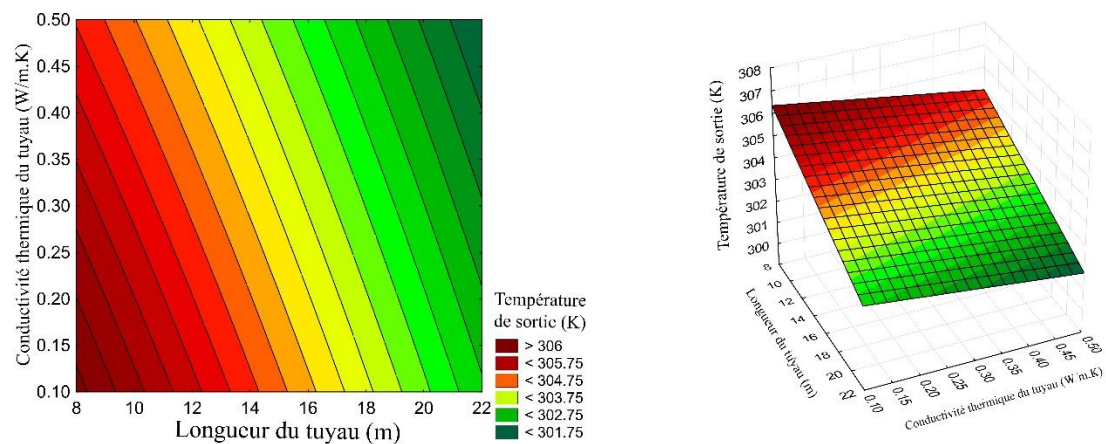


Figure IV.20 : Contour et surface de réponse en fonction de la longueur du tuyau et de la conductivité thermique du tuyau.

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

### IV.2.13. Contribution en pourcentage de chaque paramètre

L'influence relative de chaque paramètre sur la variabilité de la variable de réponse est quantifiée par leurs contributions en pourcentage, la Figure IV.21 analyse révèle que la "Profondeur du tuyau" ( $X_1$ ) est le facteur dominant, expliquant une part substantielle de 56,62% de la variabilité. La "Longueur du tuyau" ( $X_2$ ) suit avec une contribution significative de 30,55%, tandis que la "Vitesse de l'air" ( $X_3$ ) et la "Conductivité thermique du tuyau" ( $X_4$ ) exercent des influences modérées, représentant respectivement 5,19% et 4,38%. Ces résultats fournissent des informations précieuses sur la hiérarchie des facteurs affectant les performances du système, mettant en évidence la primauté de la "Profondeur du tuyau" et l'importance de prendre en compte à la fois la "Longueur du tuyau" et la "Vitesse de l'air" pour l'optimisation.

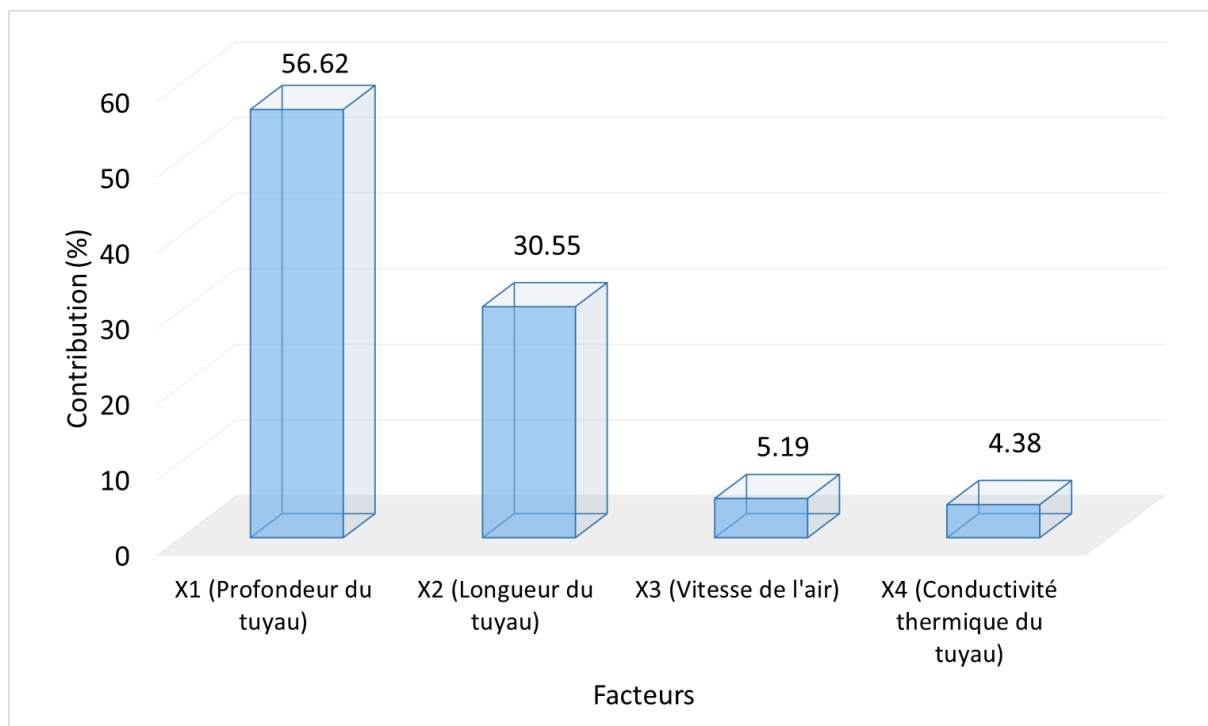


Figure IV.21 : Contribution en pourcentage de chaque paramètre.

### IV.3. Conclusion

Ce chapitre présente et interprète les résultats obtenus pour deux modèles d'échangeurs de chaleur air-sol (ECAS). Le premier modèle s'appuie sur des données expérimentales collectées en hiver et en été, tandis que le second utilise un modèle de dynamique des fluides

## Chapitre IV : Résultats et interprétations

---

numérique (CFD) conçus pour la région de Timimoun en Algérie. Afin d'évaluer systématiquement l'impact de divers facteurs sur les performances de l'ECAS, une méthodologie de plan factoriel complet a été employée dans les deux modèles.

L'analyse a révélé que la longueur du tuyau est le facteur le plus influent sur les performances de l'ECAS dans les deux saisons pour le modèle expérimental. Quant au modèle CFD, la profondeur du tuyau s'est avérée être le facteur le plus significatif. Ces résultats soulignent le rôle crucial de ces paramètres dans l'optimisation de la conception de l'ECAS pour les conditions climatiques spécifiques de la région de Timimoun.

## Conclusion générale

---

Dans cette thèse, présente une approche novatrice pour le développement de modèles mathématiques prédictifs de l'efficacité de refroidissement et de chauffage des échangeurs air-sol (ECAS) dans les bâtiments, en s'attaquant aux saisons estivales et hivernales. Deux contributions distinctes constituent l'apport de ce travail. La première réside dans l'implémentation d'un plan factoriel complet pour une analyse exhaustive, contrairement aux recherches antérieures souvent limitées dans la variation des paramètres. Cette approche vise à estimer avec précision la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du système EAHE. Pour ce faire, l'étude développe et valide deux modèles mathématiques basés sur des données expérimentales. La seconde contribution consiste en l'exploitation d'un modèle CFD pour améliorer les performances d'un système EAHE dans la région de Timimoun en Algérie. Ce modèle CFD s'appuie sur 16 simulations, permettant une évaluation détaillée du comportement du système.

L'objectif principal de cette recherche est de déterminer les valeurs optimales des paramètres qui maximisent les performances de l'EAHE. Pour ce faire, l'étude poursuit trois objectifs spécifiques:

- Développer et valider deux modèles mathématiques basés sur des données expérimentales pour la première étude.
- Evaluer l'effet des principaux paramètres par l'analyse de variance (ANOVA) pour les deux études.
- Déterminer les valeurs optimales des paramètres qui maximisent les performances de l'EAHE pour les deux études.

Les résultats suivants ont été obtenus :

### Étude 1

- Un modèle polynomial du premier ordre a permis de prédire avec précision les températures des systèmes ECAS en fonction des paramètres opérationnels codés (conductivité, longueur et vitesse de l'air des tuyaux). Cette avancée permet aux chercheurs et aux ingénieurs d'optimiser la conception et l'exploitation des systèmes

## Conclusion générale

---

pour répondre aux exigences saisonnières de chauffage et de refroidissement, contribuant ainsi à des solutions de chauffage et de climatisation plus efficaces et durables.

- Validation du modèle confirmée : Une analyse statistique et des graphiques de probabilité normale valident la fiabilité du modèle, garantissant une représentation précise des données et des prédictions fiables.
- Facteurs significatifs identifiés : La longueur des tuyaux s'avère être le facteur dominant influençant la température en hiver comme en été, suivie de la vitesse de l'air et de la conductivité thermique. La conductivité thermique joue un rôle moindre, mais son optimisation peut néanmoins améliorer les performances du système.
- Recommandations saisonnières: Des conditions de fonctionnement optimales distinctes sont identifiées pour l'hiver et l'été. Maximiser et minimiser la température en hiver et en été nécessite des tuyaux en acier doux, des longueurs plus longues (21–24 m) et une limitation de la vitesse de l'air (2,5 m/s). L'utilisation d'un plan factoriel complet dans cette étude (ECAS) s'est avérée très utile, produisant un ensemble de données riche d'une valeur immense. Cette méthode expérimentale robuste pose une base solide pour des recherches et des analyses approfondies dans ce domaine.

### Étude 2

- Des profondeurs de tuyaux plus importantes contribuent à une meilleure dissipation thermique, ce qui se traduit par des températures plus basses. En raison de l'augmentation des effets de dissipation thermique, les tuyaux allongés présentent une corrélation inverse entre la longueur et la température.
- Des vitesses d'air accrues conduisent à des températures plus élevées, ce qui affecte l'efficacité globale du refroidissement.
- Des différences significatives de conductivité thermique des tuyaux soulignent les attributs distincts des matériaux, la conductivité plus élevée des tuyaux en PEHD conduisant à des températures plus froides que les tuyaux en PVC.
- Le tableau ANOVA dans le plan factoriel complet souligne l'importance de facteurs tels que la "profondeur des tuyaux", la "longueur des tuyaux", la "vitesse de l'air" et la "conductivité thermique des tuyaux" dans la formation des résultats de l'efficacité thermique.

## Conclusion générale

---

- Les courbes de réponse et les diagrammes de contour fournissent des informations essentielles sur les configurations opérationnelles optimales, en soulignant l'importance de maintenir des vitesses d'air inférieures à 3 m/s et d'utiliser des profondeurs de tuyaux supérieures à 4 m pour une meilleure efficacité de refroidissement.
- La corrélation entre la conductivité thermique des tuyaux et la longueur des tuyaux souligne les capacités de transfert de chaleur supérieures du matériau PEHD.
- L'analyse de la contribution en pourcentage identifie la "profondeur des tuyaux" ( $X_1$ ) comme le facteur le plus influent, représentant 56,62 % de la variabilité, suivi de la "longueur des tuyaux" ( $X_2$ ) avec un 30,55 % significatif. En attendant, la "vitesse de l'air" ( $X_3$ ) et la "conductivité thermique des tuyaux" ( $X_4$ ) jouent des rôles plus mineurs, contribuant respectivement à 5,19 % et 4,38 %.
- L'application d'un plan factoriel complet enrichit la contribution académique de l'étude, en fournissant un ensemble de données robuste à la communauté scientifique et en servant de base à de futures recherches dans les systèmes (ECAST).

## Références bibliographique

---

- [1] Thermofin. "Caleos® - Echangeurs à faisceau tubulaire", Thermofin, <https://thermofin.net/fr/produits/caleos-echangeurs-faisceau-tubulaire/>.
- [2] DocPlayer."Les équipements - Les échangeurs",DocPlayer, <https://docplayer.fr/45565450-Les-equipements-les-echangeurs.html>.
- [3] FOURAR, I. (2020). Etude numérique et expérimentale des phénomènes de convection sur des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra).
- [4] FP Sensor Systems. "Plattenwärmeüberträger (PWUE)", FP Sensor Systems, <https://fp-sensorsystems.com/wp-content/uploads/2019/08/Plattenwaermeuebertraeger-PWUE-768x576.png>.
- [5] Nexson Group. "Gasketed Plate Heat Exchangers", Nexson Group, <https://www.nexson-group.com/wp-content/uploads/2020/07/gasketed-plate-heat-exchangers-2.jpg>.
- [6] Volfram Systems. "Fin Welding Heat Exchangers", Volfram Systems, [https://volframsystems.weebly.com/uploads/1/2/0/2/120241918/fin-welding-heat-exchangers-s\\_orig.jpg](https://volframsystems.weebly.com/uploads/1/2/0/2/120241918/fin-welding-heat-exchangers-s_orig.jpg).
- [7] Echangeur de chaleur. " Echangeur tubes à ailettes ", Echangeur de chaleur, <https://sc04.alicdn.com/kf/HTB1tE6ajDCWBKNjSZFtq6yC3FXas.jpg>.
- [8] Nexson Group. "Spiral Heat Exchanger - Type 1", Nexson Group, <https://www.nexson-group.com/wp-content/uploads/2020/09/spiral-heat-exchanger-type-1.png>.
- [9] Promac. "Intercambiador de Calor Espiral", Promac, <https://promac.com.co/wp-content/uploads/2023/03/Intercambiador-de-Calor-Espiral-2.jpg>.
- [10]Agrawal, K. K., Agrawal, G. D., Misra, R., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2018). A review on effect of geometrical, flow and soil properties on the performance of Earth air tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 176, 120-138.
- [11]Kaushal, M. (2017). Geothermal cooling/heating using ground heat exchanger for various experimental and analytical studies: Comprehensive review. *Energy and Buildings*, 139, 634-652.
- [12]Ahmed, S. F., Liu, G., Mofijur, M., Azad, A. K., Hazrat, M. A., & Chu, Y. M. (2021). Physical and hybrid modelling techniques for earth-air heat exchangers in reducing building energy consumption: Performance, applications, progress, and challenges. *Solar Energy*, 216, 274-294.



## Références bibliographique

---

- [13] Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., & Jamuwa, D. K. (2019). Effect of different design aspects of pipe for earth air tunnel heat exchanger system: A state of art. *International Journal of Green Energy*, 16(8), 598-614.
- [14] Rohit, M. (2017). *Earth Air Tunnel Heat Exchangers: Performance, Analysis and Design*.
- [15] Li, Z., Zhu, W., Bai, T., & Zheng, M. (2009). Experimental study of a ground sink direct cooling system in cold areas. *Energy and Buildings*, 41(11), 1233-1237.
- [16] Johansen, O. (1977). *Thermal conductivity of soils (Doctoral dissertation, Norwegian Institute of Technology.)*.
- [17] Misra, A., Becker, B. R., & Fricke, B. A. (1995). A theoretical model of the thermal conductivity of idealized soil. *HVAC&R Research*, 1(1), 81-96.
- [18] Abu-Hamdeh, N. H., & Reeder, R. C. (2000). Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter. *Soil science society of America Journal*, 64(4), 1285-1290.
- [19] Niu, F., Yu, Y., Yu, D., & Li, H. (2015). Heat and mass transfer performance analysis and cooling capacity prediction of earth to air heat exchanger. *Applied Energy*, 137, 211-221.
- [20] Diaz, S. E., Sierra, J. M. T., & Herrera, J. A. (2013). The use of earth–air heat exchanger and fuzzy logic control can reduce energy consumption and environmental concerns even more. *Energy and buildings*, 65, 458-463.
- [21] Dubey, M. K., Bhagoria, J., & Atullanjewar, A. (2013). Earth air heat exchanger in parallel connection. *Int J Eng Trends Technol*, 4(6), 2463-2467.
- [22] Derbel, H. B. J., & Kanoun, O. (2010). Investigation of the ground thermal potential in tunisia focused towards heating and cooling applications. *Applied thermal engineering*, 30(10), 1091-1100.
- [23] Kabashnikov, V. P., Danilevskii, L. N., Nekrasov, V. P., & Vityaz, I. P. (2002). Analytical and numerical investigation of the characteristics of a soil heat exchanger for ventilation systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(11), 2407-2418.
- [24] Benhammou, M., & Draoui, B. (2015). Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 348-355.

## Références bibliographique

---

- [25] Lee, K. H., & Strand, R. K. (2008). The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings. *Energy and Buildings*, 40(4), 486-494.
- [26] Ahmed, S. F., Amanullah, M. T. O., Khan, M. M. K., Rasul, M. G., & Hassan, N. M. S. (2016). Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer. *Energy Conversion and Management*, 114, 324-337.
- [27] Mihalakakou, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1994). On the cooling potential of earth to air heat exchangers. *Energy Conversion and Management*, 35(5), 395-402.
- [28] Wu, H., Wang, S., & Zhu, D. (2007). Modelling and evaluation of cooling capacity of earth-air-pipe systems. *Energy Conversion and management*, 48(5), 1462-1471.
- [29] Bansal, N. K., Sodha, M. S., & Bharadwaj, S. S. (1983). Performance of earth air tunnels. *International Journal of Energy Research*, 7(4), 333-345.
- [30] Bansal, N. K., & Sodha, M. S. (1986). An earth-air tunnel system for cooling buildings. *Tunnelling and underground space technology*, 1(2), 177-182.
- [31] Bharadwaj, S. S., & Bansal, N. K. (1981). Temperature distribution inside ground for various surface conditions. *Building and Environment*, 16(3), 183-192.
- [32] Wang H, Qi C, Wang E, Zhao J. A case study of underground thermal storage in a solar-ground coupled heat pump system for residential buildings. *Renew Energy*. 2009;34(1):307–14.
- [33] Belatrache, D., Bentouba, S., & Bourouis, M. (2017). Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. *International journal of hydrogen energy*, 42(13), 8898-8904.
- [34] Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C. A., Lewis, J. O., Vallindras, M., & Argiriou, A. (1996). Energy conservation in greenhouses with buried pipes. *Energy*, 21(5), 353-360.
- [35] Sanusi, A. N., Shao, L., & Ibrahim, N. (2013). Passive ground cooling system for low energy buildings in Malaysia (hot and humid climates). *Renewable energy*, 49, 193-196.
- [36] Singh, B., Asati, A. K., & Kumar, R. (2017). Temperature difference findings from Earth air heat exchanger system in hot-dry climate. *Indian Journal of Science and Technology*, 10, 18.
- [37] Bojić, M., Papadakis, G., & Kyritsis, S. (1999). Energy from a two-pipe, earth-to-air heat exchanger. *Energy*, 24(6), 519-523.

## Références bibliographique

---

- [38] Badescu, V. (2007). Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. *Renewable energy*, 32(5), 845-855.
- [39] Su, H., Liu, X. B., Ji, L., & Mu, J. Y. (2012). A numerical model of a deeply buried air–earth–tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 48, 233-239.
- [40] Barakat, S., Ramzy, A., Hamed, A. M., & El Emam, S. H. (2016). Enhancement of gas turbine power output using earth to air heat exchanger (EAHE) cooling system. *Energy conversion and management*, 111, 137-146.
- [41] Bisoniya, T. S., Kumar, A., & Baredar, P. (2014). Study on calculation models of earth-air heat exchanger systems. *Journal of Energy*, 2014.
- [42] Rouag, A., Benchabane, A., & Mehdid, C. E. (2018). Thermal design of Earth-to-Air Heat Exchanger. Part I a new transient semi-analytical model for determining soil temperature. *Journal of cleaner production*, 182, 538-544.
- [43] Do, S. L., Baltazar, J. C., & Haberl, J. (2015). Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in hot and humid climates. *Energy and Buildings*, 103, 206-215.
- [44] Niu, F., Yu, Y., Yu, D., & Li, H. (2015). Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies. *Applied Thermal Engineering*, 77, 90-100.
- [45] Xamán, J., Hernández-López, I., Alvarado-Juárez, R., Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., & Chávez, Y. (2015). Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México. *Energy and Buildings*, 99, 273-283.
- [46] Niu, F., Yu, Y., Yu, D., & Li, H. (2015). Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to air heat exchanger under different operation strategies. *Applied Thermal Engineering*, 77, 90-100.
- [47] Misra, R., Bansal, V., Agarwal, G. D., Mathur, J., & Aseri, T. (2012). Thermal performance investigation of hybrid earth air tunnel heat exchanger. *Energy and Buildings*, 49, 531-535.
- [48] Misra, R., Bansal, V., Das Agarwal, G., Mathur, J., & Aseri, T. (2013). Evaluating thermal performance and energy conservation potential of hybrid earth air tunnel heat exchanger in hot and dry climate—in situ measurement. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 5(3), 031006.

## Références bibliographique

---

- [49] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2010). Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for summer cooling. *Energy and buildings*, 42(5), 645-648.
- [50] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., & Mathur, J. (2009). Performance analysis of earth–pipe–air heat exchanger for winter heating. *Energy and Buildings*, 41(11), 1151-1154.
- [51] Rosa, N., Soares, N., Costa, J. J., Santos, P., & Gervásio, H. (2020). Assessment of an earth-air heat exchanger (EAHE) system for residential buildings in warm-summer Mediterranean climate. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 38, 100649.
- [52] Serageldin, A. A., Abdelrahman, A. K., & Ookawara, S. (2016). Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Conversion and management*, 122, 25-38.
- [53] Agrawal, K. K., Bhardwaj, M., Misra, R., Das Agrawal, G., & Bansal, V. (2018). Optimization of operating parameters of earth air tunnel heat exchanger for space cooling: Taguchi method approach. *Geothermal Energy*, 6(1), 1-17.
- [54] Wang, X., Bjerg, B. S., & Zhang, G. (2018). Design-oriented modelling on cooling performance of the earth-air heat exchanger for livestock housing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 152, 51-58.
- [55] Jassim, J. A. A. W. (2015). Sustainable design of wind-catcher of an earth-to-air heat exchanger in hot dry areas. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 6(4), 582-589.
- [56] Khabbaz, M., Benhamou, B., Limam, K., Hamdi, H., Hollmuller, P., & Bennouna, A. (2015, December). Experimental and numerical study of an earth-to-air heat exchanger for buildings air refreshment in Marrakech. In *BS2015, 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*.
- [57] Yang, D., Guo, Y., & Zhang, J. (2016). Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. *Energy Conversion and Management*, 109, 184-194.
- [58] Vaz, J., Sattler, M. A., dos Santos, E. D., & Isoldi, L. A. (2011). Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 43(9), 2476-2482.

## Références bibliographique

---

- [59] Vivier, S. (2002). Stratégies d'optimisation par la méthode des Plans d'Expériences, et Application aux dispositifs électrotechniques modélisés par Eléments Finis (Doctoral dissertation, Université des Sciences et Technologie de Lille-Lille I).
- [60] Goupy, J. L. (2005). Pratiquer les plans d'expériences. Dunod.
- [61] DAAS, M. S. Plans d'expériences.
- [62] Goupy, J. (1999). Plans d'expériences pour surfaces de réponse. Dunod.
- [63] Doehlert, D. H. (1970). Uniform shell designs. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 19(3), 231-239.
- [64] Box, G. E., & Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, 2(4), 455-475.
- [65] Payette, F. A. (2008). Simulation de l'écoulement turbulent dans les aspirateurs de turbines hydrauliques: Impact des paramètres de modélisation (Doctoral dissertation, Université Laval).
- [66] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). Lectures in mathematical models of turbulence. (No Title).
- [67] Yakhot, V., & Orszag, S. A. (1986). Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of scientific computing*, 1(1), 3-51.
- [68] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new k- $\epsilon$  eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows. *Computers & fluids*, 24(3), 227-238.
- [69] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). Lectures in mathematical models of turbulence. (No Title).
- [70] Sarkar, S., & Balakrishnan, L. (1990, February). Application of a Reynolds stress turbulence model to the compressible shear layer. In *21st Fluid Dynamics, Plasma Dynamics and Lasers Conference* (p. 1465).
- [71] Orszag, S. A. (1993). Renormalisation group modelling and turbulence simulations. Near-wall turbulent flows.
- [72] Cokljat, D., Ivanov, V. A., Sarasola, F. J., & Vasquez, S. A. (2000, June). Multiphase k-epsilon models for unstructured meshes. In *ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting* (pp. 749-754). Boston, MA, USA: ASME.
- [73] Wilcox, D. C. (1998). Turbulence modeling for CFD (Vol. 2, pp. 103-217). La Canada, CA: DCW industries.

## Références bibliographique

---

- [74] Congedo, P. M., Colangelo, G., & Starace, G. (2012). CFD simulations of horizontal ground heat exchangers: A comparison among different configurations. *Applied Thermal Engineering*, 33, 24-32.
- [75] Galbraith, R. F., & Roberts, R. G. (2012). Statistical aspects of equivalent dose and error calculation and display in OSL dating: An overview and some recommendations. *Quaternary Geochronology*, 11, 1-27.
- [76] Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G. D., Mathur, J., & Aseri, T. K. (2013). CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger. *Applied Energy*, 103, 266-277.
- [77] Misra, R., Bansal, V., Agrawal, G. D., Mathur, J., & Aseri, T. (2013). Transient analysis based determination of derating factor for earth air tunnel heat exchanger in summer. *Energy and buildings*, 58, 103-110.
- [78] Yang, D., Guo, Y., & Zhang, J. (2016). Evaluation of the thermal performance of an earth-to-air heat exchanger (EAHE) in a harmonic thermal environment. *Energy Conversion and Management*, 109, 184-194.
- [79] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
- [80] Srinivasan, A., & Viraraghavan, T. (2010). Oil removal from water by fungal biomass: a factorial design analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 695-702.
- [81] Hacini, K., Benatiallah, A., Harrouz, A., & Belatrache, D. (2021). Efficiency assessment of an earth-air heat exchanger system for passive cooling in three different regions: The Algerian case. *FME Transactions*, 49(4), 1035-1046.
- [82] Boubakri, A., Helali, N., Tlili, M., & Amor, M. B. (2014). Fluoride removal from diluted solutions by Donnan dialysis using full factorial design. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31, 461-466.