

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهر وميكانيك

Département d'Automatique et Électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électromécanique

Spécialité : Maintenance industrielle

Thème

**Étude comparative de différentes stratégies de modélisation  
D'un échangeur air-sol par les réseaux de neurones artificiels**

Présenté Par :

**DAOUADI Khalil Abd Elbarie & HINANA Mouad Abd Elmounim**

Soutenue publiquement le 02/06/2025

Devant le jury composé de

MOSBAH Charaf Abdelkarim	MCB	Univ -GHARDAIA	Président
KADDOUR Abdelmadjid	DR	URAER-GHARDAIA	Encadreur
KIFOUCHE Abdessalem	MCA	Univ-KHEMIS MELIANA	Co-encadreur
BENCHAABANE Achour	MCB	Univ-GHARDAIA	Examineur
TAHTAH Reda	MCB	Univ-GHARDAIA	Examineur

Année universitaire 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# **REMERCIEMENTS**

*Nous remercions Dieu Tout-Puissant, et le louons pour son succès et pour nous avoir donné la force et la diligence nécessaires pour achever cette humble œuvre.*

*Nous remercions également nos parents pour leur soutien, leur aide et leurs sacrifices pour nous.*

*Nous tenons à remercier les Professeurs*

*Prof. KADDOUR Abdelmâdjid et Dr.*

*KIFOUCHE Abdessâlem pour avoir suggéré et encadré ce sujet et pour son bon suivi tout au long de la réalisation de ce mémorandum.*

*Des remerciements sont adressés à tous les professeurs du Département d'automatique et électromécanique.*



# ***Dédicace***

*À l'âme de mon cher père "Makhlouf"*

*Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et le fasse reposer en Son vaste Paradis,*

*Lui qui a semé en moi la passion du savoir dès mon enfance.*

*Et à la source intarissable de ma force :*

*Mon grand-père El Haj Bouamama Moulay Brahim*

*et Ma grand-mère Zahra Bichi*

*Qu'Allah les préserve et bénisse leur longue vie,*

*Eux qui m'ont soutenu par leur cœur avant leurs biens,*

*Furent mon appui matériel dans les moments difficiles,*

*Et mon refuge moral quand je trébuchais,*

*Je prie Dieu de leur rendre leur bonté au centuple.*

*À ma tendre mère, mes frères et sœurs, et ma famille,*

*Compagnons des efforts et de la joie de l'accomplissement.*

*À tous ceux qui m'ont soutenu en silence,*

*Ces pages portent une part de ma gratitude.*



# *Dédicace*

*À ceux qui m'ont porté sur les épaules de la générosité :*

*À mon père bienveillant, le pèlerin Djilali, et à ma mère chérie,*

*la pèlerine Mabrouk,*

*Pour vous, la première larme de joie et le dernier mot de gratitude.*

*Et à mes frères... des profondeurs d'affection qui ne se tariront jamais,*

*Et à mes compagnons de route... des amis qui ont été sincères dans les épreuves,*

*Ce travail est la récolte d'un cœur qui vous unit,*

*Pardonnez-moi si mes mots sont insuffisants... car les cœurs n'ont pas de limites.*

# *Sommaire*

REMERCIEMENTS.....	I
Dédicace.....	II
Nomenclature.....	VIII
المخلص .....	X
Résumé .....	XI
Abstract.....	XII
Introduction Générale.....	XIII
<b>Chapitre I Généralités sur la géothermie et l'échangeur air-sol.</b>	
I.1. Introduction.....	1
I.2. La géothermie.....	1
I.2.1. Concepts généraux.....	1
I.2.2. Différents types de géothermies .....	2
I.2.2.1. La géothermie haute énergie .....	2
I.2.2.2. La géothermie basse énergie.....	2
I.2.4 Les avantages et les inconvénients .....	4
I.3. L'échangeur air-sol (EAHE) .....	4
I.3.1. Concepts généraux.....	4
I.3.2. Principe de fonctionnement d'un échangeur air-sol .....	5
I.3.3. Les composants et la conception des échangeurs air-sol.....	7
I.3.3.1. Les composants .....	7
I.3.3.2. Les Conception.....	8
I.3.4. Les différents types d'échangeurs thermiques air-sol.....	15
I.3.4.1. Echangeur Vertical.....	15
I.3.4.2. Echangeur Horizontal .....	16
I.3.4.3. Echangeur Serpentins .....	16
I.3.4.4. Echangeur Spiral.....	17
I.4. Conclusion .....	18
<b>Chapitre II Modélisation mathématique.</b>	
II.1. Introduction .....	19
II.2 .Modélisation de la température du sol .....	19
II.2. 1.La conduction thermique .....	19
II.2. 2.Relation avec les puits canadiens (échangeurs air-sol).....	19
II.2. 3.La diffusivité thermique .....	20
II.2. 4.La température à la sortie de l'échangeur .....	21
II.2. 5.L'efficacité thermique .....	21

<b>II.3 .Modélisation de l'échangeur EAHE .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.1. La convection dans un tube .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.2. Le coefficient de transfert .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3. 3.Le nombre de Nusselt .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.4. Le nombre de Reynolds et de Prandtl .....</b>	<b>22</b>
<b>II.3.5. La résistance thermique totale .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4. Conclusion .....</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre III Résultats et discussion</b>	
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>25</b>
<b>III.2. Les réseaux de neurones.....</b>	<b>25</b>
<b>III.2.1. Neurones artificiels .....</b>	<b>25</b>
<b>III.2.2. Neurone biologique .....</b>	<b>26</b>
<b>III.2.3. Principes d'un neurone artificiel.....</b>	<b>27</b>
<b>III.2.4. Apprentissage des réseaux de neurones artificiels (RNA).....</b>	<b>27</b>
<b>III.2.5. Architecture des RNA .....</b>	<b>28</b>
<b>III.3. Préparation des données et méthodologie de modélisation.....</b>	<b>29</b>
<b>III.3.1. Architecture du réseau de neurones .....</b>	<b>29</b>
<b>III.3.1.1. Paramètres d'apprentissage .....</b>	<b>29</b>
<b>III.3.2. Traitement des données.....</b>	<b>30</b>
<b>III.4. Résultats .....</b>	<b>30</b>
<b>III.4.1. Analyse des performances et des régressions en fonction du nombre de neurones.....</b>	<b>30</b>
<b>III.4.2. Les graphiques et l'analyse visuelle de la performance .....</b>	<b>35</b>
<b>III.4.2. Analyse comparative des stratégies d'apprentissage.....</b>	<b>37</b>
<b>III.4.2.1. Performance de l'algorithme Levenberg-Marquardt.....</b>	<b>37</b>
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>37</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>XV</b>
<b>Références .....</b>	<b>XVI</b>

# *Liste des figures*

### Liste des figures

#### Chapitre I : Généralités sur la géothermie et l'échangeur air-sol

Figure I.1 : Géothermie à haute énergie

Figure I.2 : Géothermie à basse énergie.

Figure I.3 : Carte des ressources géothermiques mondiales

Figure I-4 : Echangeur de chaleur air-sol.

Figure I-5 : Schéma d'un échangeur air-sol (puits canadien/provençal).

Figure I-3 : Composants d'un puits canadien.

Figure I-3 : la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau

Figure I-8 : Configurations variées pour la pose des conduits.

Figure I-9 : Echangeur vertical

Figure I-10 : Échangeur horizontal.

Figure I-11 : Echangeur Serpentin.

Figure I-12 : Echangeur Spiral.

#### Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : Neurone biologique

Figure III.2 : Modèle d'un neurone artificiel

Figure III.3 : Différentes architectures des RNA

Figure III.4 : importez data.mat et le code MATLAB

Figure III.4 : la structure du réseau de neurones

Figure III.5 : La valeur de MSE (Train)

Figure III.6 : La valeur de MSE (validation)

Figure III.7 : La valeur de MSE (test)

Figure III.8 : La valeur de  $R^2$

Figure III.9 : Courbe de régression  $R^2$ (prédictions vs. Valeurs réelles)

Figure III.10 : Courbe de performance (MSE vs. Nombre de neurones)

Figure III.11 : Distribution temporelle de l'erreur

# *Liste des tableaux*

*Liste des tableaux*

**Chapitre I : Généralités sur la géothermie et l'échangeur air-sol**

**Tableau I .1 : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol (Source Mussy et Soutter et RT2000)**

**Tableau I .2 : Caractéristiques des métaux constituant l'échangeur air-sol**

**Chapitre III : Résultats et discussions**

**Tableau III .1 : Résultat de la MSE et de  $R^2$  avec 100 neurones**

**Tableau III .2 : l'évolution du MSE et du  $R^2$  selon le nombre de neurones dans la couche cachée**

# ***Nomenclature***

## Nomenclature

---

### *Nomenclature*

Les différentes abréviations et notations utilisées tout au long de ce mémoire sont expliquées ci-dessous

<i>Symboles</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unités</i>
T	Température	[°C]
D	Diamètre du tuyau	[m]
L	Longueur du tuyau	[m]
x	Longueur du tuyau	[m]
z	Profondeur par rapport à la surface de la terre	[m]
V	Vitesse de l'air	[m/s]
Cp	Capacité thermique spécifique du sol	[J/kg.K]
$h_{conv}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection dans un tube	[W/m <sup>2</sup> K]
$R_{pipe}$	Résistance thermique	[m K/W]
$R_{sol}$	Résistance thermique du sol	[m K/W]
$R_{conv}$	Résistance thermique convective	[m K/W]
$G_{Tot}$	Conductivité thermique totale de l'EAHE	[W /m K]
$T_{amb}$	Température ambiante	[°C]
$T_{mean}$	Température Moyenne	[°C]
$T_s$	Température de sortie de l'air de l'EAHE	[°C]
$T_{out}$	La température de sortie de l'échangeur	[°C]
$T_{in}$	La température d'entrée de l'échangeur	[°C]
$Rh_{in}$	L'humidité entrant dans l'échangeur	[%]
$Rh_{out}$	L'humidité sortant de l'échangeur	[%]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> / s]
$\chi_i$	Fraction volumique du constituant	[m <sup>3</sup> de matériaux /m <sup>3</sup> de sol]

## Nomenclature

---

$\rho_i$	Masse volumique du constituant	[kg/m <sup>3</sup> ].
$C_i$	Capacité calorifique massique du constituant	[J/kg·K].
$r_e$	Rayon externe	[m]
$r_i$	Rayon intérieur	[m]
$\omega$	La fréquence angulaire	[rad /s]
$\dot{m}$	Débit massique	[kg/s]
$\lambda$	la conductivité thermique	[W/K.m]
$\lambda_s$	la conductivité thermique de sol	[W/K.m]
$\alpha$	Diffusivité thermique	[m <sup>2</sup> /s]
$\eta_{mean}$	Efficacité moyenne	[%]
$\phi$	Flux thermique	[J/s]

### *Acronyme des termes utilisés*

### *Définitions*

EAHE	Earth-Air-Heat-Exchanger
VMC	Ventilation mécanique contrôlée
MSE	Mean squared error
$R^2$	Coefficient de détermination (régression)
Nu	Nombre de Nusselt
Re	Nombre de Reynolds
Pr	Nombre de Prandtl
$N_n$	Nombre de neurones
ANN	Artificial Neural Network

### المخلص

تلخص هذه المذكرة دراسة حول أنظمة المبادل الحراري الهوائي - الارضي (EAHE) باستخدام الطاقة الحرارية الجوفية يتناول الفصل الأول مفاهيم الطاقة الحرارية الجوفية عالية ومنخفضة الطاقة ومكونات نظام EAHE، مثل الشبكة الأنبوبية المدفونة وعوامل التصميم المؤثرة نوع التربة عمق الدفن، خصائص الانابيب). أما الفصل الثاني فيقدم نموذجاً رياضياً لتحليل انتقال الحرارة في التربة والمبادل مع معادلات مثل قانون فورييه وعدد نسلت، مشدداً على دور الخصائص الحرارية للتربة في كفاءة النظام. ويُعنى الفصل الثالث بتطبيق شبكات عصبية اصطناعية (RNA) في MATLAB لمحاكاة أداء النظام، حيث أظهرت النتائج انخفاض خطأ المتوسط التريبيعي (MSE) وارتفاع معامل التحديد مع زيادة الخلايا العصبية حتى 65 خلية، قبل حدوث إفراط في التكيف. توصي الدراسة بتحسين النماذج عبر تقنيات التحقق المتقاطع وتوازن التعقيد لتجنب الإفراط في التكيف، مؤكدة فعالية EAHE كحل مستدام لتنظيم الحرارة في المباني.

**الكلمات المفتاحية:** أنظمة التبادل الحراري، الجوفية الشبكات العصبية الاصطناعية، خطأ المتوسط التريبيعي

معامل التحديد، الإفراط في التكيف، الموصلية الحرارية

### *Résumé*

Cette note résume une étude sur les systèmes d'échangeur de chaleur air-sous-sol (EAHE) utilisant l'énergie géothermique. Le premier chapitre aborde les concepts de l'énergie géothermique haute et basse température et les composants du système EAHE, tels que le réseau de tubes enterrés et les facteurs de conception influençant le type de sol, la profondeur d'enfouissement et les propriétés des tubes. Le deuxième chapitre présente un modèle mathématique pour analyser le transfert de chaleur dans le sol et l'échangeur avec des équations telles que la loi de Fourier et le nombre de Nusselt, en soulignant le rôle des propriétés thermiques du sol dans l'efficacité du système. Le troisième chapitre traite de l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) dans MATLAB pour simuler la performance du système, où les résultats ont montré une diminution de l'erreur quadratique moyenne (EQM) et une augmentation du coefficient de détermination avec l'augmentation du nombre de neurones jusqu'à 65 neurones, avant qu'un surajustement ne se produise. L'étude recommande d'améliorer les modèles via des techniques de validation croisée et d'équilibre de la complexité pour éviter le surapprentissage, confirmant l'efficacité de l'EAHE comme solution durable pour la régulation thermique dans les bâtiments.

**Mots-clés:** Systèmes d'échange thermique, réseaux de neurones artificiels, erreur quadratique moyenne, Coefficient de détermination, surajustement, conductivité thermique

***Abstract***

This note summarizes a study on air-soil heat exchanger (ASHE) systems using geothermal energy. The first chapter addresses the concepts of high and low temperature geothermal energy and the components of the EAHE system, such as the buried tube network and design factors influencing soil type, burial depth, and tube properties. The second chapter presents a mathematical model to analyze heat transfer in the soil and the exchanger with equations such as Fourier's law and the Nusselt number, highlighting the role of the soil's thermal properties in the system's efficiency. The third chapter deals with the application of artificial neural networks (ANN) in MATLAB to simulate the system's performance, where the results showed a decrease in the mean squared error (MSE) and an increase in the coefficient of determination with the increase in the number of neurons up to 65 neurons, before overfitting occurred. The study recommends improving the models through cross-validation techniques and complexity balancing to avoid overfitting, confirming the effectiveness of the EAHE as a sustainable solution for thermal regulation in buildings.

**Keywords:** Heat exchange systems, artificial neural networks, mean squared error, Coefficient of determination, overfitting, thermal conductivity

***Introduction***  
***Générale***

### *Introduction Générale*

Les ressources géothermiques désignent l'énergie thermique extraite du sous-sol terrestre, stockée dans la pierre, la vapeur ou l'eau liquide. Le changement climatique n'a pas d'effet notable sur l'efficacité de l'énergie géothermique, mais son déploiement à grande échelle pourrait être déterminant pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre (GES) et représenter une solution alternative face à l'augmentation des capacités et/ou au remplacement des centrales thermiques et électriques fonctionnant aux combustibles fossiles existantes. Les systèmes géothermiques actuels sont implantés dans divers contextes géologiques où les températures et profondeurs des réservoirs fluctuent en conséquence [1].

L'usage néfaste des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) contribue à la crise énergétique mondiale. Cela a contaminé la couche d'ozone en raison des rejets de CO<sub>2</sub> et de CO, entre autres. Là où ces derniers ont influencé la sphère économique, sociale et industrielle, le monde a été contraint de reconnaître l'importance de renaître et de réfléchir à des techniques respectueuses de l'environnement pour une utilisation judicieuse de ces ressources.

La transmission de chaleur dans les systèmes thermiques, et plus spécifiquement dans les systèmes d'énergie géothermique, revêt une importance considérable. Une connaissance détaillée de différentes propriétés thermiques est exposée, ce qui justifie l'importante compilation des recherches passées et actuelles sur le même thème.

Le système géothermique d'échangeur de chaleur air-sol (EAHE) exploite l'inertie thermique du sol pour réchauffer ou rafraîchir une portion de l'air renouvelable dans un habitat. Le fonctionnement du système repose sur l'introduction dans une habitation d'un courant d'air aspiré de l'extérieur qui passe par un conduit enterré à une profondeur spécifiquement définie.

Le but de travail est de proposer des modèles ANN pour améliorer la prédiction énergétique de l'échangeur de chaleur air-sol (EAHE).

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres, précédés d'une introduction générale et suivis d'une conclusion générale :

Dans le premier chapitre, présentez un panorama des diverses études menées à l'échelle mondiale qui ont conduit à une recherche bibliographique approfondie sur la géothermie et les

## **Introduction générale**

---

différents types d'échangeurs thermiques employés dans ce secteur, ainsi que les principes de leur fonctionnement et leurs spécifications techniques.

Au deuxième chapitre, quelques notions générales sur la modélisation mathématique de l'échangeur de chaleur air-sol (EAHE) sont présentées. Finalement, le troisième chapitre se consacre à l'emploi des techniques d'intelligence artificielle pour estimer la température de sortie de l'échangeur de chaleur air-sol (EAHE).

# ***Chapitre I :***

## **Généralités sur la géothermie et l'échangeur air-sol**

## **I.1. Introduction**

Transition énergétique : des fossiles aux renouvelables, un enjeu civilisationnel Depuis la révolution industrielle, l'humanité a largement reposé sur les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), dont l'exploitation intensive a généré des bouleversements climatiques, une pollution généralisée et des tensions géopolitiques. Face à l'épuisement annoncé de ces ressources et à leurs impacts dévastateurs, les énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, etc.) s'imposent comme une alternative vitale, alliant disponibilité inépuisable, réduction des émissions de gaz à effet de serre et résilience économique. Cette transition est accélérée par des avancées technologiques (stockage d'énergie, efficacité des systèmes), une prise de conscience écologique mondiale, et des stratégies politiques ambitieuses visant la neutralité carbone. Cependant, elle exige des investissements massifs, une modernisation des réseaux électriques et une coopération internationale pour surmonter les défis de l'intermittence énergétique et garantir un accès équitable à ces ressources, marquant ainsi un tournant dans l'histoire énergétique de l'humanité.

## **I. 2. La géothermie**

### **I. 2.1. Concepts généraux**

La géothermie est l'exploitation de l'énergie thermique accumulée sous la surface de la Terre. Cette "énergie thermique" est généralement disponible partout et à tout moment. C'est un avantage important par rapport aux autres sources d'énergie renouvelable (comme l'énergie solaire ou éolienne). Il est donc naturel de vouloir exploiter cette énergie.

Dans la partie supérieure de la croûte terrestre (entre 0 et 20 mètres environ), la température est déterminée par les conditions climatiques prévalant à la surface. En dessous de cette zone, la température est constante dans le temps et dépend uniquement de la profondeur. La température augmente en moyenne d'environ 3 degrés Celsius tous les 100 mètres. L'énergie thermique provient principalement de la désintégration des isotopes radioactifs de l'uranium, du thorium et du potassium [4].

### I. 2.2. Différents types de géothermies

#### I. 2.2.1. La géothermie haute énergie

Les ressources géothermiques exploitées concernent principalement la vapeur sèche ou humide (un mélange d'eau et de vapeur), dont les températures excèdent  $150^{\circ}\text{C}$ . Ces gisements se situent dans des zones volcaniques et sismiques, comme les frontières de plaques tectoniques, où le gradient géothermique est anormalement élevé. La géothermie haute énergie est majoritairement dédiée à la production électrique. La vapeur extraite du réservoir souterrain est injectée dans une turbine, entraînant un alternateur pour générer de l'électricité. Tandis que la vapeur sèche est utilisée directement, la vapeur humide, plus répandue, requiert un séparateur pour isoler la phase gazeuse de l'eau liquide avant son utilisation [2].

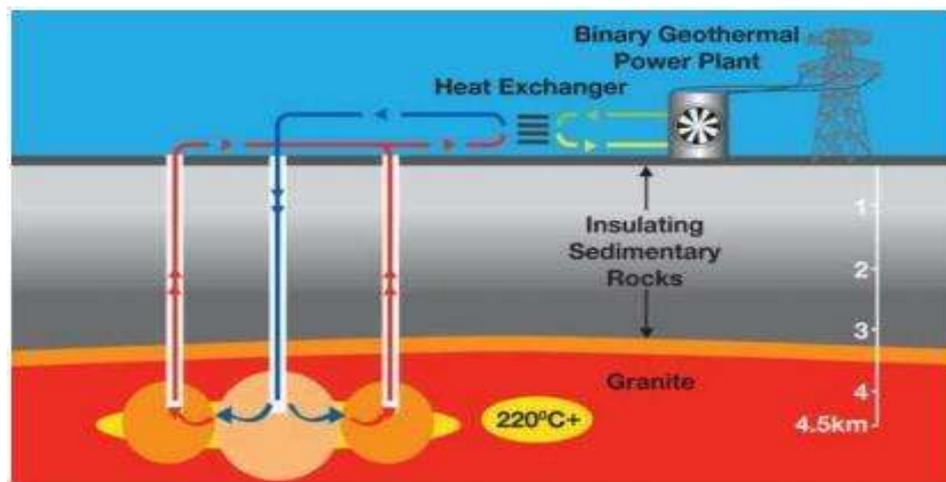


Figure I.1: Géothermie à haute énergie [14].

#### I. 2.2.2. La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie se définit par des températures allant de  $30^{\circ}\text{C}$  à  $150^{\circ}\text{C}$ . Ces ressources sont généralement exploitées à des profondeurs moyennes de 1 000 à 2 500 mètres, au sein de formations géologiques perméables saturées en eau. Ces réservoirs se situent principalement dans de grands bassins sédimentaires, caractérisés par leur étendue géographique [2].

## Chapitre I Généralités sur la géothermie et l'échangeur air-sol

Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage des serres

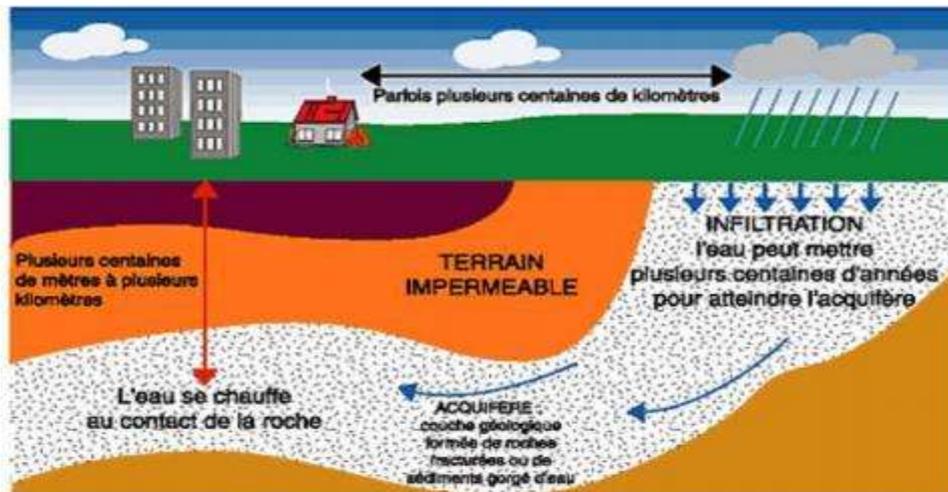


Figure I.2 : Géothermie à basse énergie [14].

Le graphique suivant représente la répartition des ressources géothermiques à travers le monde.



Figure I.3 : Carte des ressources géothermiques mondiales [10].

-  Zones propices au développement de la géothermie haute énergie (régions tectoniques et volcaniques actives émergées).
-  Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires).
-  Zones de socle cristallin peu propices.

### I. 2.4 Les avantages et les inconvénients

- **Les avantages**

1. Source d'énergie locale qui ne nécessite pas de transport.
2. Source d'énergie renouvelable non polluante pour l'environnement
3. Elle est la plus productive par rapport aux autres énergies renouvelables.

Une source d'énergie fiable et économique produisant une chaleur élevée d'environ 2000 degrés Celsius.<sup>7</sup>

4. Utilisée pour le chauffage des bâtiments, le séchage du bois, l'élevage de poissons et le séchage agricole.<sup>7</sup>

- **Les inconvénients**

1. L'exploitation de cette énergie et l'entretien de ses équipements sont très coûteux.
2. L'utilisation de l'énergie thermique est limitée.
3. Danger de glissement de terrain

### I.3. L'échangeur air-sol (EAHE)

#### I. 3.1. Concepts généraux

Un échangeur air-sol géothermique (EAHE) est un système géothermique peu profond conçu pour réguler la température intérieure d'un bâtiment grâce à un échange thermique passif avec le sous-sol. Le système fonctionne en faisant circuler l'air ambiant à travers un réseau de conduits enterrés, tirant parti des propriétés thermiques relativement stables du sol. En hiver, un transfert de chaleur du sol vers l'air circulant se produit par convection forcée, augmentant la température de l'air avant son introduction dans le bâtiment. À l'inverse, en été, le sol agit comme un puits de chaleur, refroidissant l'air lors de son passage à travers le conduit souterrain [6].

Les principaux éléments de l'échangeur air-sol EAHE sont schématisés dans la figure I-4.

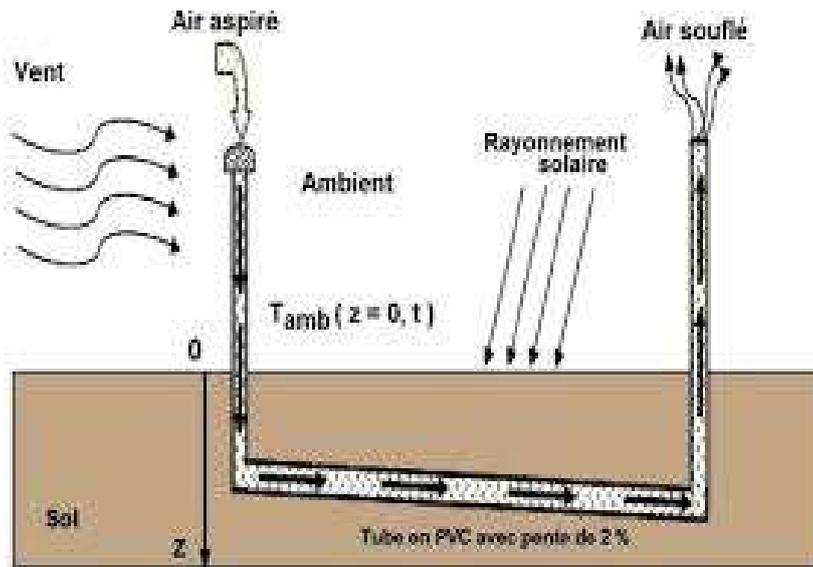


Figure I-4 : Echangeur de chaleur air-sol [30].

### I.3.2. Principe de fonctionnement d'un échangeur air-sol

Un dispositif d'échange thermique est un système conçu pour transférer de l'énergie calorifique entre deux environnements présentant des températures distinctes. À travers la cloison de séparation des deux zones, le transfert de chaleur s'effectue principalement par conduction. Lorsqu'un fluide (liquide ou gazeux) entre en contact avec une ou plusieurs surfaces, ce sont généralement les phénomènes de convection qui dominent. Parmi les exemples courants, on retrouve les systèmes de refroidissement des véhicules, les dispositifs d'évaporation des systèmes de climatisation, et les échangeurs air-terre, qui constituent l'objet central de cette analyse [3].

L'emploi d'un échangeur air-sol, souvent nommé « conduit nord-américain » ou « système méditerranéen », connaît une expansion notable ces dernières années. Son principe repose sur l'utilisation de l'air extérieur, préalablement circulant dans un réseau de tuyaux ensevelis à une distance sous la surface, pour alimenter la ventilation d'un bâtiment. La stabilité thermique du sol, comparée aux fluctuations de l'air ambiant, permet d'introduire un flux d'air modéré. Durant la saison froide, l'air est réchauffé avant son entrée dans l'habitation, tandis qu'en période estivale, il est refroidi. Il s'agit d'une forme rudimentaire de géothermie, ne nécessitant qu'une faible consommation d'électricité pour alimenter la soufflerie [3].

Historiquement, cette technique est employée en Amérique du Nord pour protéger les logements du gel durant les hivers sévères, sans recourir à un chauffage actif. En été, elle permet de réduire les pics de température de plusieurs degrés, améliorant ainsi le confort intérieur [3].

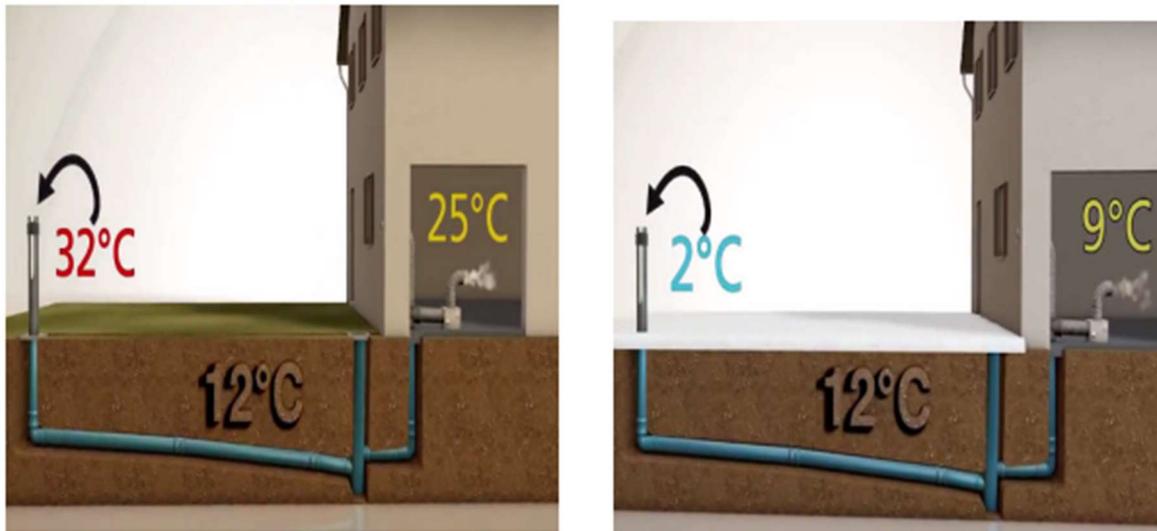


Figure I-5 : Schéma d'un échangeur air-sol (puits canadien/provençal) [3].

Le puits climatique géothermique : une solution écoénergétique

Le sous-sol terrestre conserve une température constante toute l'année, généralement comprise entre 12 °C et 15 °C selon les zones géographiques. En période estivale, cet équilibre thermique permet de refroidir l'air ambiant via un conduit enterré, transformant le dispositif en climatiseur écologique. À l'inverse, durant l'hiver, le même mécanisme réchauffe l'air extérieur, servant alors de préchauffeur naturel. En exploitant la stabilité thermique du sol, cette technologie offre une alternative durable pour réduire significativement les dépenses énergétiques [3].

Contrairement à d'autres méthodes, le puits climatique constitue l'unique approche de régulation thermique passive assurant un rafraîchissement sans recours à des appareils énergivores. Aucun ajustement technique n'est requis pour son fonctionnement optimal en saison chaude [3].

Aux intersaisons, lorsque les températures extérieures et souterraines atteignent une plage de confort (18 °C à 22 °C), il est possible de désactiver le système via une voie de contournement ou de l'isoler totalement [3].

Cette version utilise des termes comme conduit enterrer, équilibre thermique, régulation thermique passive et plage de confort pour diversifier le vocabulaire tout en clarifiant le propos [3].

### I.3.3. Les composants et la conception des échangeurs air-sol

#### I.3.3.1. Les composants [5]

- **Prise d'air neuf** : Une entrée équipée d'une grille et d'un filtre pour aspirer l'air extérieur tout en bloquant les impuretés.
- **Réseau de conduits enterrés** : Des tuyaux installés en pente ( $> 2 \%$ ) pour faciliter l'écoulement des condensats, limitant ainsi l'accumulation d'humidité et les risques de moisissures.
- **Regard de maintenance** : Un accès pour contrôler et entretenir l'installation sans difficulté.
- **Système de dérivation (by-pass)** : Permet de contourner le puits canadien en inter-saison via un relais commandé par une sonde thermique extérieure, optimisant ainsi la température de l'air insufflé.
- **Ventilateur régulé** : Garantit un débit d'air constant et adapté aux besoins du logement.
- **Module de ventilation** : Choix entre un système simple flux (renouvellement d'air basique) ou double flux (récupération de chaleur pour une efficacité énergétique accrue), selon les performances visées.

Utiliser le puits canadien sans recourir à une VMC (ventilation mécanique contrôlée) est moins performant. En réalité, la VMC est un système qui garantit le renouvellement de l'air à l'intérieur des espaces, en particulier dans les zones humides (salles d'eau, toilettes, etc.), ce qui contribue à réduire les dépenses de chauffage [5].

Associer le puits canadien à une centrale double flux (VMC) est donc fortement conseillé :

La centrale double flux VMC permet de réguler les flux d'air entrant et sortant du logement. L'air pollué extrait des pièces humides (toilettes, salle d'eau, cuisine) traverse un échangeur thermique. C'est cet échangeur qui récupère la chaleur et la transfère à l'air entrant provenant du puits canadien (l'air neuf insufflé dans l'habitation atteindra une température d'environ  $18^{\circ}\text{C}$ ) [15].

En fonction du volume d'air renouvelé et de la performance d'isolation du logement (voir Figure I-3), c'est une partie ou l'intégralité des besoins en chauffage qui sera couverte par ces deux dispositifs combinés : un échangeur géothermique et une ventilation mécanique contrôlée double flux [15].

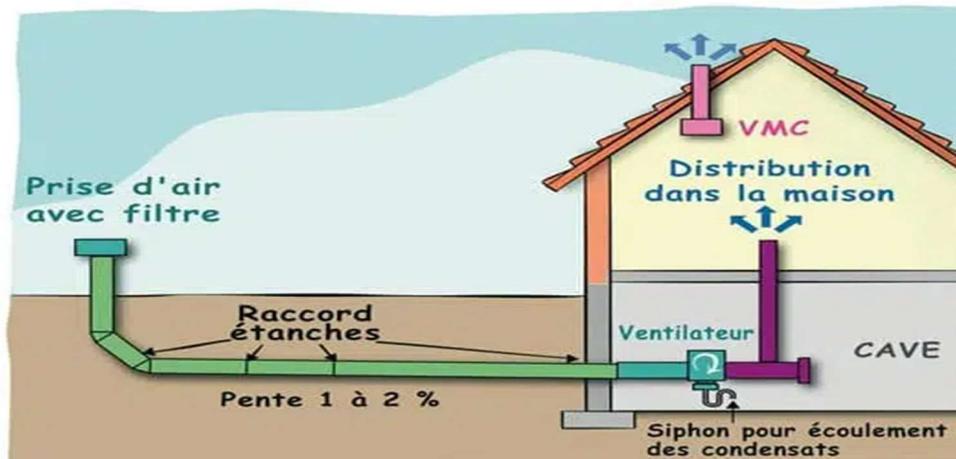


Figure I-6 : Composants d'un puits canadien [7].

### I.3.3.2. Les Conception

#### I.3.3.2.1. Nature du sol

Parmi les paramètres critiques à considérer lors de la conception d'un puits canadien (ou provençal), les propriétés thermiques du sol occupent une place centrale. Les performances du système dépendent étroitement de la capacité thermique massique (ou chaleur spécifique) et de la conductivité thermique du sol environnant [9].

#### a) La conductivité thermique du sol

La conductivité thermique du sol dépend non seulement de la composition mais aussi de la forme et de l'arrangement ses molécules constitutives, les liaisons entre ces molécules ainsi que de son contenu en eau. Le sol sera plus conducteur de chaleur. La chaleur est plus élevée lorsqu'elle est humide. Conductivité thermique du sol peut changer avec le temps, notamment en fonction Les évolutions de son contenu en eau en raison du changement climatique et Changement des saisons [9].

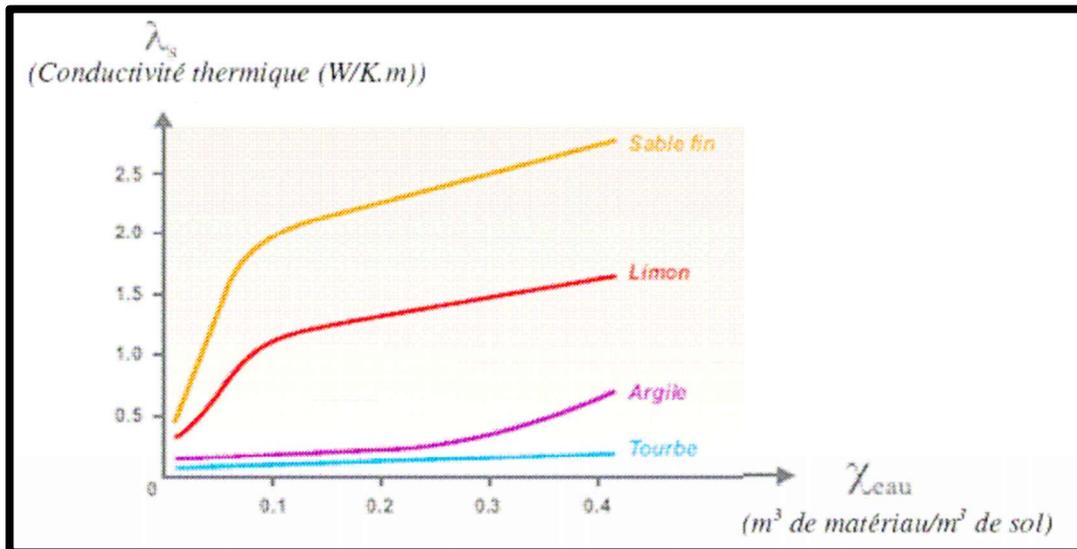


Figure I-7 : la conductivité thermique de différents types de sols en fonction de leur teneur en eau [9].

### b) Capacité calorifique du sol

La **capacité calorifique massique du sol** ( $C_s$ ) représente la moyenne pondérée des capacités calorifiques massiques de ses constituants principaux : **minéraux, matière organique, eau et air**, selon la relation :

$$C_s = \sum(\chi_i \cdot \rho_i \cdot C_i) \quad (I.1)$$

où :

- $\chi_i$  : Fraction volumique du constituant (m³ de matériau/m³ de sol).
- $\rho_i$  : Masse volumique du constituant (kg/m³).
- $C_i$  : Capacité calorifique massique du constituant (J/kg·K).

L'eau et les matières organiques ont une capacité calorifique plus élevée que les éléments minéraux, comme indiqué dans le tableau suivant :

**Tableau I .1 : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol (Source Mussy et Soutter et RT2000) [9]**

Les matériaux	La masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité thermique (kJ/K.kg)	Conductivité thermique (W/K.m)
Les métaux	2650	0,80	2,90
matière organique	1300	1,90	0,25
Argile et Limon	1200 à 1800	1,67 à 2,50	1,50
Eau	1000	4,20	0,585
Glace	920	2,10	2,20
Air	1250	1,00	0,023
Sable et Gravier	1700 à 2200	0,91 à 1,18	2,00

### I.3.3.2.2. Les Caractéristiques des canalisations

#### 1. Le débit d'air

Le débit d'air dans les conduits joue un rôle déterminant dans deux phénomènes interdépendants : les transferts convectifs air-paroi et l'apport de puissance thermique. Ce paramètre régit le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), influençant ainsi directement le coefficient de transfert thermique convectif à l'interface air-tube. Parallèlement, il module les pertes de charge dynamiques, dont la compensation énergétique repose intégralement sur le travail mécanique fourni par le système de ventilation. [5].

#### 2. La profondeur d'enfouissement des canalisations

Dans le cadre d'une exploitation du déphasage diurne à des fins de rafraîchissement passif, une implantation à 40 cm de profondeur présente une configuration viable, permettant une atténuation satisfaisante des oscillations thermiques journalières. Pour un déphasage saisonnier visant un préchauffage hivernal, une profondeur minimale de 1,50 m s'avère nécessaire afin de s'affranchir de l'influence des cycles thermiques superficiels. Bien que des profondeurs supérieures potentialisent l'efficacité thermique par augmentation de l'inertie du milieu, les contraintes technico-économiques (coûts d'excavation, complexité d'installation) limitent généralement les implantations aux couches pédologiques supérieures)[5].

### 3. La longueur des canalisations

La longueur des tubes détermine la surface d'échange et le temps de séjour de l'air dans les tubes, et la longueur optimale de l'échangeur dépend du flux dans les tubes. Par conséquent, il existe une longueur optimale pour l'échangeur de chaleur liée à la longueur de l'échange thermique, qui peut l'obtenir en comparant le coût économique de l'échangeur avec l'économie d'énergie fournie par l'allongement des tubes. Par conséquent, il est préférable d'utiliser plusieurs tubes de longueur raisonnable (20 m à 40 m) [6].

### 4. La Diamètre des canalisations

L'augmentation du diamètre des tuyaux entraîne une augmentation de la surface d'échange, mais cela n'augmente pas nécessairement l'échange thermique. Dépendance La vitesse d'écoulement de l'air réduit le coefficient d'échange thermique. Cela est dû au fait que l'augmentation de la vitesse d'écoulement diminue la rétention de la couche limite, où l'échange de chaleur se produit. Sa température sera peu affectée par la température du sol. Parmi ces flux utilisés, le diamètre optimal est d'environ 15 cm à 12 cm [6].

### 5. Géométrie et dimensions des canalisations

La configuration spatiale des conduits influence significativement les performances hydrodynamiques et thermiques du système. Une disposition linéaire ou faiblement angulaire est privilégiée pour atténuer les pertes de charge hydrauliques, principalement induites par les phénomènes de turbulence aux changements de direction. La réduction du nombre de coudes géométriques permet non seulement de limiter les résistances au flux (exprimées par l'équation de Darcy-Weis Bach) mais aussi de simplifier les opérations de maintenance préventive ou curative [9].

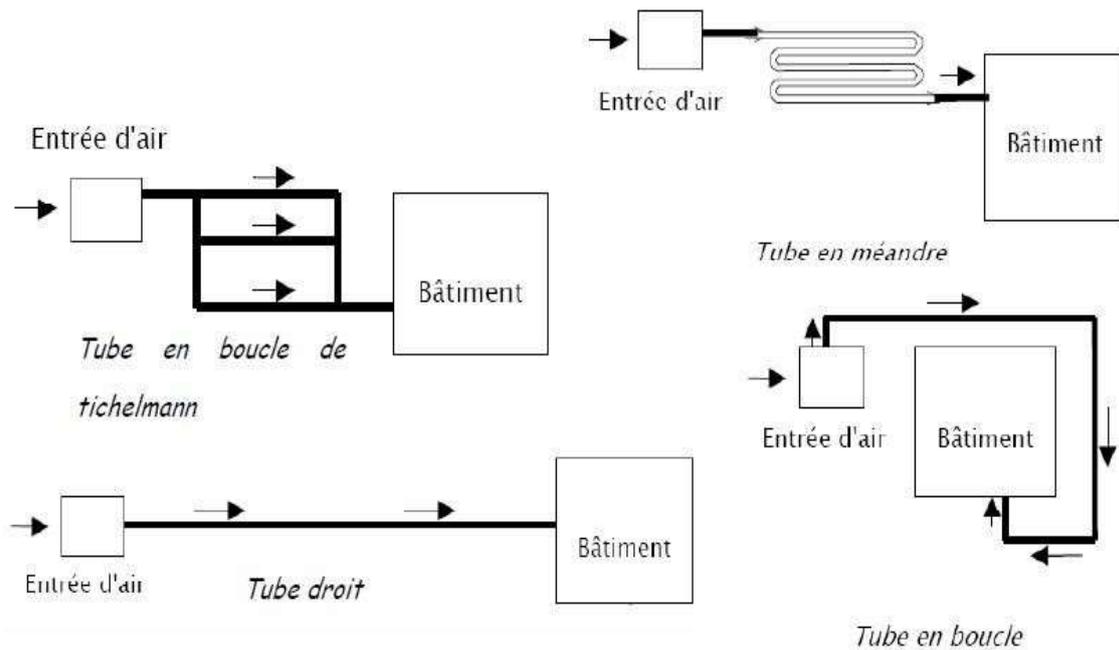


Figure I-8 : Configurations variées pour la pose des conduits [5] .

### 6. Espacement entre des canalisations

Dans les configurations de réseaux segmentés en tronçons parallèles, il est impératif de maintenir une distance inter axiale minimale de 1 mètre entre les collecteurs adjacents. Cette prescription technique vise à prévenir les phénomènes d'interférence thermique inter-sondes, qui pourraient altérer le gradient thermique naturel du sol et réduire l'efficacité énergétique globale du système [11].

### 7. Matériaux des canalisations

Tableau I.2 : Caractéristiques des métaux constituant l'échangeur air-sol [8].

Matériaux	Température de référence (°C)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Chaleur massique (kJ/kg. K)	Conductivité thermique (W/m. K)
<b>Métaux :</b>				
- Aluminium	20	2700	0.900	203-230
- Acier	20	7801	0.473	45
-Cuivre	20	8954	0.383	386
<b>Matériaux plastique :</b>				
-PVC	20	1400	1.3	0.170
-Polyéthylène	20	910-960	2.3	0.320
<b>Matériaux isolants :</b>				
-Liège (plaque)	30	160	-----	0.043
- Fibre isolante (plaque)	21	237	-----	0.48
-Laine de verre				
-Mousse de	38	64	-----	0.041
Polystyrène	0	24	-----	0.036
<b>Matériaux de construction :</b>				
-Brique de construction	20	-----	-----	0.69
- Béton	20	2000-2300	0.83-0.85	0.9-1.1
- Verre (fenêtre)	20	2700	0.80-0.84	0.75-0.80
- Bois	20	700-900	1.5-2.0	0.12-0.33

Le choix du matériau est une question de préférence. L'utilisation de murs composites à haute conductivité thermique permet d'augmenter les échanges et, par conséquent, de réduire la longueur de l'échangeur. De plus, une bonne résistance à la corrosion. Les matériaux utilisés, qu'il s'agisse de l'art ou des tubes utilisés dans les échangeurs de chaleur, doivent être de bonne qualité. Fabriquées en général. Son fonctionnement actuel est en PVC ou en polyéthylène ou en polypropylène [12].

### 8. Les principales caractéristiques des conduits

Les spécifications techniques des conduites utilisées dans les applications souterraines constituent un facteur crucial pour garantir l'efficacité et la durabilité du système. Voici les exigences fondamentales que ces conduites doivent respecter, conformément aux normes techniques et environnementales :

➤ **Résistance mécanique et rigidité structurelle [16]**

Les conduites doivent supporter les pressions mécaniques résultant du poids du sol au-dessus d'elles et rester structurellement stables sans déformation sous des charges externes, y compris celles générées par le passage d'équipements lourds. Elles doivent également résister aux facteurs chroniques comme la corrosion, surtout en raison de leur exposition constante à l'humidité et au sol, ce qui nécessite d'éviter les matériaux oxydables comme les métaux non traités.

➤ **Propriétés physico-chimiques des matériaux des conduits**

• ***Étanchéité***

Le matériau doit être non poreux pour assurer une isolation totale contre les fuites de liquides ou de gaz.

• ***Conductivité thermique***

Il est préférable d'utiliser des matériaux à haute conductivité thermique (comme le plastique renforcé) pour optimiser les échanges de chaleur, tout en évitant les matériaux à forte isolation thermique comme le béton.

- *Résistance chimique et thermique*

Elles doivent résister aux agents chimiques ou thermiques en cas de contamination accidentelle et permettre un nettoyage à haute pression sans détérioration.

- *Conception interne et surface*

La surface interne des conduites doit être lisse et sans obstacles pour éviter l'accumulation de condensats liquides, qui pourraient favoriser la prolifération bactérienne. Il faut également éviter les designs rainurés ou à aspérités, sources de turbulences aérodynamiques réduisant l'efficacité des échanges thermiques. De plus, le matériau doit être antistatique pour garantir la sécurité opérationnelle.

- *Sécurité environnementale et structurelle*

Les matériaux utilisés doivent être chimiquement inertes et ne pas libérer de composés toxiques, notamment dans des applications sensibles comme le transport d'air ou d'eau. Ainsi, l'utilisation de tubes fabriqués à partir de matériaux recyclés non certifiés est à exclure.

- *Intégrité structurelle*

Il est préférable que la conduite soit fabriquée en une seule pièce pour éviter les points de faiblesse aux jonctions. Si des raccords sont nécessaires, ceux-ci doivent répondre à toutes les spécifications mentionnées, y compris la résistance mécanique, l'étanchéité et la rigidité.

### **I.3.4. Les différents types d'échangeurs thermiques air-sol**

#### **I.3.4.1. Echangeur Vertical**

Les capteurs géothermiques verticaux sont positionnés dans un puits de forage et fixés avec du ciment. La profondeur d'installation peut s'étendre jusqu'à plusieurs centaines de mètres, à des niveaux où la température terrestre reste constante toute l'année. Un fluide caloporteur à base d'eau glycolée circule en boucle fermée dans ces conduits. Leur empreinte au sol est nettement plus réduite que celle des systèmes de captage horizontal [13].

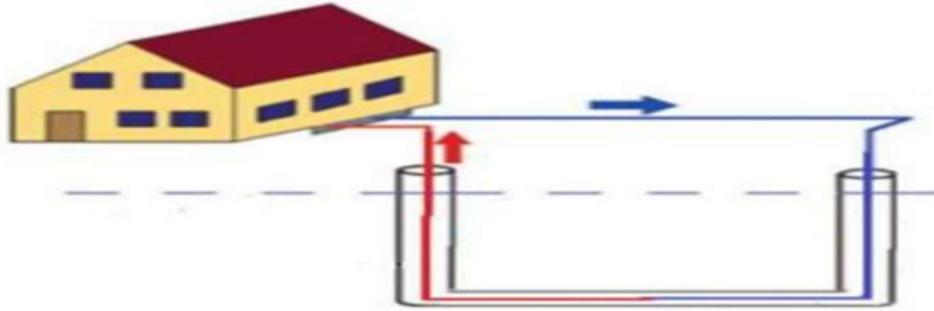


Figure I-9 : Echangeur vertical [13].

### I.3.4.2. Echangeur Horizontal

À ce jour, aucun cadre légal ou standard technique n'encadre spécifiquement l'installation des capteurs géothermiques horizontaux. Seules des recommandations non contraignantes et des guides de bonnes pratiques sont disponibles pour orienter leur mise en œuvre [13].



Figure I-10 : Échangeur horizontal [13].

### I.3.4.3. Echangeur Serpents

Les réseaux de conduites en forme de serpentin sont enfouis horizontalement à une profondeur maximale de 3 mètres dans le sol, où ils prélèvent ou restituent de l'énergie thermique. Étant généralement installés entre 0,5 et 3 mètres de profondeur, ces systèmes sont

Fortement influencés par les conditions climatiques locales. Dans ce contexte, le sol agit principalement comme un réservoir de stockage de l'énergie solaire, tandis que la géothermie profonde ne joue qu'un rôle accessoire. Selon l'altitude, ces installations permettent d'extraire une puissance thermique de 20 à 30 watts par mètre carré ( $W/m^2$ ) [13].



Figure I-11 : Echangeur Serpentins [13].

### I.3.4.4. Echangeur Spiral

Composé de deux canaux concentriques formés par des plaques métalliques enroulées en spirale, cet échangeur utilise des entretoises soudées pour maintenir l'espacement entre les canaux, adapté au débit et aux caractéristiques des fluides. Ces entretoises génèrent un écoulement turbulent, optimisant le transfert de chaleur. Il fonctionne en mode monophasique (liquides en contre-courant) ou diphasique (condensation/évaporation), avec un fluide gazeux dans un canal ouvert et un frigorigène dans un canal fermé. Son design spiralé permet un auto-nettoyage grâce à l'absence de zones stagnantes : en cas d'encrassement, l'augmentation de pression accélère le fluide, créant des turbulences qui décollent les dépôts via des forces de cisaillement. Cela réduit la maintenance et préserve l'efficacité thermique. Utilisé principalement en climatisation et production de froid/chaud. [13]

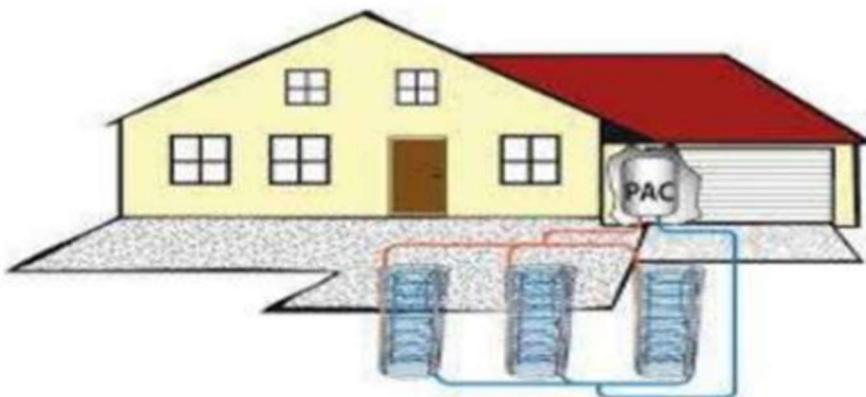


Figure I-12 : Echangeur Spiral [13].

### **I.4.Conclusion**

À la fin de ce chapitre, nous avons découvert le concept de l'énergie géothermique et sa contribution à notre vie en utilisant l'échangeur de chaleur géothermique, également connu sous le nom de puits canadien, qui réduit la consommation d'énergie principalement en période estivale dans les climats arides et semi-arides pour le refroidissement des bâtiments.

***Chapitre II:***  
***Modélisation mathématique***

### II.1. Introduction

Ce chapitre vise à développer un modèle mathématique intégré pour analyser la distribution thermique du sol à différentes profondeurs et déterminer la température de l'air à la sortie des systèmes d'échange thermique, en prenant en compte les interactions entre les facteurs internes (tels que la conductivité thermique, l'humidité, la structure stratigraphique) et les facteurs externes (tels que les variations météorologiques, le rayonnement solaire et la couverture végétale). Le modèle s'appuie sur une approche pluridisciplinaire intégrant les principes de transfert de chaleur, les propriétés géotechniques du sol, et des équations différentielles partielles décrivant le transfert d'énergie dans des milieux hétérogènes, soutenues par une calibration expérimentale des paramètres clés. Le modèle met en évidence sa capacité à relier les processus sous-terrains aux conditions opérationnelles de surface, afin d'évaluer l'efficacité des systèmes géothermiques.

### II.2 .Modélisation de la température du sol

#### II.2. 1.La conduction thermique

La conduction thermique est un processus de transfert d'énergie thermique à travers un matériau sans mouvement macroscopique de celui-ci, résultant des interactions directes entre ses particules (atomes, molécules). Ce transfert s'effectue des zones à température élevée vers les zones à température plus basse, conformément à la loi de Fourier, qui décrit le flux thermique comme proportionnel au gradient de température et à la conductivité thermique ( $\lambda$ ) du matériau, et inversement proportionnel à son épaisseur. Ce phénomène est fondamental dans les systèmes d'échange thermique statiques, notamment dans les applications géothermiques [22].

#### II.2. 2.Relation avec les puits canadiens (échangeurs air-sol)

La conduction thermique intervient principalement dans le transfert de chaleur entre le sol et les parois des tuyaux, tandis que la convection régit l'échange entre ces parois et l'air intérieur.

L'efficacité du système dépend fortement des propriétés thermiques du sol, notamment sa conductivité thermique ( $\lambda$ ), influencée par sa nature (argileux, sableux) et son taux d'humidité. Par exemple, un sol argileux humide présente une conductivité thermique supérieure à un sol sec ou sableux, améliorant ainsi l'échange thermique. Une analyse précise de la conduction thermique du sol est donc essentielle pour concevoir des puits canadiens performants, adaptés aux divers climats [24].

Ci-dessous est utilisée pour modéliser mathématiquement la température du sol : [17]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.1})$$

Conditions aux limites :

- **A la surface (z=0):**

$$T(0, t) = T_{\text{mean}} + A_a \cos(\omega(t - t_0)) \quad (\text{II.2})$$

Où

$T_{\text{mean}}$ : est température annuelle moyenne

A : l'amplitude des fluctuations journalières

$\omega$  : La fréquence angulaire

$\alpha$  : Diffusivité thermique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

- **À l'infini (z  $\rightarrow \infty$ ):**

$$T(\infty, 0) = T_{\text{mean}} \quad (\text{II.3})$$

Ces conditions reflètent l'influence des variations journalières en surface et la stabilité thermique en profondeur [23].

### II.2. 3. La diffusivité thermique :

La diffusivité thermique ( $\alpha$ ) est une propriété thermo physique qui caractérise la rapidité avec laquelle un matériau réagit aux changements de température. Elle est définie par le rapport entre la conductivité thermique ( $k$ ) et la capacité thermique volumique ( $\rho \cdot C_p$ ), où  $\rho$  est la masse volumique et  $C_p$  [18].

La capacité thermique massique à pression constante. Mathématiquement, elle s'exprime comme suit : [17]

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (\text{II.4})$$

$\lambda$  : Conductivité thermique du sol [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]

$C_p$ : Capacité calorifique massique du sol [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]

$\rho$  : Masse volumique du sol [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\alpha$  : Diffusivité thermique [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

Cette grandeur, exprimée en [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] décrit la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur tout en stockant partiellement l'énergie. Contrairement à la conductivité thermique

(qui quantifie le flux de chaleur en régime stationnaire), la diffusivité thermique est cruciale dans les régimes transitoires, comme les variations temporelles de température dans les systèmes géothermiques [18].

Où la diffusivité thermique du sol est donnée par : [17]

$$T(z, t) = T_{\text{mean}} + A_s \left( \text{Exp} - (z) \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}} \cos \left\{ 365(t - t_0) - (z/2) \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}} \right\} \right) \quad (\text{II.5})$$

La diffusivité thermique dépend de la nature du sol, chaque zone géographique à une profondeur optimale d'où la température géothermique se stabilise : entre 22°C et 25°C [17].

### II.2. 4. La température à la sortie de l'échangeur :

La température de l'air à la sortie de l'échangeur air-sol (EAHE) dépend principalement des propriétés thermiques du sol, de la profondeur d'installation, du débit d'air et de la température initiale de l'air entrant. Les études montrent que le sol agit comme un réservoir thermique doté d'une inertie thermique élevée, lui permettant de maintenir des températures relativement stables tout au long de l'année, notamment à des profondeurs supérieures à 1,5 mètre. Ainsi, en été, l'air circulant dans les tuyaux enterrés est refroidi, tandis qu'en hiver, il est réchauffé avant sa sortie [19].

À la sortie de l'EAHE, la température de l'air est prédite comme suit : [17]

$$T_s = T_{\text{amb}} + (T(z, t) - T_{\text{amb}}) \times 1 - e^{-\frac{G_{\text{Tot}}}{\dot{m}C_{pf}}} \quad (\text{II.6})$$

### II.2. 5. L'efficacité thermique :

L'efficacité thermique d'un échangeur air-sol (EAHE) mesure sa capacité à transférer de l'énergie entre l'air et le sol. Elle dépend de l'écart de température entre l'air entrant et le sol, ainsi que des propriétés géothermiques et des paramètres opérationnels du système. [18]

Mathématiquement, elle peut être exprimée par : [17]

$$\eta_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^{24} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{out}}(i))}{\sum_{i=1}^{24} (T_{\text{amb}}(i) - T_{\text{soil}})} \quad (\text{II.7})$$

Une efficacité élevée (proche de 1) indique un transfert thermique optimal, atteint lorsque l'air atteint presque la température du sol [20]

### II.3 .Modélisation de l'échangeur EAHE :

L'EAHE, qui mesure 50 m de long, est divisé en 100 éléments, chacun mesurant 0,5 m. Il est présumé Que la température du sol est plus altérée par le flux d'air [17].

#### II.3.1. La convection dans un tube :

La convection dans un tube désigne le transfert de chaleur entre un fluide (liquide ou gazeux) en mouvement et les parois du tube. Ce phénomène est central dans les systèmes tels que les échangeurs de chaleur, les circuits de refroidissement ou les échangeurs air-sol (EAHE). Il existe deux régimes principaux de convection :

- a) **Convection forcée** : Le fluide est mis en mouvement par une source externe (pompe, ventilateur).
- b) **Convection naturelle** : Le mouvement résulte des gradients de densité causés par les différences de température (rare dans les EAHE) [21].

#### II.3.2. Le coefficient de transfert :

Le coefficient de transfert de chaleur par La convection dans un tube est défini par : [17]

$$h_{conv} = \frac{Nu\lambda}{D} \quad (II.8)$$

$h_{conv}$  est le coefficient de convection thermique (en W/m<sup>2</sup>•K). Pour un tube, h dépend de :

#### II.3. 3.Le nombre de Nusselt :

Le nombre de Nusselt a été exprimé par la corrélation suivante : [17]

$$Nu = 0.0214(Re^{0.8} - 100)Pr^{0.4} \quad (II.9)$$

#### II.3.4. Le nombre de Reynolds et de Prandtl :

Les nombres de Reynolds et de Prandtl à l'intérieur du tube sont calculés par : [17]

$$Re = \frac{V_{air}D_i}{\nu} \quad (II.10)$$

En régime laminaire (nombre de Reynolds  $Re < 2300$ ), l'écoulement est ordonné avec un profil de vitesse parabolique.

En régime turbulent ( $Re > 4000$ ), le mélange chaotique du fluide améliore le transfert thermique [23].

$$Pr = \frac{\nu \rho C_p}{\lambda} \quad (II.11)$$

Le transfert de chaleur le long du tuyau enterré peut être calculé par : [17]

$$\Phi = \dot{m}c_{pf}dT(x) = \frac{dx}{R_{conv}+R_{pipe}+R_{soil}} (T(z, t) - T(x)) \quad (II.12)$$

### II.3.5. La résistance thermique totale :

La résistance thermique du tuyau est exprimée par : [17]

$$R_{pipe} = \frac{1}{\lambda_{pipe} 2\pi} \ln(r_e/r_i) \quad (II.13)$$

Où  $k_{pipe}$  est la conductivité thermique du matériau du tube  $r_e$  et  $r_i$  les rayons externe et interne.

La résistance thermique convective sur la surface intérieure du tuyau est : [17]

$$R_{conv} = \frac{1}{r_i h_{conv} 2\pi} \quad (II.14)$$

La résistance thermique du sol est calculée par : [17]

$$R_{sol} = \frac{1}{\lambda 2\pi} \ln(R_{(z,t)}/r_e) \quad (II.15)$$

Ensuite, le coefficient de transfert de chaleur total de l'EAHE est donné comme suit : [17]

$$G_{Tot} = \frac{1}{(R_{conv} + R_{pipe} + R_{sol})} \quad (II.16)$$

En combinant les équations (12) à (16), le bilan énergétique se lit comme suit : [17]

$$\frac{dT(x)}{T(z,t) - T(x)} = \frac{G_{Tot}}{\dot{m} c_{p_f}} dx \quad (II.17)$$

L'intégration de l'équation (17) est alors : [17]

$$-\ln(T(z,t) - T(x)) = \frac{G_{Tot}}{\dot{m} c_{p_f}} x + Cte \quad (II.18)$$

L'équation de la frontière à la surface du sol est : [17]

$$T(0) = T_{amb} \quad (II.19)$$

L'équation suivante est obtenue lorsque la constante de l'équation (18) est remplacée par son

Expression déduite de l'équation (19) : [17]

$$\frac{\ln(T(x) - T(z,t))}{(T_{amb} - T(z,t))} = \frac{-G_{Tot}}{\dot{m} c_{p_f}} x \quad (II.20)$$

Enfin, la température de l'air peut être calculée à la sortie ( $x = L$ ) comme suit : [17]

$$T_s = T_{amb} + (T(z,t) - T_{amb}) * \left(1 - e^{-\frac{G_{Tot}}{\dot{m} c_{p_f}} x}\right) \quad (II.21)$$

### II.4. Conclusion :

Ce chapitre représente une étape fondamentale dans la compréhension des mécanismes thermiques du système d'échangeur air-sol (EAHE) à travers la présentation d'un modèle mathématique complet. En partant de la modélisation de la distribution de la température du sol à l'aide de l'équation de conduction thermique transitoire, en passant par le calcul des résistances thermiques du tuyau et du sol, et jusqu'à l'équilibre énergétique et la détermination de la température de l'air en sortie, ce modèle fournit un cadre théorique applicable pour optimiser l'efficacité des systèmes de chauffage et de refroidissement.

Les résultats ont montré que les propriétés thermiques du sol, telles que la diffusivité et la conductivité, jouent un rôle central dans l'atténuation des fluctuations journalières de température avec la profondeur. Les équations de transfert de chaleur dans le tuyau ont également confirmé l'importance de facteurs comme la vitesse de l'air et les propriétés des matériaux dans la détermination de la résistance thermique totale. En intégrant ces éléments, une équation globale a été développée pour calculer la température de sortie, reflétant clairement la perte progressive de chaleur de l'air lors de son passage dans le tuyau.

Ce modèle ne se limite pas à l'aspect théorique, mais ouvre la voie à des applications pratiques dans la conception de systèmes EAHE à haute efficacité, notamment dans les régions aux conditions climatiques variées. Cependant, les hypothèses simplificatrices, comme la considération du sol comme un milieu homogène ou la négligence de l'effet de l'humidité, soulignent la nécessité d'études futures prenant en compte les complexités réelles, telles que les types de sols variés et l'impact des variations saisonnières à long terme.

Enfin, ce chapitre met en évidence le rôle de la modélisation mathématique comme outil puissant pour soutenir la transition vers les technologies énergétiques durables. Le système EAHE contribue à réduire la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles, favorisant ainsi la durabilité environnementale et les objectifs de l'économie verte.

***Chapitre III :***  
***Résultats et discussion***

### III.1. Introduction :

Ce chapitre vise à présenter et analyser les résultats obtenus lors de la modélisation des performances d'un échangeur géothermique air-sol (**EAHE**) à l'aide de réseaux de neurones artificiels (**ANN**) dans l'environnement **MATLAB**. Plusieurs stratégies de modélisation de la relation entre les variables d'entrée (température d'entrée  $T_{in}$ , humidité relative d'entrée  $Rh_{in}$ , et humidité relative de sortie  $Rh_{out}$  et la variable de sortie (température de sortie  $T_{out}$ ) ont été évaluées. Les stratégies comprenaient des tests intensifs sur le nombre de neurones dans les couches cachées et les algorithmes d'apprentissage, avec une mesure des performances via des métriques statistiques telles que l'erreur quadratique moyenne (**MSE**) et le coefficient de détermination  $R^2$ .

### III.2. Les réseaux de neurones

#### III.2.1. Neurones artificiels

Un réseau de neurones artificiels (RNA) se définit comme un système computationnel massivement parallèle à architecture distribuée, doté d'une propension intrinsèque à l'acquisition et à la mémorisation de connaissances expérientielles. Cette architecture connexionniste s'inspire du modèle biologique cérébral selon deux axes fondamentaux :

- **Mécanisme d'apprentissage adaptatif** : L'assimilation des connaissances s'effectue par apprentissage itératif via des algorithmes de régulation des paramètres internes.
- **Représentation distribuée de l'information** : La mémoire associative est encodée dans l'intensité des connexions inter-neuronales, matérialisées par des poids synaptiques ajustables.

D'un point de vue opérationnel, les RNA présentent des propriétés computationnelles remarquables, notamment :

- **Non-linéarité intrinsèque** : Chaque unité neuronale élémentaire constitue un dispositif de transformation non linéaire. Cette propriété, émergente de l'interconnexion hiérarchisée de multiples neurones, confère au système global une capacité à modéliser des dynamiques complexes où prédominent des interactions non linéaires. Cette non-linéarité inhérente découle généralement des fonctions d'activation des unités de traitement élémentaires et permet l'approximation de systèmes physiques ou biologiques présentant des comportements chaotiques, multivariés ou à seuils.

## Chapitre III Résultats et discussion

---

Cette capacité constitue un atout majeur pour l'analyse et la modélisation de phénomènes complexes présentant des comportements non linéaires indécélables par les méthodes analytiques traditionnelles [25].

### III.2.2. Neurone biologique :

Le neurone, unité fondamentale du système nerveux central, se compose d'une structure cellulaire polarisée assurant la transmission intégrée de l'information. Son architecture comprend :

- **Le soma (corps cellulaire) :** Centre métabolique et intégrateur des signaux électrochimiques.
- **Les dendrites :** Prolongements cytoplasmiques ramifiés spécialisés dans la captation des stimuli afférents, provenant de l'environnement extracellulaire ou de neurones présynaptiques.
- **L'axone :** Prolongement efférent unique assurant la propagation unidirectionnelle des potentiels d'action vers les cellules cibles.

La communication interneuronale s'effectue via les synapses – interfaces fonctionnelles séparant l'extrémité axonale (bouton présynaptique) des dendrites postsynaptiques. Cette transmission s'opère par libération de neurotransmetteurs dans la fente synaptique, déclenchant des mécanismes de transduction chimico-électrique [26].

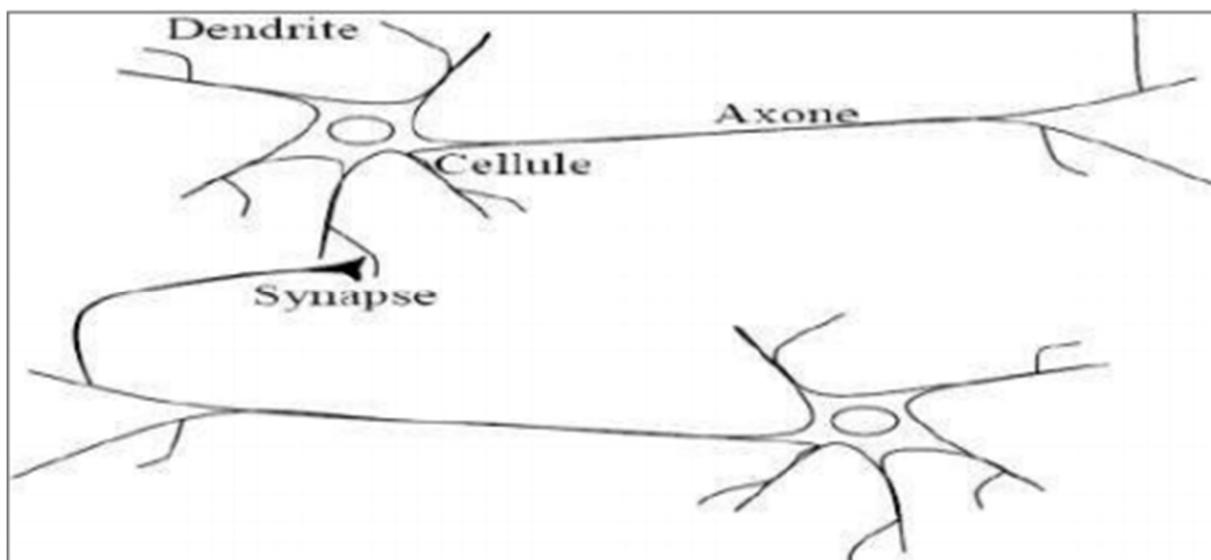


Figure III.1 : Neurone biologique [26].

### III.2.3. Principes d'un neurone artificiel

Le neurone artificiel, unité fondamentale des modèles connexionnistes, opère comme un processeur élémentaire recevant un vecteur d'entrées modulées par des coefficients synaptiques ajustables ( $w_i$ ), reflétant l'impact relatif des connexions présynaptiques. Ces entrées pondérées sont intégrées via une sommation spatiale ( $\sum w_i x_i$ ) combinée à un biais ( $b$ ), puis transformées par une fonction d'activation non linéaire ( $\phi$ ) générant un signal de sortie unique. Ce signal, propagé vers les neurones avals via des connexions ramifiées, permet une transmission hiérarchisée au sein d'architectures feedforward ou récurrentes. Les poids synaptiques ( $w_{ij}$ ), paramètres clés de l'adaptabilité du système, sont optimisés par apprentissage automatique pour encoder progressivement les relations complexes entre stimuli et réponses, mémorisant ainsi les connaissances au travers de la plasticité du réseau [27].

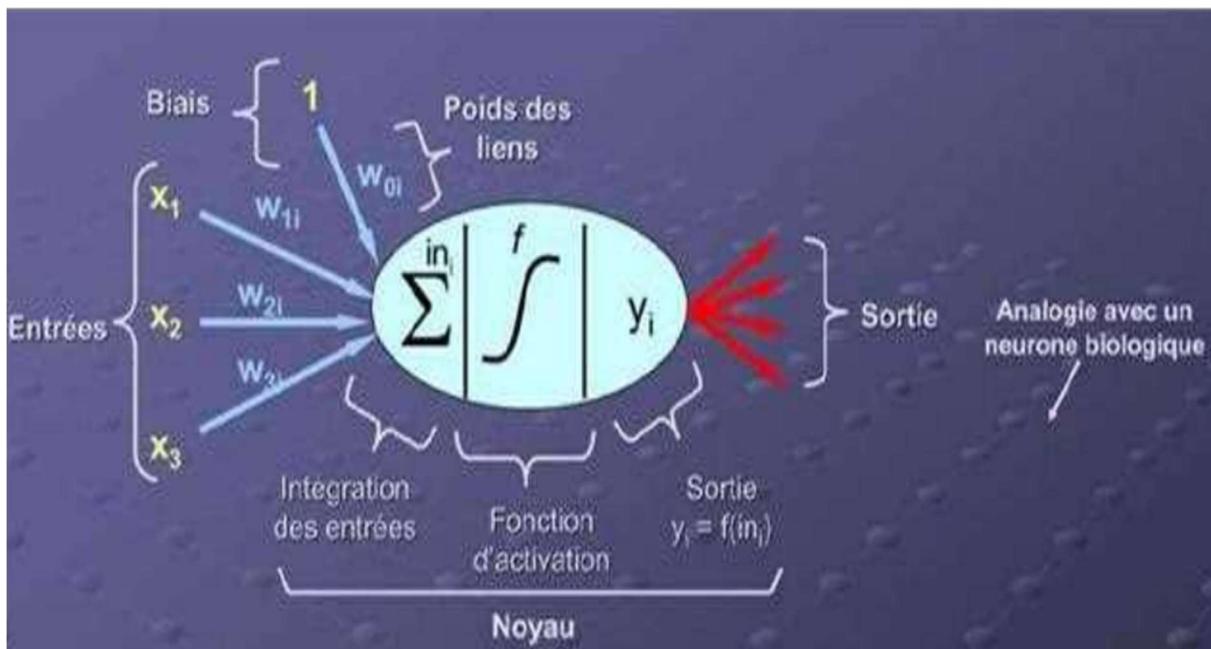


Figure III.2 : Modèle d'un neurone artificiel [28].

### III.2.4. Apprentissage des réseaux de neurones artificiels (RNA)

L'apprentissage des RNA constitue une étape cruciale visant à ajuster leurs paramètres internes pour atteindre un comportement cible. Deux paradigmes principaux structurent cette phase :

- **Apprentissage supervisé (ex. : Perceptron, Adaline)** : Le réseau reçoit des entrées associées à des sorties désirées. L'objectif est d'optimiser les poids synaptiques pour minimiser l'écart entre la sortie calculée et la sortie attendue.

- **Apprentissage non supervisé (ex. : Hopfield, Kohonen) :** Aucune sortie de référence n'est fournie. Le réseau auto-organise ses paramètres à partir des régularités intrinsèques des données, convergeant vers un état stable.

Processus itératif d'apprentissage :

Étape 1 : Propagation des entrées vers la sortie via les poids synaptiques actuels.

Étape 2 : Calcul de l'erreur par comparaison entre sortie générée et sortie cible (supervisé) ou analyse de la cohérence interne (non supervisé).

Étape 3 : Rétropropagation de l'erreur pour ajuster les poids, via des algorithmes d'optimisation (ex. : descente de gradient).

Étape 4 : Répétition cyclique sur un ensemble d'exemples jusqu'à convergence, c'est-à-dire une minimisation stable de l'erreur ou une organisation cohérente des données.

Cette méthodologie, initiée par la règle de Hebb (1949), permet aux RNA de modéliser des relations complexes, essentielle dans des applications comme le diagnostic des machines tournantes [29].

### III.2.5. Architecture des RNA

La diversité des types de réseaux neuronaux reflète la diversité des motifs géométriques de connexion entre les éléments neuronaux. Les architectures des réseaux neuronaux sont déterminées par la manière dont les éléments (neurones) sont connectés et leur organisation spatiale. Ces architectures sont classées en catégories principales en fonction de deux caractéristiques essentielles : la présence ou l'absence de boucles de rétroaction (feedback loops), ainsi que l'organisation des éléments en couches successives. La classification architecturale des réseaux de neurones montre que la différence fondamentale réside dans la possibilité d'avoir des boucles récurrentes qui permettent de nourrir des informations d'une couche à une autre précédente ou même à la même couche (comme les réseaux de neurones récurrents), par rapport aux réseaux à connexion unidirectionnelle (comme les réseaux de neurones à propagation avant). De plus, l'organisation des éléments en couches est considérée comme un élément distinctif dans de nombreuses architectures, telles que les réseaux de neurones multicouches qui se composent d'une couche d'entrée, d'une ou plusieurs couches cachées et d'une couche de sortie [29].

Cette diversité architecturale **Figure III.3** permet de choisir le réseau le plus approprié en fonction de la nature du problème traité, en tenant compte des exigences de traitement (comme la complexité computationnelle et la précision requise) [29].

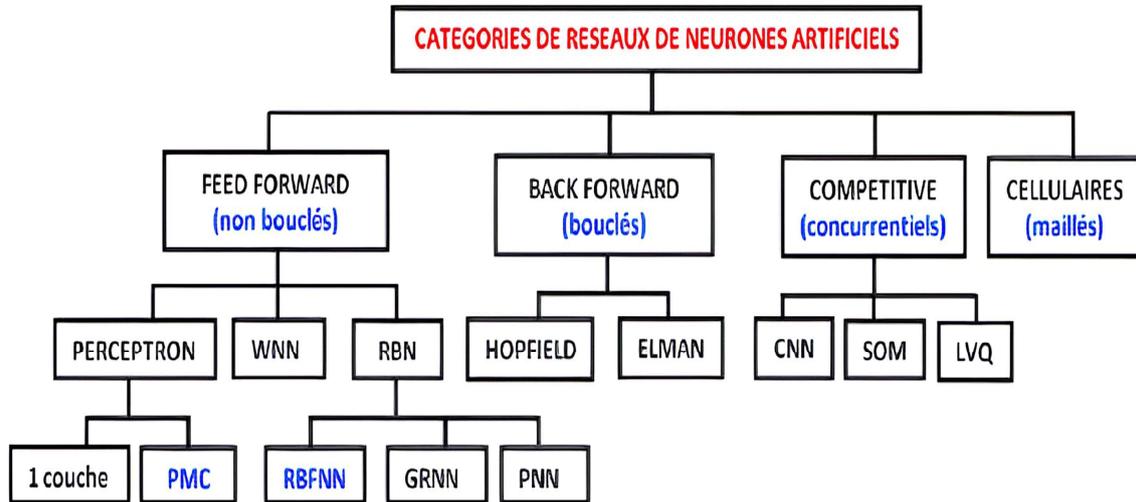


Figure III.3 : Différentes architectures des RNA [30]

### III.3. Préparation des données et méthodologie de modélisation

#### III.3.1. Architecture du réseau de neurones

Le réseau a été conçu avec la fonction **newff** de **MATLAB**, comprenant une couche cachée avec un nombre variable de neurones (de 5 à 100, par pas de 5). Une couche de sortie génère la prédiction de  $T_{out}$ .

##### III.3.1.1. Paramètres d'apprentissage :

- **Boîte à outils *Neural Network Toolbox*** : Pour la construction des réseaux de neurones.
- **Algorithme d'apprentissage** : Levenberg-Marquardt (`trainlm`).
- **Arrêt précoce (*Early Stopping*)** : Pour éviter le surapprentissage en surveillant l'erreur de validation.
- **Division des données** : Aléatoire via `dividerand`.
- **Critère de performance** : Erreur quadratique moyenne (MSE).
- **Nombre d'époques (Epochs)** : 40.
- **Coefficient Mu** : 0.001.

## Chapitre III Résultats et discussion

### III.3.2. Traitement des données

Les données ont été chargées depuis le fichier (data.mat), avec les colonnes

[  $t$   $T_{in}$  ;  $Rh_{in}$  ;  $Rh_{out}$  ] comme entrées, et  $T_{out}$  comme sortie

### III.4. Résultats :

#### III.4.1. Analyse des performances et des régressions en fonction du nombre de neurones

- Le cadre de travail dans MATLAB :

Nous avons pris un exemple avec  $n=100$  pour expliquer la méthode de calcul de la **MSE** et de  **$R^2$**

Tout d'abord, importez **data.mat** et le code MATLAB :

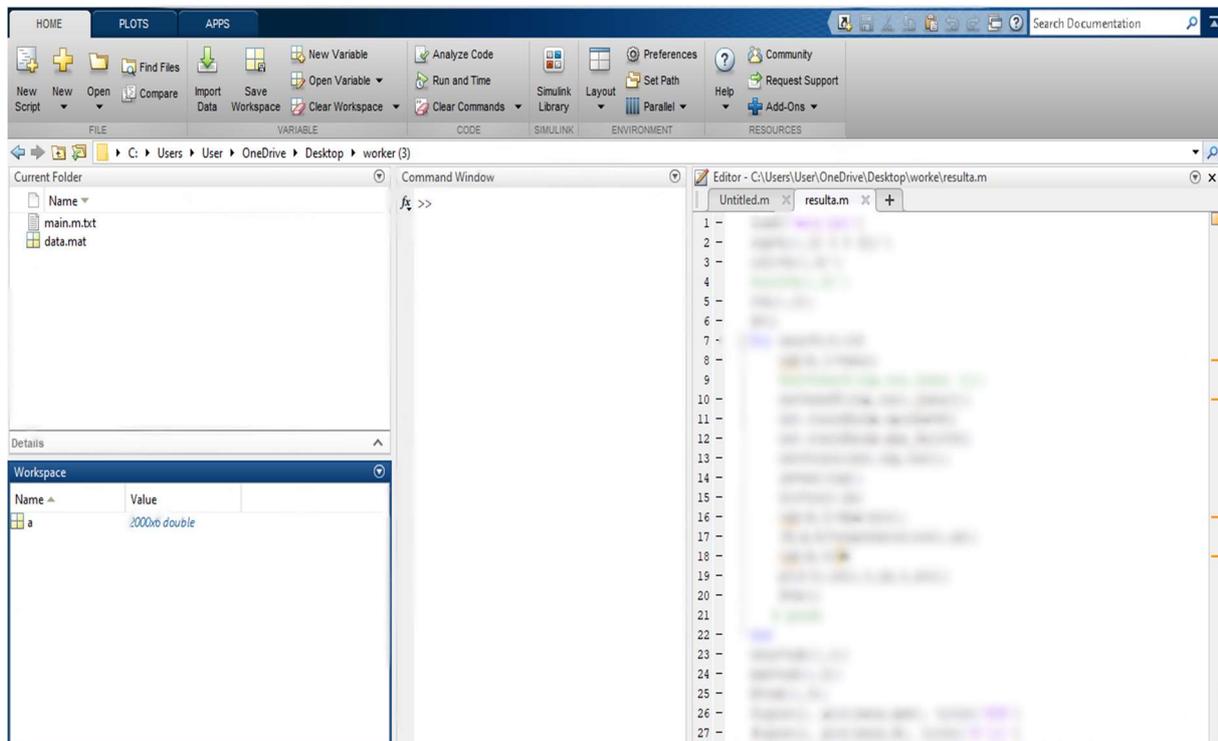


Figure III.4 : importez data.mat et le code MATLAB

## Chapitre III Résultats et discussion

Après avoir cliqué sur "run", nous passons directement à la structure du réseau de neurones

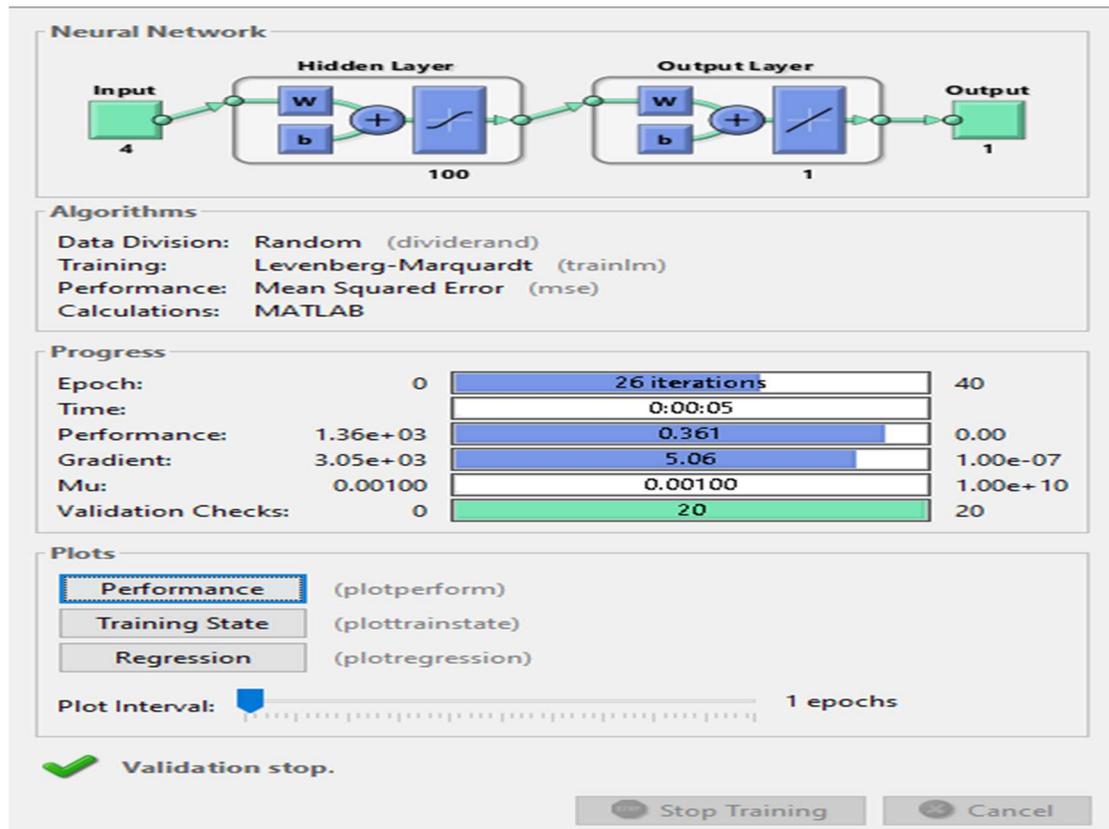


Figure III.4) :la structure du réseau de neurones

Après avoir cliqué sur performance, nous obtenons la courbe suivante

La valeur de MSE est extraite comme suit :

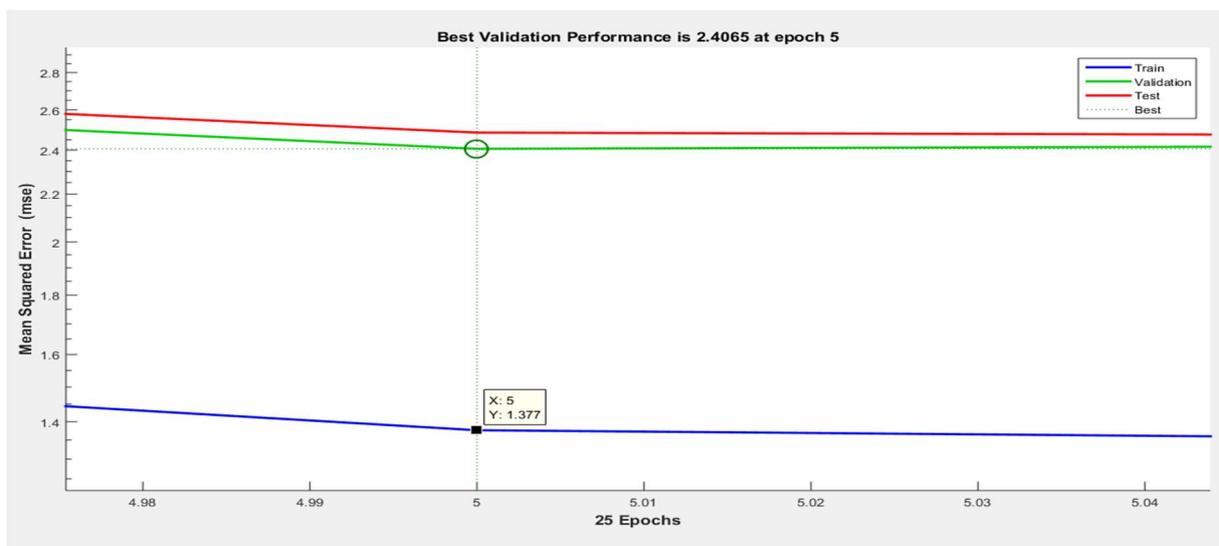


Figure III.5 : La valeur de MSE (Train)

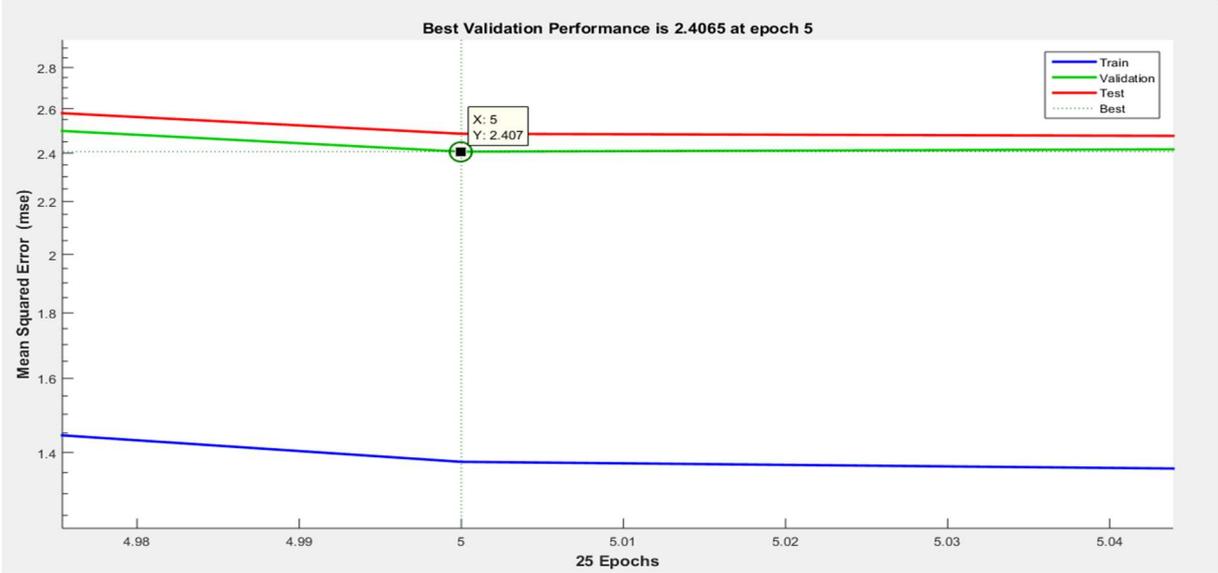


Figure III.6 : La valeur de MSE (validation)

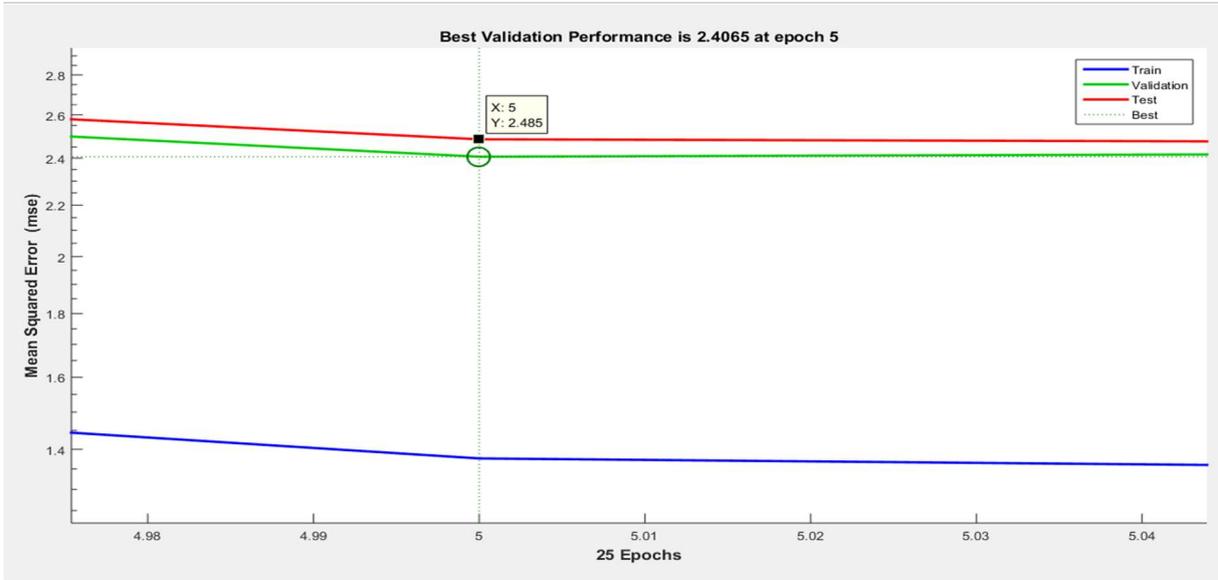


Figure III.7 : La valeur de MSE (Test)

## Chapitre III Résultats et discussion

Après avoir cliqué sur la régression, nous obtenons la courbe suivante.

Les courbes suivantes montrent la valeur

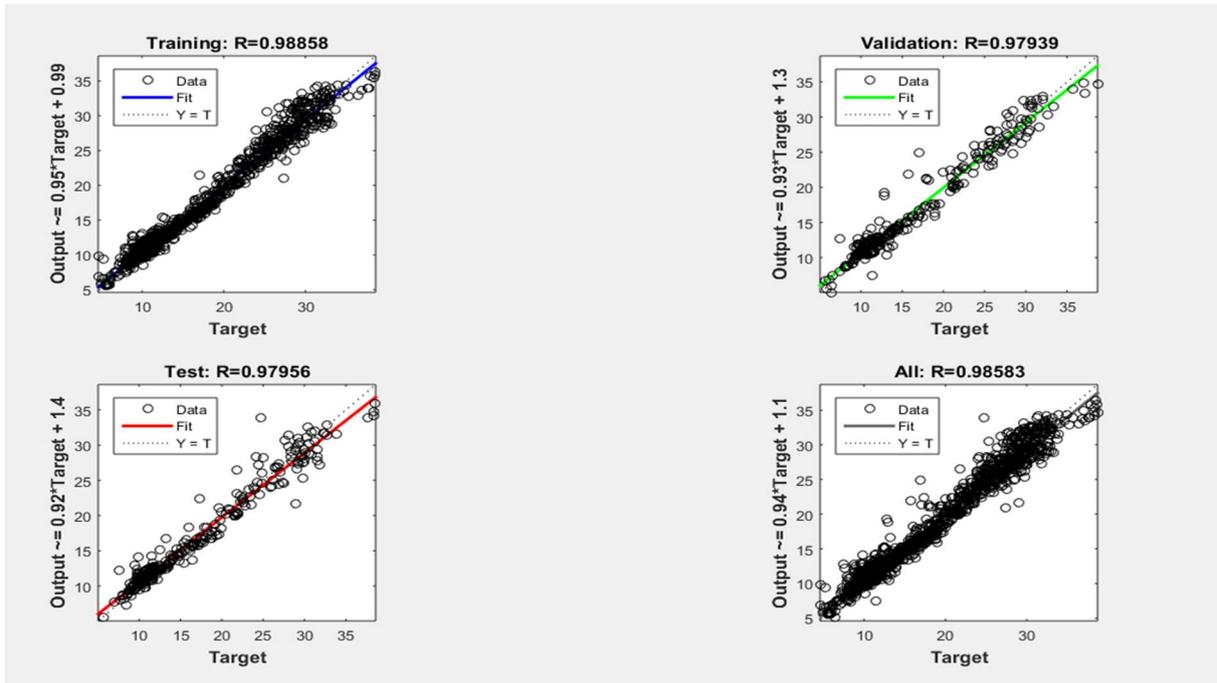


Figure III.8 : La valeur de  $R^2$

Après avoir attribué les valeurs de MSE pour l'apprentissage, la validation et le test, nous prenons la répartition comme suit :

- 70% pour l'apprentissage,
- 15% pour la validation,
- 15% pour le test.

Et le calcul est le suivant :

$$MSE_{all} = 0.7MSE_{Train} + 0.15MSE_{validation} + 0.15MSE_{Test} \quad (III.1)$$

Tableau III .1 : Résultat de la MSE et de  $R^2$  avec 100 neurones

$N_n$	Train		Validation		Test		All	
	$MSE_1$	$R^2_1$	$MSE_2$	$R^2_2$	$MSE_3$	$R^2_3$	MSE	$R^2$
100	1.377	0.98858	2.407	0.97939	2.485	0.97956	1.6975	0.98583

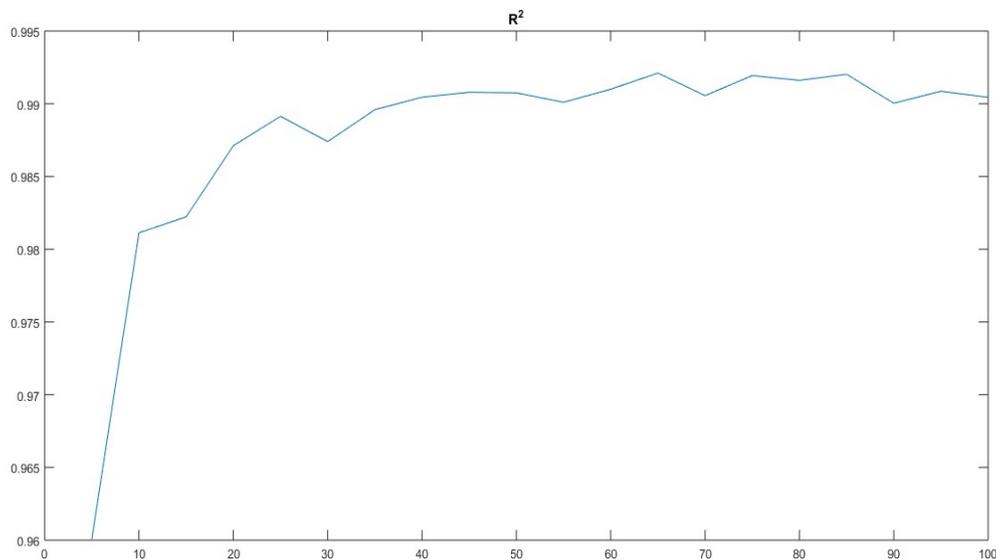
**Tableau III .2 : l'évolution du MSE et du  $R^2$  selon le nombre de neurones dans la couche cachée :**

$N_n$	MSE	$R^2$
5	4.5638	0.9601
10	2.1579	0.9811
15	2.0320	0.9822
20	1.4830	0.9871
25	1.2532	0.9891
30	1.4497	0.9874
35	1.2051	0.9896
40	1.0977	0.9905
45	1.0580	0.9908
50	1.0626	0.9908
55	1.1380	0.9901
60	1.0348	0.9910
65	0.9081	0.9921
70	1.0877	0.9906
75	0.9337	0.9919
80	0.9649	0.9916
85	0.9185	0.9920
90	1.2007	0.9900
95	1.0597	0.9909
100	1.1711	0.9904

### Observations :

- Diminution du **MSE** avec l'augmentation des neurones : Une amélioration notable est observée jusqu'à **~65 neurones (MSE = 0.9081)**, indiquant une meilleure capacité de généralisation.
- Augmentation du **MSE** après **65 neurones** : Cela pourrait être dû au surapprentissage (overfitting), où le modèle devient trop complexe.
- Coefficient  $R^2$ : Toutes les valeurs approchent **1**, signifiant que le modèle explique plus de **96 %** de la variance.

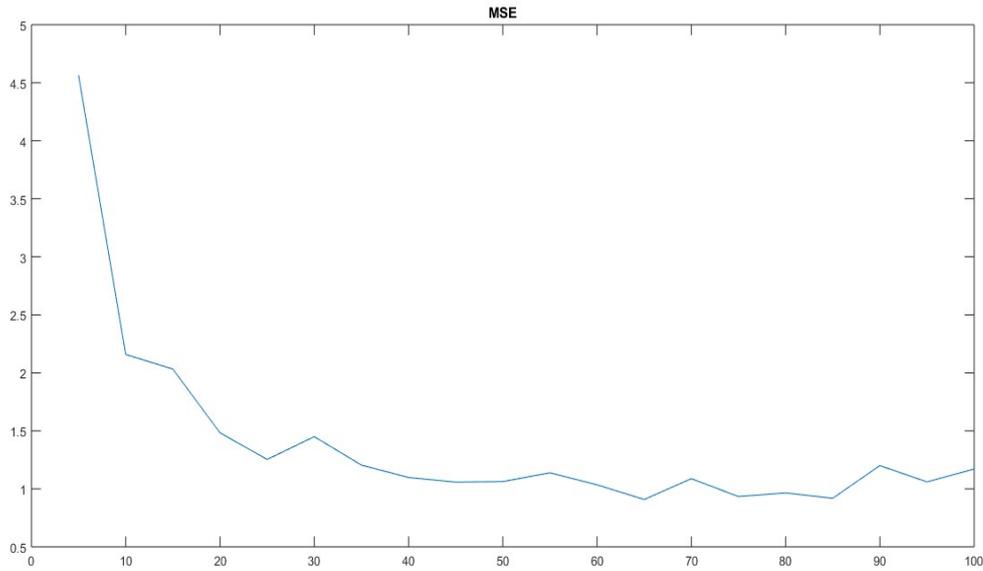
### III.4.2. Les graphiques et l'analyse visuelle de la performance



**Figure III.9 : Courbe de régression  $R^2$ (prédictions vs. Valeurs réelles)**

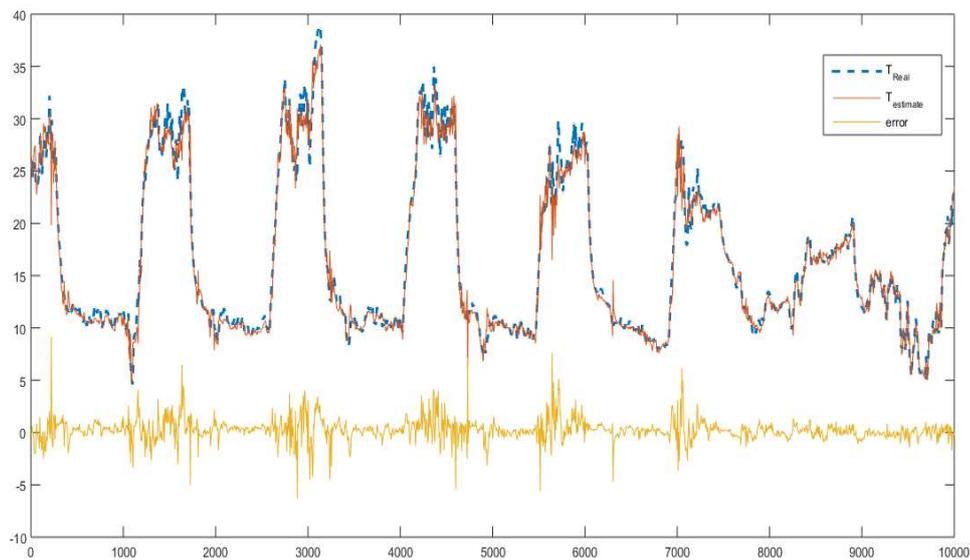
Ce graphique montre l'évolution du coefficient de détermination ( $R^2$ ) en fonction du nombre de neurones.

Les valeurs élevées (proches de **0.99**) indiquent une forte corrélation entre les prédictions et les données réelle



**Figure III.10 : Courbe de performance (MSE vs. Nombre de neurones)**

Cette courbe illustre la variation de l'erreur quadratique moyenne (**MSE**) en fonction du nombre de neurones. Le **MSE** diminue jusqu'à un optimum (**~65 neurones**), puis augmente en raison du surapprentissage.



**Figure III.11 : Distribution temporelle de l'erreur**

Ce graphique présente la variation de l'erreur de prédiction ( $T_{out,r\acute{e}el} - T_{out,estim.}$ )

Au fil du temps, avec une majorité d'erreurs dans la plage de  $\pm 5$  °C.

### III.4.2. Analyse comparative des stratégies d'apprentissage

#### III.4.2.1. Performance de l'algorithme Levenberg-Marquardt

- *Efficacité calculatoire* : L'algorithme a permis un apprentissage rapide (moyenne de 2 minutes par modèle).
- *Défis* : Surapprentissage observé avec un nombre élevé de neurones (>65), surtout avec des données de validation limitées.

### III.5 Conclusion

Le RNA conçu a démontré une excellente capacité à modéliser l'EAHE, avec un **MSE** faible ( $\sim 0.9$ ) et un  **$R^2$**  élevé ( $\sim 0.99$ ). Pour éviter le surapprentissage, la complexité du modèle doit être contrôlée. Des techniques de validation croisée (Cross-Validation) sont recommandées pour les études futures.

***Conclusion  
générale***

### *Conclusion générale*

Ce mémoire a été élaboré à travers l'analyse numérique et théorique d'un modèle analytique transitoire d'un échangeur géothermique air/sol, visant à optimiser les performances des échangeurs géothermiques. Pour le chauffage ou le refroidissement d'un fluide caloporteur (air) utilisé pour assurer le confort thermique de l'habitation.

L'échangeur analysé est enterré à une profondeur de 3m, exposé à diverses températures ambiantes et soumis à une résistance thermique du sol qui varie selon le temps de fonctionnement. Nous sommes bien plus axés sur l'extraction du froid. En se fondant sur les formules de conductivité thermique et de résistance thermique des sols perturbés. Enfin, un modèle ANN est employée pour évaluer la température de l'air sortant, en recourant au programme Matlab.

En outre, la température de l'air ambiant à l'entrée de l'échangeur fluctue durant le fonctionnement continu, ce qui est rationnel puisque dans les faits, on ne peut pas la considérer fixe. Ceci rend la conception plus exacte que ses prédécesseurs.

Notre contribution majeure dans ce mémoire sur le plan théorique est la création d'un programme de calcul numérique afin d'améliorer l'estimation de la performance thermique de l'échangeur air/sol grâce aux architectures ANN.

# *Références*

*Références*

- [1] Goldstein, B., G. Hiriart, R. Bertani, C. Bromley, L. Gutierrez-Negrin, E. Huenges, H. Muraoka, A. Ragnarsson,
- [2] ] S. Ouali, “ Etude géothermique du sud de l’Algérie,” mémoire de magister Université M’hamed Bouguerra Boumerdes, 2005.
- [3] S Lilia, K Idir ‘Etude paramétrique d’un échangeur vertical air-sol’ mémoire de master présenté à la faculté du genie de la construction Université mouloud mammeri tizi-ouzou,2016
- [4] Connaissances de base Géothermie, accès en 15 avril 2025, [https://gunt.de/images/download/Geothermie\\_french.pdf](https://gunt.de/images/download/Geothermie_french.pdf)
- [5] Mohamed saadeddine ‘Identification et analyse des principaux facteurs influent le comportement thermique d’un échangeur air/sol enterré ’Thèse de Magister ,Université de Biskra 30/01/2013 .
- [6] Mohamed Tijani, Mazouzi, Ahmed Tijani, & Zenati. L'impact des facteurs climatiques et techniques sur l'efficacité d'un échangeur de chaleur (sol-air) dans la région de Ouargla (mémoire du master 2022 , Université Kasdi Merbah Ouargla).
- [7] <https://www.terrevivante.org/contenu/le-puits-canadien-fonctionne-ete-comme-hiver/>
- [8] Propriétés thermiques de différents produits solides non alimentaires (Holman, 1990 ; Bimbenet et al., 2007 ; Singh et Heldman, 2008 ; Bazinet et al., 2011)
- [9] CETIAT' Les puits canadiens/provençaux Guide d’informationé ' Janvier 2008
- [10] [http://www.geothermie\\_perspectives.fr/05geothermie/index.html](http://www.geothermie_perspectives.fr/05geothermie/index.html). (05/06/2011).
- [11] EOLE. Les principes du puits canadien. Catalogue. Année : 2014
- [12] Hatraf, N., Chabane, F., Brima, A., Moumami, N., & Moumami, A. (2014). Parametric study of to design an earth to air heat exchanger with experimental validation. Engineering journal, 18(2), 41-54 Caractéristiques des métaux constituant l'échangeur air-sol
- [13] T Abdelkarim, B Abderraouf 'Adaptation des machines frigorifiques aux régions Chaudes. Proposition d’un aéro-refroidisseur géothermal'Mémoire de Master, 2021
- [14] L. Ozgener, A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15 9, pp. 4483-4490, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.103
- [15] <http://www.lesenergiesrenouvelables.eu/conseils/geothermie/puits-canadien-en-geothermie-oupuits-provencal/>
- [16] S Ahmed, D Faouzi 'étude de la climatisation d’un local par un puits Canadien 'Thème de master, Université de Médéa, 2013
- [17] : Kaddour A, El Hadi Attia M, Arıçı M, Benbelgacem K, Driss Z. A numerical evaluation on the utilization of earth to air heat exchangers in arid regions Algeria. J Ther Eng 2022;8(4):505–514.

- [18] Pfafferott, J. (2003) – Analyse des propriétés thermiques du sol : Lien vers Science Direct (étude incluant une évaluation des paramètres comme  $k$  et  $\alpha$ ).
- [19] Kavanaugh, S. P., & Rafferty, K. (2014). Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings. ASHRAE
- [20] Mihalakakou, G., et al. (1994). "On the cooling potential of earth-to-air heat exchangers". Energy Conversion and Management, 35(5), 395-402.
- [21] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley.
- [22] Pfafferott, J. (2003) – Étude sur les échangeurs air-sol : Lien vers Science Direct (étude analysant les paramètres clés des systèmes géothermiques).
- [23] Sanner, B., et al. (2003). Current status of ground source heat pumps in Europe. Geothermics.
- [24] ASHRAE Handbook – Chapitre sur les systèmes géothermiques : Lien ASHRAE (ressource officielle pour les normes de conception durable).
- [25] ERIC LAROUCHE 'exploration de différentes architectures de réseaux de neurones pour la prédiction de la glace atmosphérique sur les conducteurs des réseaux électriques' Université de Québec 2002
- [26] Calcul de l'MPPT par réseaux de neurone pour un système photovoltaïque UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2014/2015
- [27] ZAOUI Lynda' Contribution à la prévision de la sécheresse par le modèle du réseau de neurones autorégressif mémoire de master en aménagement et ouvrages Hydrotechniques école nationale supérieure d'hydraulique -ARBAOUI Abdallah 2017
- [28] O Mabrouk, A Ayoub'Prédiction de rayonnement solaire journalière par réseau de neurone'Mémoire de Master, Université kasdi Merbah -Ouargla,2020
- [29] F HOCINE 'Application des réseaux de neurones artificiels au diagnostic des défauts des machines tournantes' mémoire de magister en Optique et mécanique de précision Université Ferhat Abbas – setif
- [30] H. Nebbar, O. Hamdi, A. Moumami et A. Brima, «Etude de comportement thermique d'un échangeur entré air/sol Expérimentation de Biskra,» Revue des Energies Renouvelables, vol. 14, pp. 199-204, 2014
- [31] Belatrache D, Bentouba S, Bourouis M. Numerical analysis of earth air heat exchangers at operating conditions in arid climates. Int J hydrogen Energy 2017;42:8898–8904.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa  
Faculté des Sciences  
et de la technologie



جامعة غرداية  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الآلية والكهروميكانيك

غرداية في: 2025/06/26

شعبة: كهروميكانيك  
تخصص: صيانة صناعية

## شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذ: مصباح شرف عبد الكريم  
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج ماستر المعنونة ب:

Étude comparative de différentes stratégies de modélisation D'un échangeur air-sol  
par les réseaux de neurones artificiels

من انجاز الطالب (الطالبة):

دوادي خليل عبد الباري

هينانة معاد عبد المنعم

التي نوقشت بتاريخ: 2025/06/02

اشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم  
التحقق من ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة

مصادقة رئيس القسم  
قسم الآلية والكهروميكانيك  
رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك  
محمد

امضاء المسؤول عن التصحيح

عبد الكريم