

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



**UNIVERSITE DE BLIDA 1  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du Diplôme de Licence en  
Spécialité : énergétique

**Titre :**

**Récupération de chaleur du tunnel de El Hamdania pour  
chauffer des serres agricoles**

**Promoteur :**

Pr. HAMID Abdelkader

**Réalisé par :**

SEDDAR Chakib Amir

HARZ Mohamed

**Année universitaire : 2023/2024**

## ملخص

يستكشف هذا البحث استرجاع الحرارة في البنى التحتية تحت الأرض، مثل أنفاق المترو، للمساهمة في الانتقال الطاقوي. في الجزائر، يدفع الاعتماد على الهيدروكربونات إلى تبني الطاقات المتجددة. يعد استرجاع الحرارة عند درجات حرارة منخفضة حلاً مبتكراً سيساهم في تقليل استهلاك الطاقة.

الحل المقترح هو تنفيذ نظام لاسترجاع الحرارة باستخدام مبادل حراري ومضخة حرارية. نقترح حساب احتياجات التدفئة للبيوت الزراعية التي سيتم وضعها بالقرب من نفق الطريق في الحمداية. لقد تم تصميم مبادل حراري لتلبية احتياجات التدفئة.

استرجاع الحرارة عبر المبادلات الحرارية هو طريقة واعدة لإعادة استخدام الحرارة المتبقية وتقليل تكاليف الطاقة. على الرغم من أن هذه التكنولوجيا تتطلب استثمارات أولية، إلا أنها تقدم فوائد بيئية واقتصادية على المدى الطويل، مما يساعد في تقليل البصمة الكربونية للأنشطة الصناعية والزراعية.

## **Résumé**

Le mémoire explore la récupération de chaleur dans les infrastructures souterraines, comme les tunnels de métro, pour contribuer à la transition énergétique. En Algérie, la dépendance aux hydrocarbures pousse à adopter des énergies renouvelables. La récupération de chaleur à basse température est une solution innovante qui va contribuer à diminuer la consommation énergétique. La solution est de mettre en œuvre une installation de récupération de chaleur à l'aide d'un échangeur thermique et une pompe à chaleur, Nous proposons de calculer les besoins de chauffage des serres agricoles qui seront situés près du tunnel routier de El hamdania. Un échangeur a été dimensionné pour répondre aux besoins de chauffage.

La récupération de chaleur via les échangeurs de chaleur, est une méthode prometteuse pour réutiliser la chaleur résiduelle et réduire les coûts énergétiques. Cette technologie, bien que nécessitant des investissements initiaux, offre des bénéfices environnementaux et économiques à long terme, aidant à réduire l'empreinte carbone des activités industrielles et agricoles.

## **Abstract**

This research explores the recovery of heat in underground infrastructures, such as metro tunnels, to contribute to the energy transition. In Algeria, dependence on hydrocarbons drives the adoption of renewable energies. Low-temperature heat recovery is an innovative solution that will help reduce energy consumption.

The proposed solution is to implement a heat recovery system using a heat exchanger and a heat pump. We propose to calculate the heating needs of agricultural greenhouses that will be located near the El Hamdania road tunnel. A heat exchanger has been designed to meet the heating needs.

Heat recovery through heat exchangers is a promising method for reusing residual heat and reducing energy costs. Although this technology requires initial investments, it offers long-term environmental and economic benefits, helping to reduce the carbon footprint of industrial and agricultural activities.

## Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant pour la force et le courage qui nous a donné pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'achèvement de ce mémoire.

Tout d'abord, nous remercions sincèrement notre encadreur, Hamid Abdelkader, pour sa guidance, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce projet. Son expertise et ses encouragements ont été d'une grande aide pour nous deux.

Nous adressons également nos remerciements aux professeurs et membres du jury pour leurs commentaires constructifs et leur implication dans l'évaluation de notre travail.

Nos remerciements vont aussi à nos collègues et amis pour leur soutien moral et leurs encouragements. Leur présence et leurs mots d'encouragement ont été essentiels lors des moments de doute et de fatigue.

Nous n'oublions pas nos familles, qui nous ont toujours soutenus dans nos études. Leur amour, leur patience et leur compréhension ont été une source de motivation inépuisable.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leur aide et leur soutien nous ont été précieux et sont grandement appréciés.

## Tableau de matière

Résumé	
Remerciement	
Tableau de matières	
Liste de figure	
Introduction générale	

### Chapitre I Bibliographie et contexte de l'étude

1. Introduction .....	1
2. la transition énergétique.....	2
2.1. Investissement dans les technologies vertes.....	3
a) Sensibilisation et formation .....	3
b) Défis à relever .....	3
3. Bilan énergétique de l'Algérie en 2023 .....	4
3.1.Cadre réglementaire .....	5
4. Consommation d'énergie en Algérie .....	5
4.1.Secteur du bâtiment .....	5
4.2.Secteur agricole en Algérie.....	5
5. Serres agricole.....	6
5.1.Définition .....	6
5.2.Fonctionnement des Serres.....	6
5.3.Type de serre .....	6
5.4.Consommation d'Énergie dans les Serres.....	9
5.4.1. Les pertes de chaleur au niveau des serres.....	10
5.5.Chauffage des serres.....	10
5.6.Les différents types de chauffage de serre .....	11
5.7.Récupération de la chaleur résiduelle.....	13
6. Géothermie.....	13
6.1.Définition .....	13
6.2.Classification.....	13
a) Géothermie haute énergie.....	14

b) Géothermie basse énergie.....	15
c) Géothermie très basse énergie.....	15
6.3.L'utilisation de ressources géothermiques en Algérie .....	16
7. Pompe à chaleur .....	18
7.1.Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur.....	19
7.2.Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur.....	19
7.3.Types de Pompes à Chaleur.....	19
8. L'échangeur.....	21
8.1.Type d'échangeur de chaleur .....	21
a) Échangeurs à plaques .....	21
b) Échangeurs à tubes et calandres (ou échangeurs tubulaires).....	22
c) Échangeurs à spirale.....	23
9. Échangeur de chaleur pour la récupération de chaleur des tunnels.....	23
9.1 Principes de fonctionnement .....	23
10. Conclusion .....	24

## **Chapitre II Energie des tunnels, la chaleur des métros et parkings souterrains**

1. Introduction.....	26
1.1.Objectif du Chapitre.....	26
2. Energie des tunnels.....	27
2.1. Activation thermique des revêtements de tunnel .....	28
2.2.Comportement thermique des Tunnels.....	30
3. La chaleur des métros.....	32
4. Présentation des travaux théoriques et expérimentaux sur la récupération de la chaleur de tunnels de métro.....	33
4.1. Métro de Stockholm.....	33
4.2.Projet CELSIUS à Londres.....	35
4.3. Le projet de refroidissement et de chauffage intégré métropolitain (MICAH) de 2019...	36
4.4. Projet de paris habitat.....	38
4.5.Métro de chine.....	39
4.5.1. Etude expérimental sur le métro de Qingdao.....	40
4.5.2. Etude Expérimental sur le métro de Qingdao PAC hybride.....	41

4.6. Métro d'Allemagne.....	43
4.7. Tunnel de l'Autriche.....	44
4.8. l'étude de métro d'Alger.....	45
5. La chaleur des parkings souterrains.....	47
6. Présentation des travaux théoriques et expérimentaux sur la récupération de la chaleur des parkings souterrain.....	48
6.1. Parking lausannois.....	48
6.2. Parkings de la ville de Berlin.....	50
6.3. Le projet DEI à Barcelone.....	51
6.4. Proposition d'un système de récupération de chaleur d'un parking en Algérie ....	53
7. Conclusion.....	54

### **Chapitre III Dimensionnement d'un système de récupération de chaleur**

1. Introduction .....	55
2. Présentation du cas d'étude.....	55
3. Sources de Chaleur dans les Véhicules.....	56
4. Présentation de la ville d'el Hamdania .....	56
4.1. Caractéristique météorologique de la ville en période hivernale.....	57
4.2. Présentation du site.....	58
4.3. Description du projet.....	58
4.3.1. Présentation des plans .....	60
5. Bilan énergétique .....	61
5.1. Besoin en énergie d'une serre .....	61
5.1.1. Estimation de besoin de chauffage de la serre tunnel .....	62
5.1.2. Puissance de chauffage de la serre .....	65
5.2. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur .....	66
6. La pompe à chaleur.....	72
6.1. Description du modèle .....	73
7. Conclusion.....	74
Conclusion général.....	75

Référence

## Listes des figures

<b>Figure I.1</b> : Répartition des ressources en énergie primaire 2023 .....	4
<b>Figure I.2</b> : programme de développement des énergies renouvelable en Algérie .....	5
<b>Figure I. 3</b> : Principe d'effet de serre.....	6
<b>Figure I. 4</b> : Exemple d'une serre tunnel.....	7
<b>Figure I. 5</b> : Exemple d'une serre adossée.....	7
<b>Figure I. 6</b> : Exemple d'une serre en verre.....	8
<b>Figure I. 7</b> : Exemple d'une serre multichapelle.....	8
<b>Figure I. 8</b> : chauffage des serres par tube eau chaude basse température [24] .....	12
<b>Figure I. 9</b> : La géothermie très profonde à très haute température .....	14
<b>Figure I. 10</b> : Géothermie basse énergie.....	15
<b>Figure I. 11</b> : Chauffage à sonde.....	15
<b>Figure I. 12</b> : schéma des différentes méthodes d'extraction de la chaleur géothermique avec système fermé (échangeurs horizontaux (A) et verticaux (B) et système ouvert (C), Sanner, 2011) [15].....	16
<b>Figure I. 13</b> : Diagramme des systèmes permettant d'exploiter la chaleur géothermique (de Boever et al, 2012) .....	17
<b>Figure I. 14</b> : schéma du cycle de compression de vapeur et diagramme pression-enthalpie (naicker,2015) .....	19
<b>Figure I. 15</b> : Pompe à chaleur air air.....	19
<b>Figure I. 16</b> : Pompe à chaleur air eau.....	20
<b>Figure I. 18</b> : Pompe à chaleur eau eau.....	20
<b>Figure I. 19</b> : Schéma d'échangeurs co-courant et Contre-courant.....	21
<b>Figure I. 20</b> : échangeur a plaque.....	22
<b>Figure I. 22</b> : Échangeurs à tubes et calandres .....	22
<b>Figure I. 23</b> : Fonctionnement d'un échangeur spiralé .....	23
<b>Figure I. 24</b> : Schéma des différents types d'échangeurs avec (A) tubes en simple U, (B) tube spiralé et (C) tubes en double U (Li et al., 2016) [16] .....	24
<b>Figure II. 1</b> Représentation schématique d'un revêtement segmentaire de tunnel équipé d'un échangeur de chaleur au sol (Barla et Perino, 2014 ; Barla et al., 2016).....	29
<b>Figure II .2</b> Représentation schématique d'un revêtement segmentaire de tunnel équipé d'un échangeur de chaleur au sol (Barla et Perino, 2014 ; Barla et al., 2016).....	29

<b>Figure II .3</b> Exemple schématique de l'activation thermique du revêtement segmentaire du tunnel et de son raccordement à un système de pompe à chaleur dans le bâtiment ci-dessus.....	30
<b>Figure II .4</b> Principaux mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans le problème des systèmes de tunnel énergétique.....	31
<b>Figure II. 5:</b> La configuration du modèle de ventilation, montrant le transfert de chaleur de l'air au tunnel et au sol environna.....	34
<b>Figure II. 6</b> flux énergétique et réduction des émissions de co2 du métro de Stockholm.....	35
<b>Figure II. 7</b> les sources de chaleur utilisées dans le métro de Londres.....	36
<b>Figure II.8 :</b> Schéma du système MICAH.....	37
<b>Figure II. 9</b> Mode chauffage uniquement (c'est-à-dire mode extraction) Mode combiné de refroidissement et de chauffage.....	38
<b>Figure II. 10</b> Températures du Tunnel, Besoins en Chauffage et Flux de Chaleur Récupérée.....	39
<b>Figure II. 11 :</b> Un immeuble chauffé grâce à la chaleur de la ligne 11 du métro de paris .....	39
<b>Figure II. 12</b> (1) Disposition des appareils pour whrs dans la station, (2) schema d'un système Modulaire de WHRS basé sur ASHP .....	40
<b>Figure II. 13</b> Schéma de principe expérimental des équipements.....	41
<b>Figure II. 14 :</b> Schéma du hybridé subway source heat pump SSHP.....	42
<b>Figure II.15 :</b> Schéma d'un système de pompe à chaleur à source souterraine.....	42
<b>Figure II.16 :</b> actions et interactions de la centrale géothermique du tunnel.....	43
<b>Figure II. 17:</b> Distribution de la chaleur géothermique Ce schéma montre comment la chaleur géothermique est distribuée dans les bâtiments en surface. ....	44
<b>Figure II. 18 :</b> Tunnel de jenbach schéma de température et flux de chaleur .....	45
<b>Figure II. 19</b> schéma du modèle étudiant en boucle fermé.....	46
<b>Tableau II 20.:</b> les résultats de dimensionnement d'un échangeur tube ailettes.....	47
<b>Figure. II.21 :</b> graphe de température en fonction de la puissance thermique pour le cas initial.....	48

<b>Figure II. 22</b> Des capteurs thermiques pour stocker la chaleur dégagée dans les parkings.....	48
<b>Figure II. 23</b> : principe de récupération de chaleur des parkings souterrains.....	49
<b>Figure II. 24</b> : plaque de récupération de chaleur installer dans un parking.....	50
<b>Figure II. 25</b> : Parking et chauffage de la nappe phréatique.....	51
<b>Figure II. 26</b> : Recyclage de la chaleur résiduelle en parking souterrain à Barcelone.....	52
<b>Figure II. 27</b> Parking de centre commercial garden city.....	53
<b>Figure III.1</b> : Localisation de la commune dans la wilaya de Médéa.....	57
<b>Figure III.2</b> : Température haute et basse moyenne en hiver pour Médéa [58] .....	57
<b>Figure III.3</b> : Carte qui montre le site .....	58
<b>Figure III.4</b> : Des photos que on a prises lors de mesure de température.....	59
<b>Figure III.5</b> : Dimension de la serre.....	60
<b>Figure III.6</b> : visualisation 3D du projet .....	6
<b>Figure III.7</b> : visualisation 3D de l'installation de l'échangeur a l'intérieure de tunnel .....	61
<b>Figure III.8</b> : visualisation 3D des serres après l'installation de la pompe à chaleur .....	61
<b>Figure III.9</b> : Bilan simplifié des échanges radiatifs [60] .....	62
<b>Figure III.10</b> système de chauffage proposé.....	66
<b>Figure III.11.</b> : Représente la surface d'échange d'un tube .....	67
<b>Figure III.12</b> : Échangeur à l'intérieure de tunnel .....	70
<b>Figure III.13</b> : Pompe à chaleur AERMEC NRB 0800H-3600H [67].....	73
<b>Figure III.14</b> : Dimension de la pompe a chaleur NRB 0800H-3600H [67].....	74

## **Introduction général :**

Dans un contexte mondial où les enjeux énergétiques et environnementaux sont de plus en plus pressants, la quête de solutions durables et innovantes pour répondre à nos besoins en énergie est devenue une priorité absolue. Les systèmes traditionnels, basés sur les énergies fossiles, ont montré leurs limites tant sur le plan de la durabilité que sur celui des impacts écologiques.

C'est dans cette optique que la récupération de chaleur à basse température se présente comme une alternative prometteuse. La récupération de chaleur à basse température, notamment celle provenant de sources géothermiques et de rejets thermiques des infrastructures urbaines, offre une opportunité unique de valoriser des ressources énergétiques souvent négligées.

Cette approche permet non seulement de réduire les pertes énergétiques, mais aussi de contribuer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre, favorisant ainsi une transition vers une économie plus verte et résiliente. Ce mémoire explore les potentialités et les applications de la récupération de chaleur à basse température, en mettant l'accent sur les avancées technologiques récentes et les innovations dans ce domaine.

En particulier, il examine les solutions de valorisation de la chaleur issue des infrastructures urbaines comme les tunnels de métro, ainsi que les systèmes de pompes à chaleur et leur intégration dans les réseaux de chauffage urbain.

L'objectif principal de cette étude est de fournir une compréhension approfondie des mécanismes de récupération de chaleur à basse température, d'évaluer leur efficacité et leur impact environnemental, et de proposer des stratégies pour leur mise en œuvre à grande échelle.

En s'appuyant sur des études de cas et des exemples concrets, ce mémoire vise à démontrer comment ces technologies peuvent être optimisées et adaptées pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en préservant notre environnement. En somme, la récupération de chaleur à basse température représente une piste de réflexion et d'action incontournable dans le cadre de la transition énergétique.

Par une approche scientifique rigoureuse et une analyse des pratiques actuelles, ce travail aspire à contribuer à l'émergence de solutions durables et à l'optimisation des ressources énergétiques pour un avenir plus propre et plus viable.

# **Chapitre I Bibliographie et contexte de l'étude**

## **1. Introduction**

La transition énergétique vers un avenir durable est un carrefour critique où les décisions actuelles ont un impact majeur sur notre environnement futur. Pour faire une réelle différence et façonner un paysage énergétique respectueux du climat et de l'environnement, il est essentiel d'accélérer la transition vers de nouvelles sources d'énergie : zéro carbone (décarbonée) et renouvelables.

Parmi ces ressources l'énergie géothermique et les émissions de chaleur peuvent jouer un rôle crucial.

Au cours des dernières années, des avancées technologiques remarquables ont été réalisées afin d'exploiter la chaleur de la Terre, y compris dans des endroits comme les infrastructures souterraines (grottes, tunnels...) [1].

En dépit du fait qu'une quantité considérable de chaleur est gaspillée dans l'environnement, aujourd'hui la récupération de la chaleur des tunnels de métro par des pompes à chaleur à grande échelle est devenue une technologie d'actualité malgré qu'elle ait été adoptée par certains pays depuis 1980.

L'utilisation de cette énergie est commune à de nombreux pays. La chaleur est extraite du sol et par la chaleur dégagée par les métros ainsi que celle dégagée par les parkings souterrains pour le chauffage domestique ou pour produire de l'eau chaude par boucle ouverte ou fermée. Par conséquent, elle peut potentiellement contribuer à réduire le carbone de chauffage et de refroidissement empreinte écologique, entraînant des avantages environnementaux importants (Commission européenne, 2016).

## **2. La transition énergétique**

La transition énergétique est un processus par lequel on passe d'un système énergétique basé principalement sur les énergies fossiles (comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon) à un système plus durable, basé sur les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Ce processus vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre,

Cela comprend l'exploitation de sources d'énergie telles que le soleil (énergie solaire), le vent (énergie éolienne), l'eau (énergie hydroélectrique), la chaleur de la Terre (énergie géothermique) et la biomasse. Ces sources sont considérées comme renouvelables car elles sont

régénérées naturellement sur des échelles de temps humaines [2], L'Algérie dépend fortement des hydrocarbures, en particulier du pétrole et du gaz naturel, pour son approvisionnement énergétique. La transition énergétique implique de réduire cette dépendance en développant d'autres sources d'énergie [3]

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. [4]

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

## **2.1. Investissement dans les technologies vertes**

L'Algérie encourage les investissements dans les énergies renouvelables, notamment le solaire et l'éolien, afin de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles [5].

Des projets tels que l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables (solaire thermique) dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national, ou le parc éolien de Tlemcen qui produira 60 MW d'énergie renouvelable, sont en cours de développement grâce à des partenariats public-privé et des financements internationaux [6].

### **a) Sensibilisation et formation**

En Algérie pour encourager l'efficacité énergétique il est crucial de sensibiliser le public et former les professionnels

Des initiatives de formation aident les ingénieurs et architectes à concevoir des bâtiments économes en énergie, tandis que des campagnes de sensibilisation incitent particulièrement l'entreprise à adopter des comportements énergétiquement responsables

### **b) Défis à relever**

Bien que des avancées aient été accomplies, l'Algérie doit encore surmonter plusieurs obstacles pour renforcer son efficacité énergétique. Ces défis incluent la modernisation de son réseau

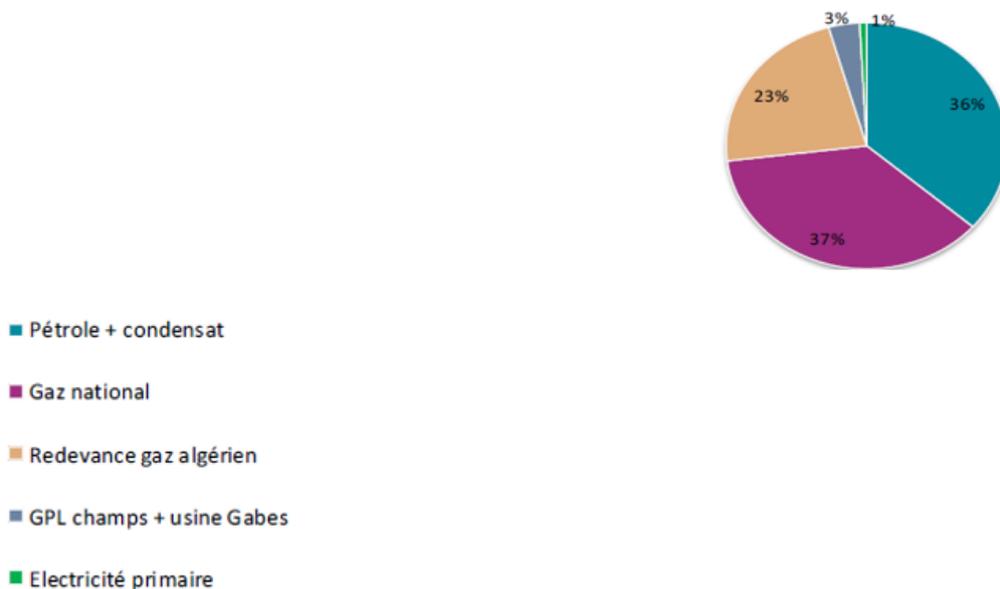
électrique obsolète, l'accroissement de l'efficacité énergétique dans les domaines industriels et de transport, ainsi que la réduction de la consommation d'énergie dans les foyers et les entreprises.

### 3. Bilan énergétique de l'Algérie en 2023 :

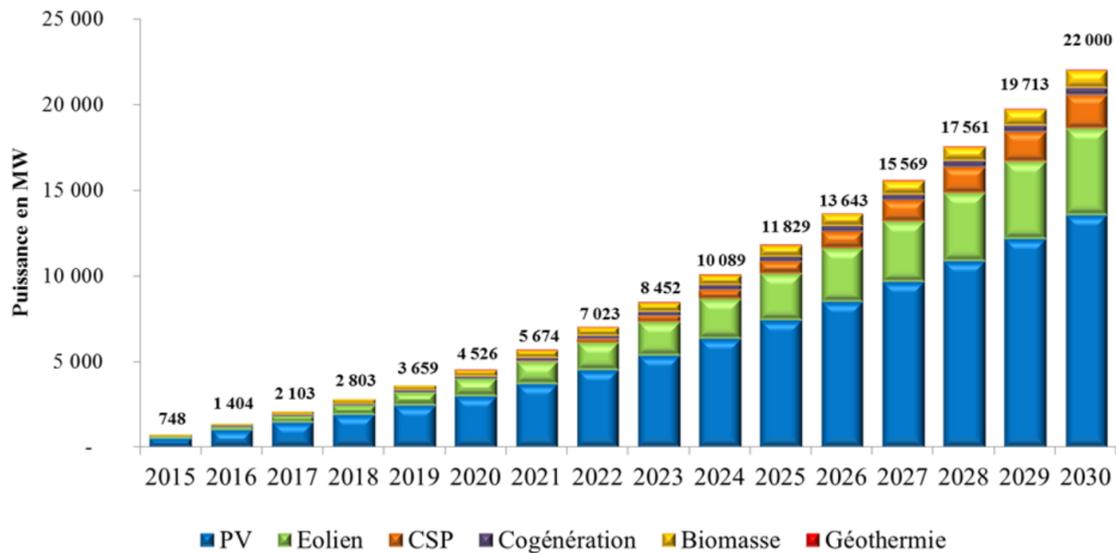
En comptabilisant la redevance, le bilan d'énergie primaire fait apparaître en 2023, un déficit de 4.7 MTEP enregistrant ainsi une légère diminution de 1% par rapport à 2022. Le taux d'indépendance énergétique, qui représente le ratio des ressources d'énergie primaire par la consommation primaire, s'est situé à 48% en 2023 contre 50% en 2022.

Alors que, sans comptabilisation de la redevance, le taux d'indépendance énergétique se limiterait à 38% en 2023 contre 39% l'année précédente.

Le déficit du bilan d'énergie primaire a diminué de 1% durant 2023 par rapport à 2022, cette diminution est due essentiellement à la baisse de la demande d'énergie primaire, la production des hydrocarbures a joué, par contre, en défaveur de cette baisse [7].



**Figure I.1** : Répartition des ressources en énergie primaire 2023



**Figure I.2 :** programme de développement des énergies renouvelable en Algérie

### 3.1. Cadre réglementaire

Le gouvernement algérien a instauré un cadre réglementaire visant à promouvoir l'efficacité énergétique, avec notamment des normes de performance énergétique pour les bâtiments et les équipements électriques. En parallèle, le ministère de l'Énergie et des Mines a mis sur pied l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE), chargée de coordonner les initiatives en matière d'efficacité énergétique.

## 4. Consommation d'énergie en Algérie

### 4.1. Secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment est à l'origine de 36% de la consommation d'énergie finale en Algérie. Les perspectives de développement de l'immobilier et le développement du secteur tertiaire engendrera un accroissement certain de la consommation d'énergie [8].

Par ailleurs, avec son climat aride et semi-aride, l'Algérie est très vulnérable aux changements climatiques. En effet, on assiste à des étés caniculaires et des hivers très rudes, d'où la nécessité d'isoler les maisons pour à la fois améliorer le confort et réduire les consommations de chauffage et de rafraîchissement.

### 4.2. Secteur agricole en Algérie

L'Algérie a fait des progrès significatifs dans le développement de son secteur agricole, notamment à travers l'adoption de l'agriculture sous serre. Ce secteur est crucial pour répondre

aux besoins alimentaires croissants, améliorer la productivité agricole et réduire la dépendance aux importations alimentaires [9]

## 5. Serres agricole

### 5.1. Définition

Les serres sont des structures conçues pour créer un environnement contrôlé favorable à la croissance des plantes. Elles permettent de prolonger les saisons de culture et de protéger les plantes des conditions climatiques extrêmes [21].

### 5.2. Fonctionnement des Serres

Les serres fonctionnent en captant la chaleur du soleil et en la piégeant à l'intérieur pour maintenir une température plus élevée que l'extérieur. Elles utilisent principalement deux principes physiques :

**Effet de serre** : Les rayons du soleil traversent le matériau transparent de la serre (verre ou plastique), réchauffant l'air et le sol à l'intérieur. La chaleur émise par les surfaces intérieures est en grande partie piégée à l'intérieur, car les matériaux de couverture sont moins perméables aux rayonnements infrarouges que les rayons visibles.

**Isolation** : Les serres minimisent les pertes de chaleur grâce à des matériaux isolants et une construction bien conçue.

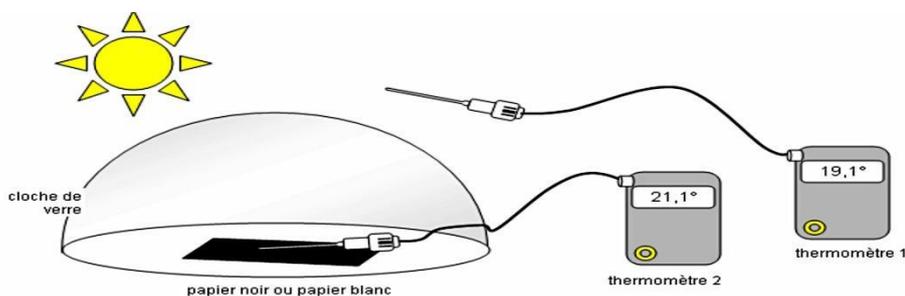


Figure I. 3 : Principe d'effet de serre

### 5.3. Type de serre

Il existe plusieurs types de serres, adaptées à différents usages et contextes, elles sont fabriquées avec différents matériaux : bois, acier, aluminium. Voici les principaux types de serres [22].

- **Serre tunnel**

Les serres tunnel sont des structures en forme de tunnel, généralement en métal avec des bâches en plastique

Les serres tunnel sont généralement de grandes dimensions et peuvent être équipées de systèmes de chauffage, d'arrosage automatique et de ventilation pour contrôler l'environnement de croissance des plantes.



**Figure I. 4 :** Exemple d'une serre tunnel

- **Serre adossée ou Serre murale**

Les Serres adossées sont des serres qui sont fixées contre un mur, généralement en verre ou en polycarbonate. Elles sont généralement de petites dimensions et sont conçues pour être utilisées dans un jardin ou une terrasse.



**Figure I. 5 :** Exemple d'une serre adossée

- **Serre en verre**

Elle est construite en utilisant du verre comme matériau principal. Elle permet de laisser passer la lumière naturelle tout en protégeant les plantes des intempéries [22].



**Figure I. 6 :** Exemple d'une serre en verre

- **Serre Multi chapelle**

Elles combinent plusieurs petites serres pour créer une grande surface couverte



**Figure I. 7 :** Exemple d'une serre multichapelle

**a) Types de Cultures Sous Serre**

Les serres en Algérie sont utilisées pour une variété de cultures, notamment :

- **Légumes** : Tomates, poivrons, concombres, courgettes, laitues, et autres légumes-feuilles.
- **Fruits** : Fraises et melons.
- **Plantes Aromatiques** : Basilic, menthe, coriandre, etc.

**b) Régions Clés pour l'Agriculture Sous Serre**

Certaines régions en Algérie sont particulièrement propices à l'agriculture sous serre en raison de leurs conditions climatiques et de la disponibilité des ressources :

- **Région de Biskra** : Connue comme le "grenier de l'Algérie" pour les cultures sous serre. La région bénéficie d'un climat chaud et ensoleillé, favorable à la production de légumes.
- **Région d'El Oued** : Autre région importante pour les cultures sous serre, avec des investissements significatifs dans les infrastructures agricoles.

#### 5.4. Consommation d'Énergie dans les Serres

Les serres sont des structures intensives en énergie car elles nécessitent des contrôles environnementaux pour optimiser les conditions de croissance des plantes. En Algérie, où les conditions climatiques peuvent être extrêmes, l'efficacité énergétique des serres est un aspect crucial pour la viabilité économique et environnementale du secteur agricole [10].

##### ➤ **Chauffage**

- **Nécessité** : Les serres nécessitent souvent un chauffage pendant les mois plus froids pour maintenir une température optimale pour la croissance des plantes.
- **Sources d'Énergie** : Les systèmes de chauffage peuvent utiliser du gaz naturel, du pétrole, de l'électricité, ou des sources d'énergie renouvelable comme la biomasse ou l'énergie solaire.

##### ➤ **Éclairage**

- **Nécessité** : L'éclairage artificiel est souvent utilisé pour prolonger les heures de lumière du jour et améliorer la photosynthèse, surtout en hiver ou dans des conditions de faible luminosité.
- **Technologies** : Les lampes à haute intensité, telles que les lampes HPS (haute pression sodium) ou les LED (diodes électroluminescentes), sont couramment utilisées.

##### ➤ **Ventilation et Refroidissement**

- **Nécessité** : La ventilation est essentielle pour contrôler la température, l'humidité et le CO<sub>2</sub> à l'intérieur de la serre.
- **Systèmes** : Les ventilateurs, les systèmes de refroidissement par évaporation, et les ombrages sont utilisés pour maintenir des conditions optimales.

La gestion efficace de l'énergie dans les serres est essentielle pour rendre l'agriculture sous serre durable en Algérie. En adoptant des technologies modernes, des énergies renouvelables et des pratiques de gestion optimisées, il est possible de réduire la consommation d'énergie tout en augmentant la productivité et la rentabilité des serres [11].

#### **5.4.1. Les pertes de chaleur au niveau des serres**

Les pertes de chaleur au niveau des serres sont de 3 ordres :

- Les pertes par conduction .

Pertes d'énergie à travers le matériel de couverture et dans une moindre mesure par montants .

- Les pertes par conduction .

Pertes dues aux mouvements d'air dans la serre du fait de trous fissures et ouvertures dans la couverture de celle-ci.

- Les pertes par rayonnements .

Moins importante que les précédents et résultant de la dissipation des infrarouges longs du sol et des plantes à travers le matériel de couverture de la serre [23].

### **5.5. Chauffage des serres**

La meilleure façon de lutter contre les basses températures reste le chauffage. Néanmoins, les installations de chauffage qui permettraient un contrôle climatique optimal sont très onéreuses et la facture énergétique serait prohibitive dans nos conditions de production.

Il reste qu'un supplément de chauffage pour certaines cultures principalement les cultures ornementales pendant les 2 à 3 mois difficiles, permettant de limiter les basses températures, serait souhaitable et aurait pour effet secondaire d'éviter la condensation, un des facteurs responsables de la prolifération des maladies cryptogamiques.

Des sources d'énergie renouvelables (solaire, éolienne, géothermie) permettent d'assurer ce supplément [24].

## 5.6. Les différents types de chauffage de serre

- **Chauffage au Gaz :**

Le chauffage au gaz naturel ou au propane est l'une des méthodes les plus courantes et efficaces pour chauffer les serres. Les brûleurs à gaz fournissent une chaleur constante et peuvent être contrôlés facilement.

- **Chauffage au Fuel :**

Les serres peuvent également être chauffées en utilisant des systèmes de chauffage au fioul. Cependant, cette méthode est moins courante que le chauffage au gaz en raison des coûts plus élevés et de la manipulation du combustible.

- **Chauffage Électrique :**

Les systèmes de chauffage électrique utilisent des résistances électriques pour produire de la chaleur. Bien qu'ils soient propres et faciles à installer, ils peuvent être plus coûteux à long terme en raison des tarifs électriques.

- **Chauffage Biomasse :**

Les serres peuvent être chauffées en utilisant des sources de biomasse telles que les copeaux de bois, les pellets ou les déchets agricoles. Cette méthode est écologique et peut être rentable si la biomasse est disponible localement.

- **Chauffage Solaire :**

Les systèmes de chauffage solaire utilisent l'énergie solaire pour chauffer l'air ou l'eau, qui est ensuite distribué dans la serre. C'est une option écologique, mais elle peut ne pas être suffisante pendant les périodes de faible ensoleillement.

- **Chauffage Géothermique :**

Ce système utilise la chaleur du sol pour chauffer la serre. Des tubes enfouis dans le sol captent la chaleur, qui est ensuite distribuée à l'intérieur de la serre. C'est une option durable et efficace, mais nécessite un investissement initial plus élevé.

- **Chauffage par Échangeur de Chaleur :**

Cette méthode implique l'utilisation d'un échangeur de chaleur pour récupérer la chaleur générée par d'autres sources, comme les équipements de combustion ou les machines agricoles, et la transférer à l'intérieur de la serre [25].

Le choix du système de chauffage dépend de plusieurs facteurs, notamment la taille de la serre, le climat local, le coût initial et les considérations environnementales. Dans de nombreux cas, une combinaison de différentes méthodes de chauffage peut être utilisée pour optimiser l'efficacité énergétique et réduire les coûts [24].

Nous proposons la récupération de la chaleur d'un tunnel routier pour chauffer les serres. Une fois la chaleur transférée dans les serres, elle serait utilisée pour maintenir une température optimale pour la croissance des plantes pendant les périodes de temps froid.



**Figure I. 8 :** chauffage des serres par tube eau chaude basse température [24]

## **Exemple de placement de l'échangeur**

- ❖ **Exemple 1 : Échangeurs air-air**

### **Montage mural :**

Les échangeurs sur les murs latéraux à hauteur d'homme pour faciliter la distribution de l'air.

### **Ventilateurs au plafond :**

Des ventilateurs suspendus pour aider à la circulation de l'air chaud vers le bas et l'air froid vers le haut.

## ❖ Exemple 2 : Échangeurs air-eau

### **Radiateurs au sol :**

Les radiateurs le long des murs latéraux de la serre. Assurez-vous qu'ils sont espacés régulièrement.

### **Tuyaux sous le sol :**

Si possible, intégrez un système de chauffage par le sol avec des tuyaux transportant l'eau chaude pour une distribution uniforme de la chaleur.

## **5.7. Récupération de la chaleur résiduelle**

Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme. "Antoine Lavoisier"

Dans une démarche similaire à l'économie circulaire, valoriser la chaleur fatale permet de récupérer les calories dégagées lors de la production du froid afin de les réinjecter dans les processus ou d'autres installations. Réutiliser cette énergie, disponible et déjà payée, constitue aujourd'hui une opportunité pour les acteurs économiques. Partiel ou total, le recyclage de la chaleur fatale apporte en effet une réponse pertinente aux enjeux d'approvisionnement énergétique, d'augmentation des prix des énergies et de protection de l'environnement.

La chaleur fatale, aussi appelée chaleur de récupération ou chaleur résiduelle, est un condensé de chaleur généré par les installations de froid, les moteurs en marche, la climatisation... Elle représente une source d'énergie qui peut être utilisée sous forme d'eau chaude ou d'air chaud [12].

## **6. Géothermie**

### **6.1. Définition**

La géothermie est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la chaleur provenant du sous-sol de la Terre. Cette chaleur peut être utilisée directement pour le chauffage des bâtiments ou pour la production d'électricité. La géothermie tire parti de la chaleur naturelle présente dans les couches internes de la Terre, généralement dans les zones où le magma est relativement proche de la surface, comme les zones volcaniques ou les zones géologiquement actives [13].

### **6.2. Classification**

En Islande, la géothermie est classée selon la profondeur des puits et la température du fluide caloporteur. Par exemple, la géothermie de haute température concerne les sources chaudes à

plus de 150°C, principalement utilisées pour la production d'électricité et le chauffage urbain. En revanche, la géothermie de basse température concerne les sources entre 30°C et 150°C, utilisées pour le chauffage résidentiel et l'agriculture, tandis que la géothermie très basse température concerne les sources en dessous de 30°C, utilisées pour des applications telles que les serres ou le chauffage des piscines (Smith et al., 2015) [14].

#### a) Géothermie haute énergie

La géothermie haute énergie exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C (BRGM, 1978).

On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé.

La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité.

La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur.

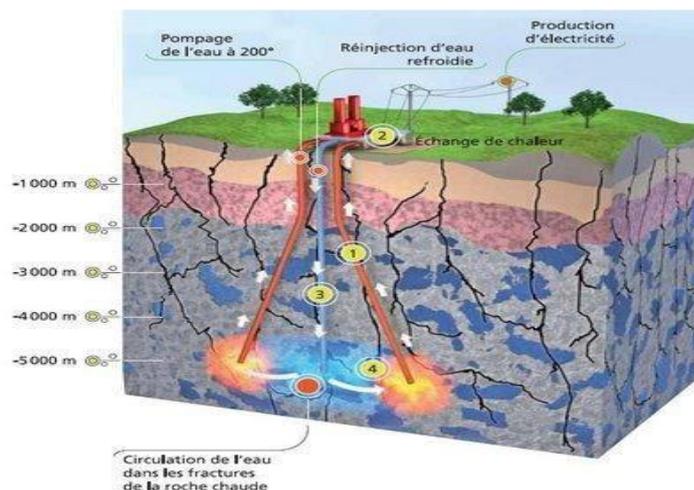
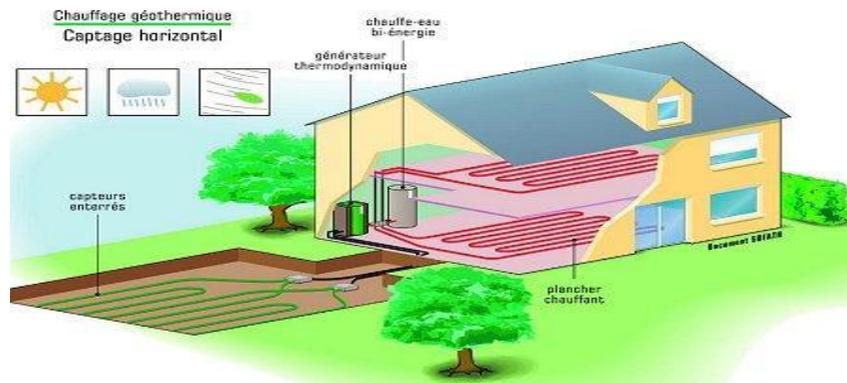


Figure I. 9 : La géothermie très profonde à très haute température

#### b) Géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30 °C et 150 °C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions.

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



**Figure I. 10 :** Géothermie basse énergie

### c) Géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est rencontrée à des faibles profondeurs (nappes phréatiques) ou la température est de l'ordre de 10 à 30°C.

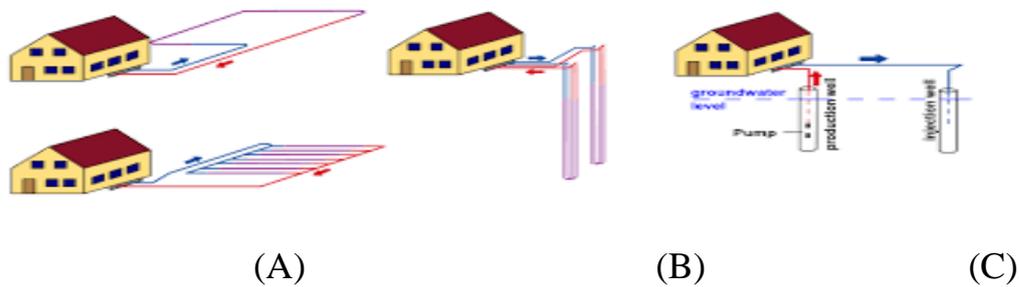
Elle est utilisée pour le rafraîchissement, chauffage des bâtiments à travers les puits canadiens.



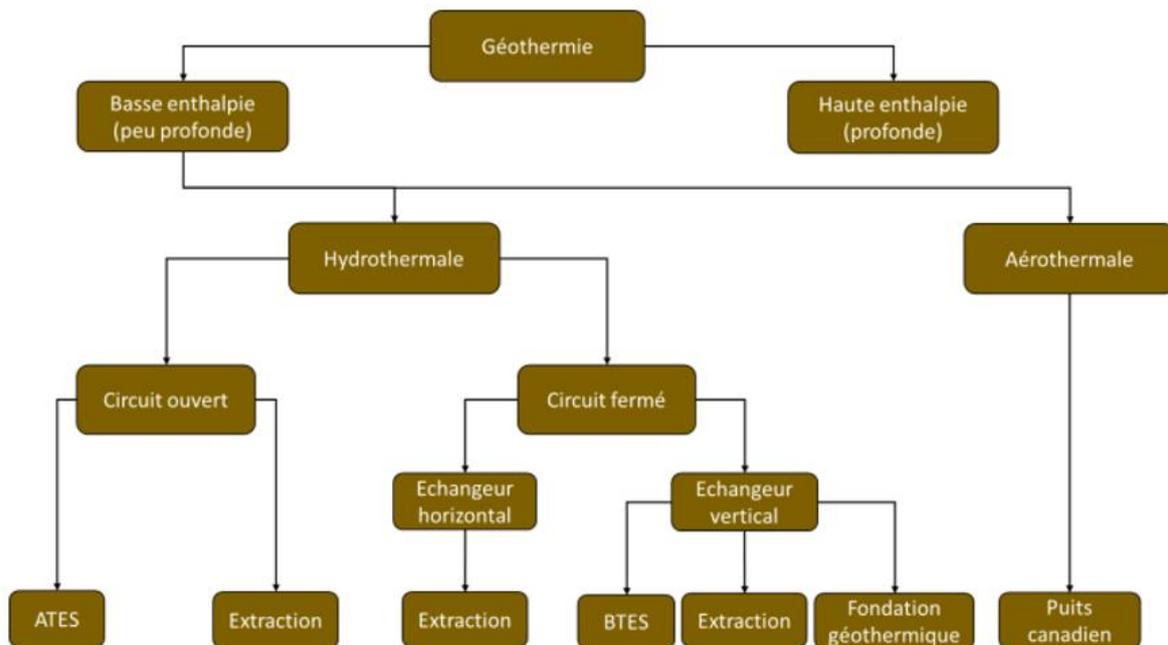
**Figure I. 11 :** Chauffage à sonde

Les systèmes géothermiques offrent des solutions innovantes pour l'échange de chaleur avec le sous-sol, présentant deux approches principales : les systèmes ouverts et les systèmes fermés. Dans les systèmes ouverts, deux puits sont forés pour pomper l'eau du sous-sol, tandis que dans les systèmes fermés, un mélange d'eau et d'antigel circule à travers un réseau de canalisations souterraines. Ces derniers peuvent être installés horizontalement ou verticalement, chacun présentant des caractéristiques distinctes en termes d'installation, de rendement et d'applications possibles.

Les systèmes horizontaux sont généralement plus simples à installer et moins coûteux, mais offrent une capacité limitée et sont principalement adaptés aux applications résidentielles. En revanche, les systèmes verticaux, avec des forages plus profonds, offrent un rendement plus élevé et peuvent être utilisés dans une plus grande variété d'applications, mais ils sont souvent plus coûteux à mettre en place [15].



**Figure I. 12:** schéma des différentes méthodes d'extraction de la chaleur géothermique avec système fermé (échangeurs horizontaux (A) et verticaux (B) et système ouvert (C), Sanner, 2011) [15]



**Figure I. 13 :** Diagramme des systèmes permettant d’exploiter la chaleur géothermique (de Boever et al, 2012)

La popularité croissante des systèmes géothermiques à expansion directe repose sur leur efficacité énergétique accrue et leur empreinte environnementale réduite. Avec une conductivité thermique supérieure du cuivre par rapport au polyéthylène, ces systèmes permettent une circulation plus efficace du fluide de refroidissement, ce qui se traduit par des performances optimisées. En tant qu'alternative durable aux énergies fossiles, la géothermie continuera à jouer un rôle essentiel dans le paysage énergétique mondial post-fossile, bénéficiant d'une croissance exponentielle en raison de sa fiabilité et de son potentiel à long terme.

La géothermie est en pleine expansion, car c'est une énergie renouvelable et à rendement conséquent. Elle aura donc sa place après la baisse des énergies fossiles (pétrole, gaz...). Comme toute énergie renouvelable, sa croissance mondiale sera fulgurante. L'énergie géothermique est placée au 5ème rang des énergies à « potentiel futur » [15].

### 6.3. L’utilisation de ressources géothermiques en Algérie

Les initiatives visant à exploiter les ressources géothermiques en Algérie se multiplient, avec un accent croissant sur des secteurs tels que l'agriculture et l'aquaculture. Outre les projets existants de chauffage des locaux et des serres, le gouvernement algérien a récemment étendu son soutien financier à des projets de pisciculture, notamment dans les préfectures de Ghardaïa

et Ouargla. Ces projets tirent parti des eaux chaudes provenant de l'aquifère Albien du sud de l'Algérie, offrant ainsi un potentiel considérable pour le développement durable et la diversification économique dans ces régions. De plus, des initiatives telles que le projet de pompe à chaleur à l'école primaire Sidi Ben Saleh à Saïda et la planification d'une centrale géothermique à cycle binaire à Guelma démontrent l'engagement continu envers l'utilisation efficace et innovante des ressources géothermiques du pays [16].

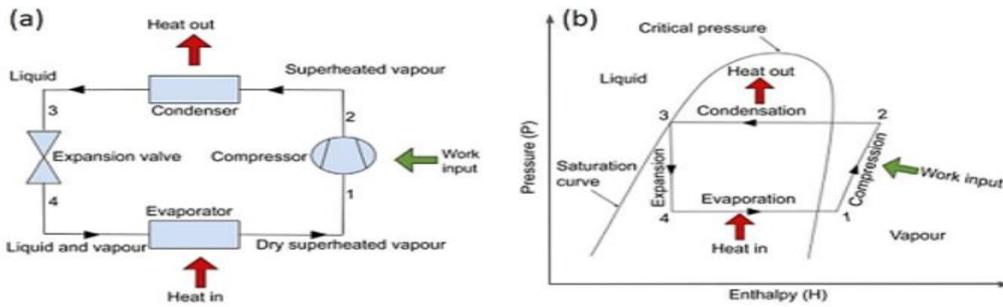
## **7. Pompe à chaleur**

Une pompe à chaleur (PAC) est un dispositif thermodynamique qui transfère la chaleur d'un milieu à basse température vers un milieu à haute température. Les pompes à chaleur sont souvent utilisées pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, ainsi que pour la production d'eau chaude sanitaire. Elles sont connues pour leur efficacité énergétique, car elles exploitent les calories présentes dans l'air, l'eau ou le sol pour chauffer ou refroidir un espace [17].

### **7.1. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur**

Une pompe à chaleur est un appareil qui absorbe la chaleur d'une source à basse température et la rejette dans un évier à haute température. Par exemple, en hiver, il transfère la chaleur à 5-15°C du sol (Ground Source Heat Pump, GSHP) ou l'air ambiant (Air Source Heat Pump, ASHP) à un espace intérieur du bâtiment à 19-23°C. En été, l'opération inverse au lieu, la chaleur est absorbée de l'intérieur du bâtiment à 26-29°C elle sera rejetée au sol ou dans l'air ambiant à 25-40°C pour refroidir cet espace. Alors qu'en hiver le sol est la source de basse température, en été, il devient le puits de haute température.

La dénomination des pompes à chaleur est basée sur le fluide caloporteur pour la chaleur extérieure échangeur, indiqué en premier, et celui de l'échangeur de chaleur intérieur (UNI EN 14511-1 :2018, 2018). Dans les applications géothermiques peu profondes, les pompes à chaleur eau-air et eau-eau sont couramment utilisées. Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur n'est pas très différent de celui d'une pompe à chaleur inversée comme le réfrigérateur [17].



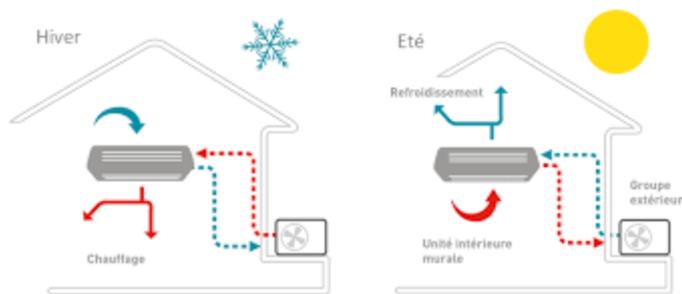
**Figure I. 14:** schéma du cycle de compression de vapeur et diagramme pression-enthalpie (naicker,2015)

Cependant, dans l'absorption de chaleur de l'évaporateur de la pompe à chaleur et la chaleur du condenseur l'émission se produit à une température plus élevée. Grâce à un faible apport d'énergie électrique, l'origine de la température de la chaleur non utilisable est portée à des niveaux plus élevés et utilisables. Dans le cas général d'une réversible pompe à chaleur, adaptée aussi au refroidissement, on peut dire que la température est adaptée à un niveau approprié pour les applications de chauffage, de ventilation et de climatisation. Le fonctionnement d'une pompe à chaleur nécessite une consommation d'énergie pour produire un transfert de chaleur.

## 7.2. Types de Pompes à Chaleur

### Pompe à chaleur aérothermique (air-air et air-eau)

- **Air-air** : Capte la chaleur de l'air extérieur pour la diffuser à l'intérieur du bâtiment.



**Figure I. 15 :** Pompe à chaleur air air

- **Air-eau** : Capte la chaleur de l'air extérieur pour chauffer l'eau utilisée dans le système de chauffage central ou pour l'eau chaude sanitaire.

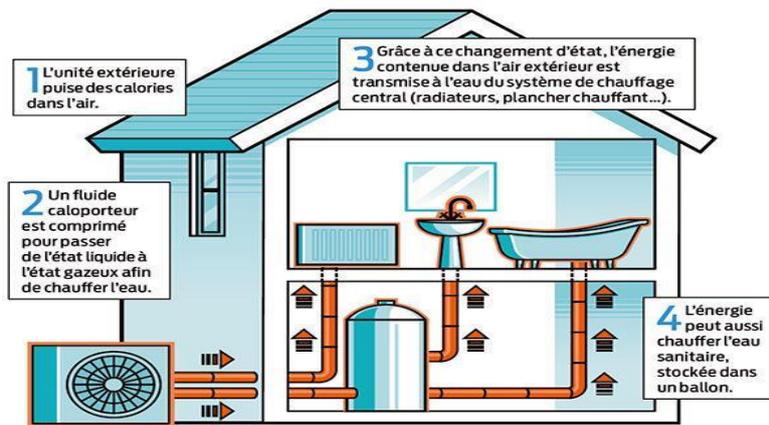


Figure I. 16 : Pompe à chaleur air eau

### Pompe à chaleur géothermique (sol-eau et eau-eau)

- **Sol-eau** : Utilise la chaleur du sol pour chauffer l'eau du système de chauffage [18].

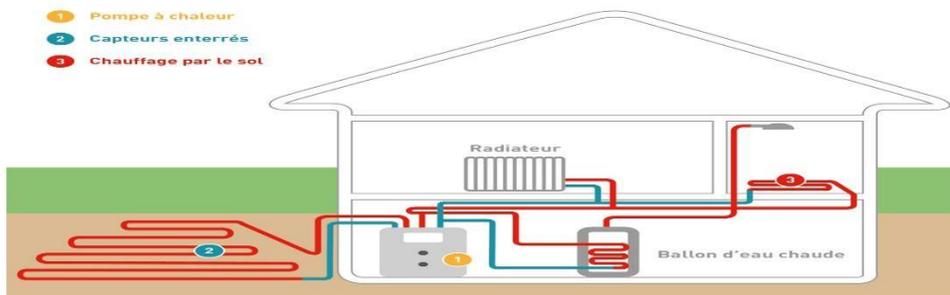


Figure I. 17 : Pompe à chaleur sol eau

- **Eau-eau** : Utilise la chaleur d'une nappe phréatique ou d'une source d'eau pour chauffer l'eau du système de chauffage.

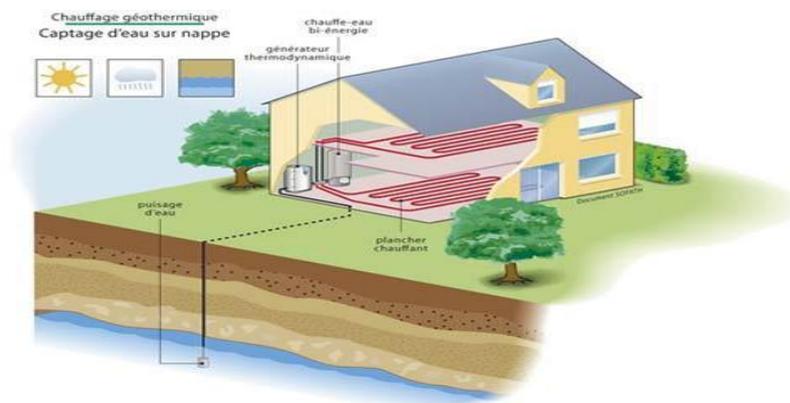


Figure I. 18 : Pompe à chaleur eau eau

## 8. L'échangeur

Un échangeur est un dispositif ou un système qui permet le transfert de chaleur ou de matière entre deux fluides ou entre un fluide et une surface solide. Les échangeurs sont couramment utilisés dans diverses applications industrielles, telles que le chauffage, la ventilation, la climatisation, la réfrigération, et les procédés chimiques. Ils peuvent être classés en fonction de leur configuration et de leur fonctionnement [19].

Les échangeurs de chaleur co-courant et contre-courant sont deux configurations couramment utilisées dans les systèmes thermiques pour transférer la chaleur d'un fluide à un autre.

**a) co-courant** : Imaginez deux flèches parallèles allant dans la même direction. La chaleur est échangée, mais la différence de température entre les fluides diminue continuellement.

**b) Contre-courant** : Imaginez deux flèches allant en sens opposé. La chaleur est échangée plus efficacement car la différence de température est maintenue plus constante tout au long de l'échangeur.

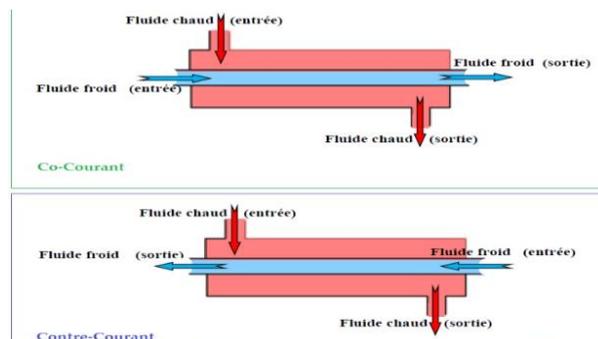


Figure I. 19 : Schéma d'échangeurs co-courant et Contre-courant

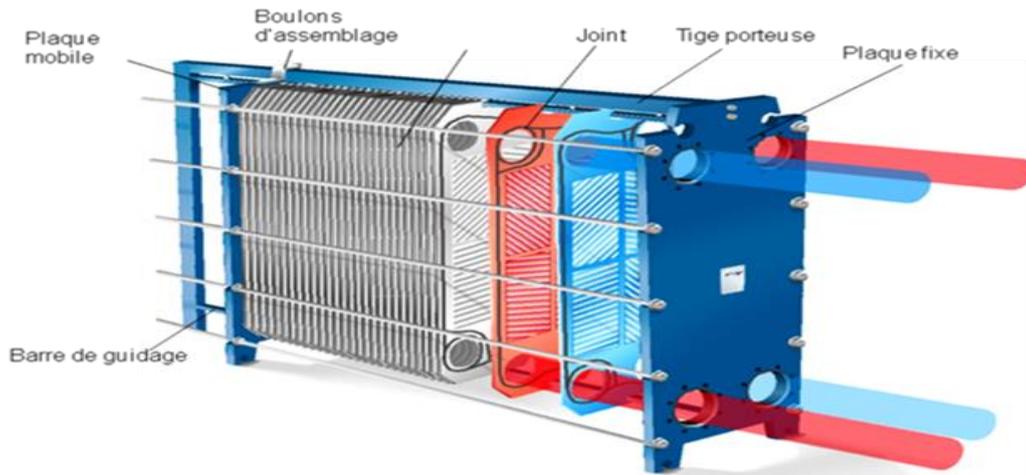
### 8.1. Type d'échangeur de chaleur

#### a) Échangeurs à plaques

Composés de nombreuses plaques minces empilées les unes sur les autres, formant des canaux à travers lesquels les fluides circulent.

Les plaques sont souvent en acier inoxydable pour une meilleure conductivité thermique et résistance à la corrosion.

Les fluides chaud et froid circulent alternativement à travers les canaux formés par les plaques, permettant un transfert de chaleur efficace [19].



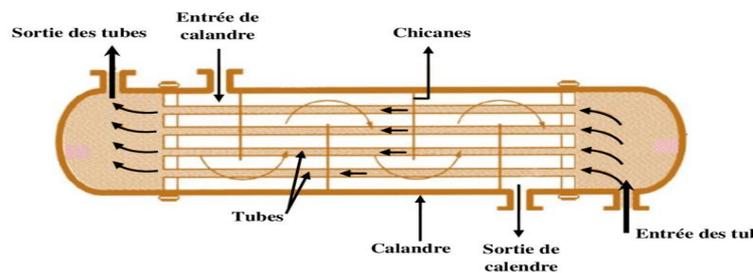
**Figure I. 20:** échangeur a plaque

**b) Échangeurs à tubes et calandres (ou échangeurs tubulaires)**

Composés de nombreux tubes disposés à l'intérieur d'une coque (calandre).

Un fluide circule à l'intérieur des tubes, tandis que l'autre circule autour des tubes dans la calandre.

Le transfert de chaleur se fait à travers les parois des tubes entre le fluide chaud et le fluide froid.



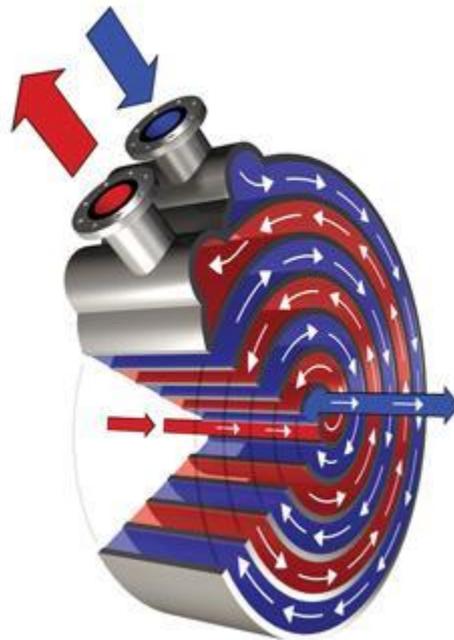
**Figure I. 22 :** Échangeurs à tubes et calandres

**c) Échangeurs à spirale**

Composés de deux bandes métalliques enroulées en spirale pour former deux passages d'écoulement en spirale.

Les fluides circulent dans des canaux en spirale, souvent dans des directions opposées (contre-courant).

Le transfert de chaleur se fait à travers les parois des canaux en spirale entre les deux fluides [19].



**Figure I. 23 :** Fonctionnement d'un échangeur spiralé

## **9. Échangeur de chaleur pour la récupération de chaleur des tunnels**

Un échangeur de chaleur pour la récupération de chaleur des tunnels est un système thermodynamique qui capte la chaleur accumulée dans l'air ou les structures d'un tunnel (ferroviaire, routier, ou autre) et la transfère à un fluide de travail, tel que l'eau ou un liquide de refroidissement. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour divers usages, comme le chauffage de bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire, ou d'autres applications industrielles [20].

La première utilisation d'échangeurs de chaleur dans des tunnels a eu lieu le 17 juin 2010 dans le tunnel Linzer à Vienne, dans une section appelée Test Facility LT24.

### **9.1. Principes de fonctionnement :**

- **Captage de la chaleur :**

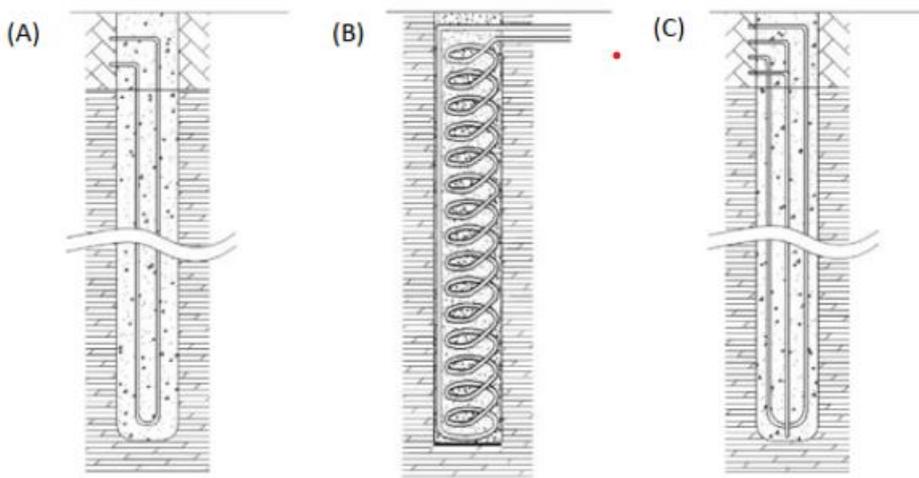
L'air chaud dans le tunnel, souvent réchauffé par les équipements électriques, la friction des trains, ou la chaleur géothermique naturelle, est dirigé vers l'échangeur de chaleur.

- **Transfert de chaleur :**

À l'intérieur de l'échangeur, la chaleur de l'air est transférée à un fluide caloporteur. Cela se fait généralement à travers des plaques ou des tubes, optimisés pour maximiser le transfert de chaleur.

- **Distribution :**

Le fluide = caloporteur chauffé est ensuite pompé hors du tunnel vers un système de distribution où il peut être utilisé pour chauffer des bâtiments, produire de l'eau chaude, ou pour d'autres besoins énergétiques [20].



**Figure I. 24 :**Schéma des différents types d'échangeurs avec (A) tubes en simple U, (B) tube spiralé et (C) tubes en double U (Li et al., 2016) [16] .

## **10. Conclusion :**

Il est clair que la réduction des émissions de gaz à effet de serre est devenue une priorité mondiale. Les plans d'action pour les réduire sont de plus en plus stricts. La géothermie et la récupération de chaleur dégagée dans les tunnels et les parkings souterrains peuvent être combinées en utilisant des technologies telles que les pompes à chaleur et les échangeurs de chaleur. Ces systèmes permettent de capturer la chaleur et de l'utiliser de manière efficace pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments et les serres, cela contribue à l'efficacité énergétique et à la réduction de la consommation d'énergie fossile.

## **Chapitre II Energie des tunnels, la chaleur des métros et parkings souterrains**

### **1. Introduction**

Les tunnels énergétiques consistent à utiliser les tunnels ou autres infrastructures (stations, gares souterraines parking souterrains) en contact avec le terrain comme échangeur de chaleur géothermique. L'installation de tubes échangeurs géothermiques dans les parois en béton des ouvrages permet d'exploiter la chaleur naturellement présente dans le sol, mais également la chaleur résiduelle de l'air du tunnel. L'air du tunnel chauffé au rythme des passages de trains, véhicules et métros et leurs freinages aux abords des stations peut en effet constituer une autre source de chaleur pour ce type d'infrastructure.

Cependant, si de nombreuses études se sont concentrées sur l'évaluation des performances thermiques des tunnels énergétiques, peu de recherches ont été menées sur la contribution spécifique de la chaleur des métros. Contrairement aux études sur les pieux énergétiques, qui sont plus avancées et généralisées, la récupération de la chaleur des métros reste un domaine encore largement inexploré.

L'exploitation de la chaleur des parkings souterrains a reçu moins d'attention, malgré son potentiel significatif. Ces espaces, souvent vastes et situés en profondeur, accumulent une quantité considérable de chaleur en raison de l'activité humaine et de la circulation des véhicules. En canalisant cette énergie thermique, il est possible de fournir du chauffage pour des bâtiments adjacents, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles.

De plus, la mise en œuvre de cette technologie dans les parkings souterrains existants peut se faire sans modifications majeures, ce qui en fait une solution économiquement viable et attrayante. L'intégration de telles initiatives pourrait être particulièrement bénéfique pour des pays comme l'Algérie

#### **1.1.Objectif du Chapitre**

Ce chapitre a pour objectif principal de fournir une revue actualisée des différentes investigations numériques, études théoriques et applications expérimentales concernant les tunnels énergétiques, parkings souterrains et la récupération de la chaleur des métros. Il se concentrera sur les comportements mécanique et thermique de ces systèmes, en identifiant les aspects clés pour leur analyse, conception et application à travers le monde. Une attention

particulière sera portée aux directives de conception pour les tunnels et les parkings existants, avec des exemples de pays tels que la Chine, l'Autriche et la France, qui pourraient servir de modèle pour l'Algérie. L'idée est d'intégrer ces technologies dans les infrastructures existantes pour bénéficier de la chaleur des tunnels.

## **2. Energie des tunnels**

Les tunnels peuvent être utilisés comme géo structures. Un grand volume de sol et de surface peut être activé pour l'échange de chaleur. Les tunnels en centre-ville ont l'avantage d'être proches des utilisateurs finaux potentiels. Une différence essentielle par rapport aux autres géo structures est que la chaleur n'est pas seulement extraite du sol mais aussi de l'air du tunnel. Des études précédentes ont montré une influence de l'air du tunnel sur la production thermique, représentant environ 20 % à 30 % de la production d'énergie [4]. Plusieurs solutions d'échangeurs de chaleur existent pour les tunnels. En plus des pieux énergétiques forés, il y a aussi des parois de soutènement, des fondations ainsi que des ancrages énergétiques.

Il est également possible d'intégrer les échangeurs de chaleur dans le revêtement du tunnel. Deux méthodes principales d'activation thermique des revêtements de tunnel sont présentes aujourd'hui. La première utilise des géotextiles pour fixer les tuyaux entre le revêtement extérieur et intérieur. L'autre méthode utilise des segments de revêtement de tunnel préfabriqués. La préfabrication réduit les efforts d'installation dans le tunnel et maintient les coûts d'investissement bas.

Les unités peuvent être intégrées lors de l'installation du tunnel sans besoin supplémentaire de forage de trous de forage. Les prévisions précédentes indiquent que les coûts accrus pour la coque causée par l'activation géothermique s'élèvent à environ 2 %. Deux modes peuvent être distingués pour le fonctionnement des tunnels thermiquement activés. Dans le premier mode, l'énergie est soit extraite soit fournie au sol, ce qui entraîne un refroidissement ou un chauffage constant du sol au fil du temps.

L'autre mode fonctionne par alternance saisonnière et le tunnel thermiquement activé est utilisé à la fois pour le chauffage et le refroidissement. Le sol est ainsi utilisé comme un stockage d'énergie thermique. Le deuxième mode peut produire un équilibre énergétique au fil du temps, conduisant à une température du sol stable tout au long de l'année après une période complète de chauffage et de refroidissement.

## 2.1 Activation thermique des revêtements de tunnel

L'activation thermique des revêtements de tunnel est un système innovant qui utilise la chaleur du sol pour fournir de l'énergie aux bâtiments. Cette méthode offre plusieurs avantages par rapport à l'activation thermique des fondations des bâtiments, principalement en permettant l'activation de volumes de sol beaucoup plus importants.

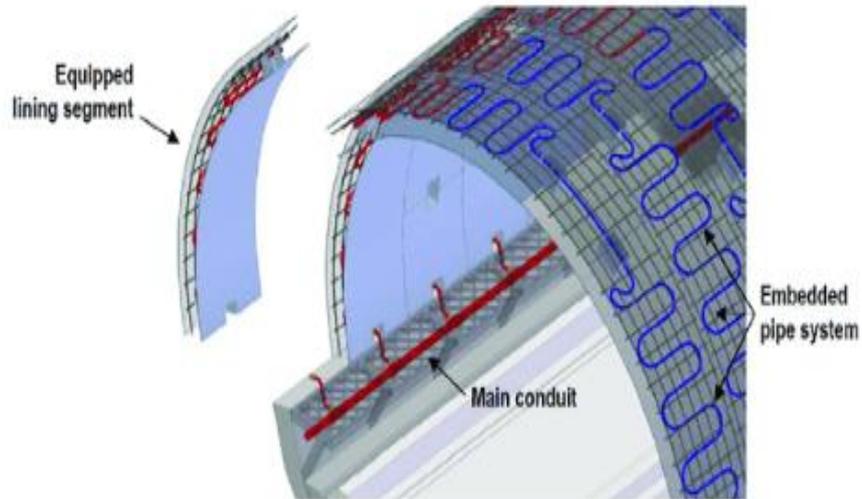
Les tunnels énergétiques peuvent ainsi assumer une fonction énergétique additionnelle à leur rôle structurel principal, avec des coûts techniques supplémentaires relativement faibles. De plus, l'emplacement peu profond de ces tunnels, en particulier dans les sols aquifères, est idéal pour l'exploitation géothermique.

Comme dans une boucle fermée traditionnelle, ce système n'interfère pas avec les eaux souterraines, ce qui représente un avantage environnemental significatif par rapport aux systèmes à boucle ouverte. [32]

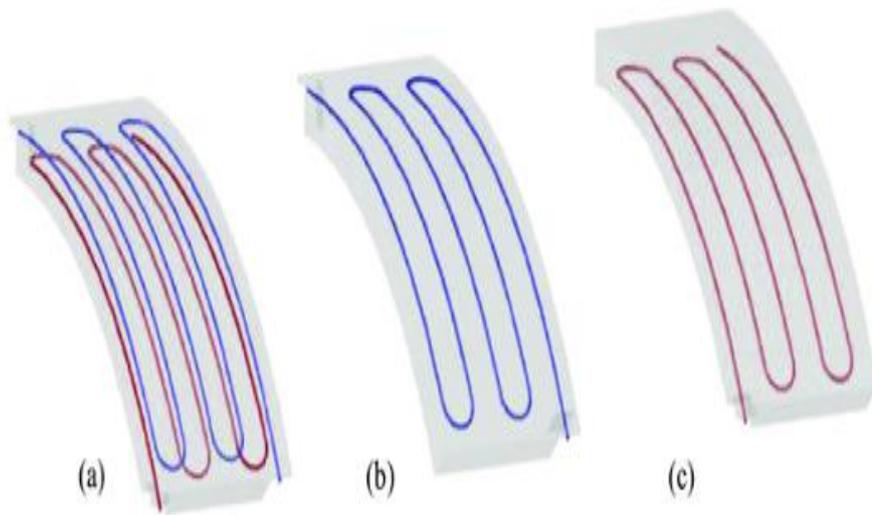
Le système se compose d'un circuit géothermique primaire, d'un circuit secondaire et d'une unité de pompe à chaleur couplée aux collecteurs des échangeurs de chaleur au sol et/ou à une machine de refroidissement. Un fluide caloporteur (tel que de l'eau, de l'eau glycolée ou une solution saline capable de fonctionner jusqu'à  $-20^{\circ}\text{C}$ ) est mis en circulation par une pompe hydraulique dans la boucle, extrayant la chaleur du sol en hiver. Ce fluide est ensuite chauffé par la pompe à chaleur, augmentant sa température typiquement de  $10\text{-}15^{\circ}\text{C}$  à  $25\text{-}35^{\circ}\text{C}$ . La chaleur est ensuite distribuée aux utilisateurs finaux via un réseau de distribution et un circuit secondaire.

En été, l'excès de chaleur est extrait des bâtiments via des systèmes de refroidissement par air ou par eau intégrés dans les sols, les murs et les plafonds, et est dissipé ou stocké dans le sol

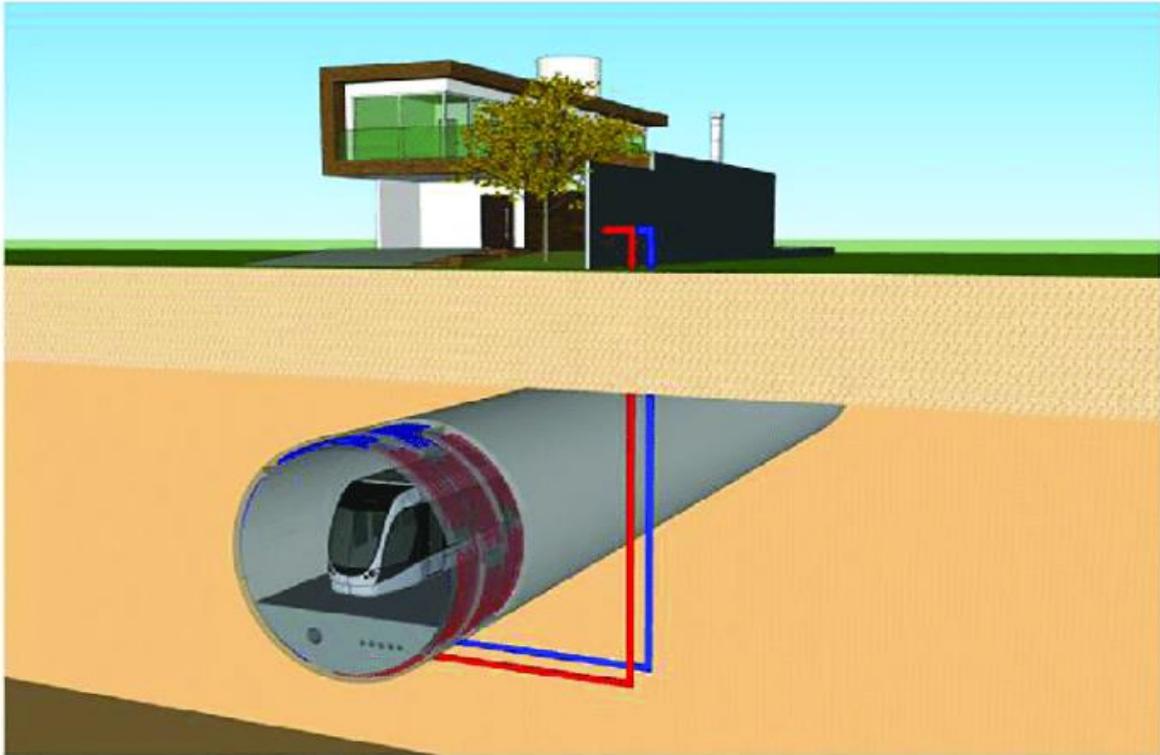
via des tuyaux absorbants. La pompe à chaleur peut alors réduire la température du fluide en dessous de celle du système de conditionnement, améliorant ainsi l'efficacité de la réinjection. Dans certaines conditions, comme en mode de refroidissement gratuit (free cooling), la pompe à chaleur peut être omise si les températures du sol sont favorables, et l'électricité nécessaire se limite alors à celle pour faire fonctionner les pompes de circulation. Par exemple, en mode free cooling, le fluide chaud est directement dissipé dans le sol, évitant l'utilisation de la pompe à chaleur et augmentant ainsi l'efficacité du système.



**Figure II. 1** Représentation schématique d'un revêtement segmentaire de tunnel équipé d'un échangeur de chaleur au sol (Barla et Perino, 2014 ; Barla et al., 2016).



**Figure II .2** Représentation schématique d'un revêtement segmentaire de tunnel équipé d'un échangeur de chaleur au sol (Barla et Perino, 2014 ; Barla et al., 2016).



**Figure II .3** Exemple schématique de l'activation thermique du revêtement segmentaire du tunnel et de son raccordement à un système de pompe à chaleur dans le bâtiment ci-dessus.

## 2.2 Comportement thermique des Tunnels

Un tunnel énergétique est un système caractérisé par trois éléments principaux : le fluide caloporteur à l'intérieur du tube, le sol ou la masse rocheuse environnante et l'air dans le tunnel (Tinti et al, 2017 ; Bidarmaghzet Narsilio, 2018).

Leurs performances thermiques sont affectées par de nombreux facteurs tels que le placement des tubes, les propriétés thermo hydrauliques du sol, l'écoulement des eaux souterraines, la température de l'air à l'intérieur du tunnel, la température du sol éloigné et la chaleur. Courbe de charge. Les principaux mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans ce problème sont illustrés à la (**Figure 5**).

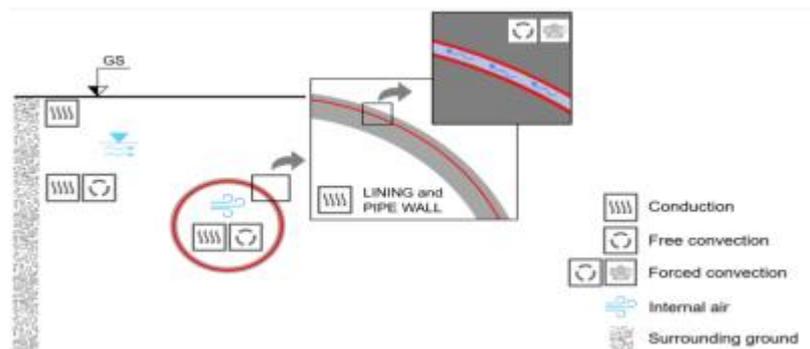
La convection se produit dans les revêtements et les tubes absorbants entre les parois, mais la convection est caractéristique de l'air du tunnel, des fluides caloporteurs et du sol lorsque des écoulements d'eau souterraine sont présents. Ces mécanismes ont été validés dans l'article de Bidarmaghz et Narsilio (2018) et les résultats sont décrits ci-dessous. Pour plus de clarté, les principaux mécanismes de transfert de chaleur dans le sol sont présentés [30]

❖ Conduction (ou diffusion) de la chaleur, par laquelle l'énergie thermique est transférée d'une région du milieu à l'autre, sans mouvement visible dans le milieu, au moyen du mouvement des particules atomiques (contribution la plus importante dans le transfert de chaleur pour les géostructures thermoactives :

❖ La convection de chaleur, donnée par la somme de la conduction et de l'advection, rapportée au transport de chaleur dans un fluide au moyen de flux de circulation. Il peut être libre ou forcé s'il est piloté par des (écoulements des eaux souterraines) ou des forces externes (pompes), et internes ou externes si elles se produisent dans un tuyau par exemple ou autour d'un corps.

Le rayonnement, où l'énergie thermique se propage sous forme d'ondes électromagnétiques.

Le transfert de chaleur se produit lorsqu'il y a un gradient de température. La conduction est souvent les mécanismes le plus dominant dans le sol, mais l'écoulement des eaux souterraines fournit une contribution par convection très importante. Le rayonnement est généralement négligé.



**Figure II .4** Principaux mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans le problème des systèmes de tunnel énergétique.

chaleur exploitable, qui peut être obtenue numériquement, analytiquement ou expérimentalement (échelle réelle ou à l'échelle du laboratoire). Du point de vue numérique, comme on peut le lire chez Barla et Di Donna (2018), il est inutile de réaliser une simulation THM complète, malgré les réponses serait obtenue immédiatement, car l'amélioration des résultats ne serait pas contrebalancée, le degré de difficulté accru. Dans tous les cas la puissance thermique  $Q$  en  $W$  extraite du sol en hiver et injectée en été peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$Q = \dot{m} c_p |t_i - t_o|$$

Où  $T_i$ ,  $T_o$  sont les températures d'entrée et de sortie du circuit de tuyauterie en °C,  $\dot{m}$  est le débit massique exprimé en kg/s et  $c_p$  est la capacité calorifique du fluide caloporteur en J/(kg °C). La puissance par unité de surface de revêtement de tunnel en W/m<sup>2</sup> est obtenue en divisant par l'anneau extérieur ou intérieur :

$$q = \frac{Q}{L\pi D}$$

Où  $L$  et  $D$  sont l'épaisseur et le diamètre extérieur de l'anneau.

### 3. La chaleur des métros

Les échanges de chaleur dans les tunnels des trains et des métros sont influencés par divers facteurs, notamment les mouvements des trains, la présence des passagers, et même la géothermie. Par exemple, lorsque les métros freinent ou accélèrent, cela génère de la chaleur qui s'élève rapidement dans le tunnel. Cette chaleur s'ajoute à celle produite par l'éclairage des tunnels et la présence des passagers.

Jusqu'à présent, les ingénieurs n'avaient pas une estimation précise de la chaleur provenant de l'air et de la façon dont elle contribue à ces échanges thermiques. Cependant, des chercheurs du Laboratoire de mécanique des sols (LMS) de l'EPFL ont récemment abordé cette question de manière approfondie. Dans une étude publiée dans la revue **Applied Thermal Engineering**, ces chercheurs ont réussi à calculer avec précision un coefficient crucial pour ces échanges : le coefficient de convection.

Cette avancée permettra aux ingénieurs de mieux comprendre et de modéliser les flux de chaleur dans les tunnels, ce qui est essentiel pour concevoir des systèmes de ventilation efficaces et pour optimiser les conditions thermiques à l'intérieur des tunnels des transports en commun.

Les infrastructures souterraines ont le potentiel de réguler les températures en évacuant l'excès de chaleur ou de froid vers la surface. Par exemple, le déplacement d'air chaud ressenti près des bouches de métro est un phénomène résultant de cette régulation thermique naturelle. Les

ingénieurs cherchent à exploiter cette physique en plus de la chaleur naturelle présente dans le sol.

Concrètement, les chercheurs proposent d'intégrer des tuyaux en plastique dans la structure en béton des tunnels du métro, à intervalles réguliers, et de les connecter à des pompes à chaleur. Un fluide chaud, comme de l'eau, est ensuite introduit dans ces tuyaux, agissant comme un réfrigérant. Ce système permet d'injecter de l'eau froide dans les tunnels en hiver et de rejeter de l'eau chaude en surface pendant l'été. Les chercheurs avancent que cette installation géothermique dans les tunnels peut stocker de l'énergie sur une durée de vie de 50 à 100 ans avec un investissement initial relativement modeste, en ne nécessitant le remplacement que de la pompe à chaleur tous les 25 ans.

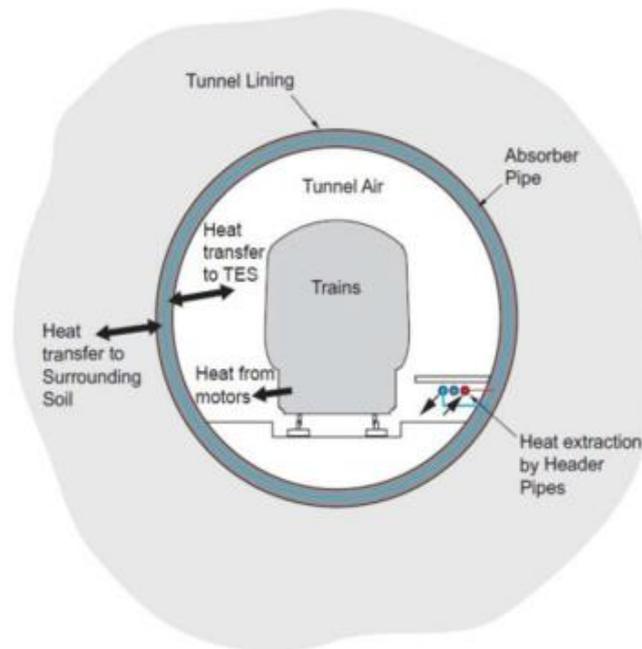
Dans les tunnels froids, la température de l'air est relativement basse (environ 15 °C) toute l'année, et la fréquence du passage des trains est modérée de sorte qu'elle ne peut pas augmenter significativement la température dans le tunnel. Ce type de tunnel a normalement un grand diamètre interne dans 10–12 mètres. Les températures régnant dans le tunnel n'ont qu'un effet limité sur la température du sol environnant. Les tunnels routiers peuvent également appartenir à cette catégorie. Les tunnels chauds, en revanche, présentent généralement des températures internes élevées. Tunnels urbains (chemins de fer souterrains) avec des diamètres intérieurs typiques d'environ 7 m peuvent ont des températures estivales d'environ 30 °C. De nombreuses gares et une fréquence cyclable rapide des trains entraînent un apport de chaleur supplémentaire lors du freinage et du démarrage. Cela augmente la température de l'air dans le tunnel, ce qui réchauffe le sol. De plus, les profonds tunnels alpins [31]

## **4. présentation des travaux théoriques et expérimentaux sur la récupération de la chaleur de tunnels de métro**

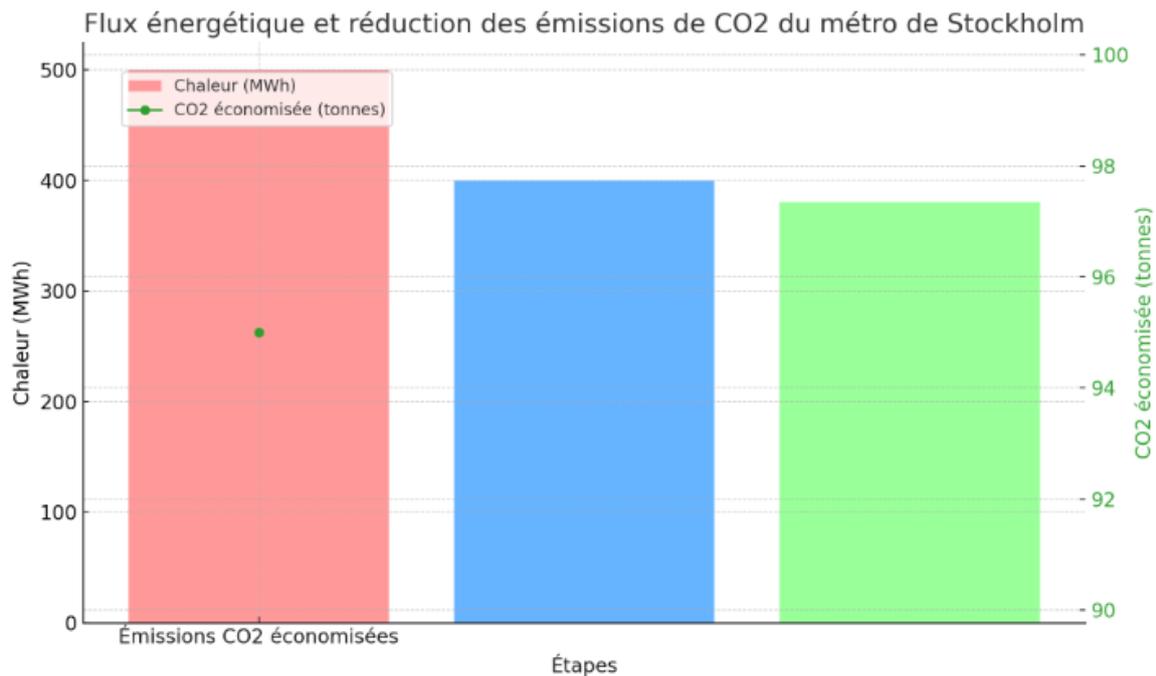
### **4.1. Métro de Stockholm**

la ville de Stockholm, en Suède. Le système de métro de Stockholm récupère la chaleur produite par les trains et les installations électriques. Cette chaleur est ensuite utilisée pour alimenter le réseau de chauffage urbain de la ville. Plus de 90% des bâtiments de Stockholm sont connectés à ce réseau de chauffage urbain, ce qui permet de réduire significativement la consommation d'énergie fossile pour le chauffage.

Grâce à cette initiative, la ville de Stockholm économise chaque année des quantités importantes d'énergie et réduit les émissions de CO<sub>2</sub>. Cela démontre le potentiel élevé de la récupération de chaleur du métro pour contribuer à des systèmes énergétiques plus durables et efficaces dans les villes densément peuplées. [34]



**Figure II. 5:** La configuration du modèle de ventilation, montrant le transfert de chaleur de l'air au tunnel et au sol environna



**Figure II. 6** flux énergétique et réduction des émissions de co2 du métro de Stockholm

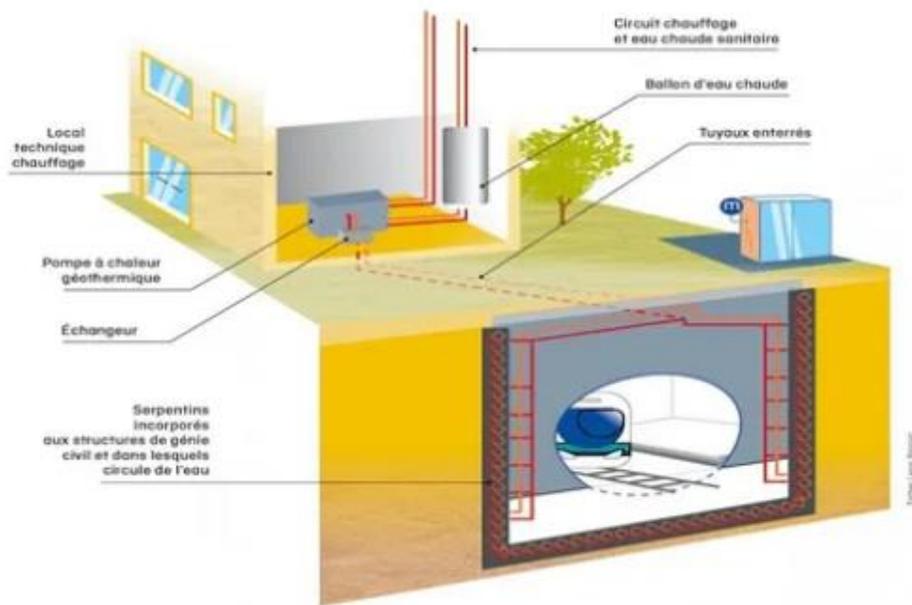
#### 4.2 Projet CELSIUS à Londres

Un projet dirigé par Jamie Byrne en 2015 visait à récupérer la chaleur perdue des transformateurs et des conduits de ventilation tubulaires, en intégrant également le stockage de chaleur.

En 2012, le projet Banhill Energy Center avait mis en place un système de chauffage urbain pour chauffer deux centres de loisirs, trois maisons communautaires et un total de 805 maisons. Ce système comprenait un moteur à gaz de cogénération de 1,9 MW et un réservoir de stockage thermique de 115 m<sup>3</sup>, avec 1,5 km de conduites de chauffage urbain.

Le projet CELSIUS avait pour objectif d'étendre ce réseau à 454 foyers supplémentaires et d'utiliser l'énergie excédentaire du métro de Londres pour alimenter 1 000 foyers de plus. Les conduits de ventilation évacuent l'air à une vitesse de 30 m<sup>3</sup>/s avec des températures de 22 °C en hiver et 28 °C en été. Une étude de faisabilité avait montré que la puissance calorifique du puits de ventilation au milieu du tunnel serait d'environ 0,4 MW.

Pour maximiser l'efficacité du démonstrateur, il a été décidé de moderniser le conduit de ventilation avec un nouveau ventilateur d'extraction. Ce nouveau ventilateur éjecte de l'air à une vitesse de 70 m3/s, augmentant ainsi la puissance calorifique à environ 1 MW. [36]



**Figure II. 7** les sources de chaleur utilisées dans le métro de Londres

#### 4.3. Le projet de refroidissement et de chauffage intégré métropolitain (MICAH) de 2019.

Davies et al. ont proposé l'installation d'un système combiné de refroidissement et de récupération de chaleur sur un site de puits de ventilation de la ligne Piccadilly du métro de Londres. Les principaux processus simulés par leur modèle comprennent :

- a. Récupération de la chaleur de l'air:** L'échangeur de chaleur HRHX (Heat Recovery Heat Exchanger) récupère la chaleur de l'air passant à travers lui.
- b. Boucle d'eau primaire:** Cette boucle pompe l'eau chauffée provenant du HRHX et la transporte vers l'évaporateur de la pompe à chaleur.
- c. Boucle d'eau secondaire :** Cette boucle transfère la chaleur améliorée au réseau de chauffage urbain.

Dans les deux configurations envisagées, la chaleur est extraite de l'air en passant sur une bobine d'échangeur de chaleur à eau froide, ce qui transfère la chaleur à l'eau et augmente sa

température. Selon le modèle, ce système pourrait être économiquement viable et entraîner des économies substantielles de carbone et de coûts. Pour les 200 puits de ventilation

à Londres, cela pourrait permettre d'économiser plus de 360 000 tonnes de carbone par an et de générer des revenus de 40 millions de livres sterling. En appliquant cette technologie à 50 % des 150 systèmes de métro dans le monde, on pourrait économiser plus de 27 millions de tonnes de carbone chaque année. [37]

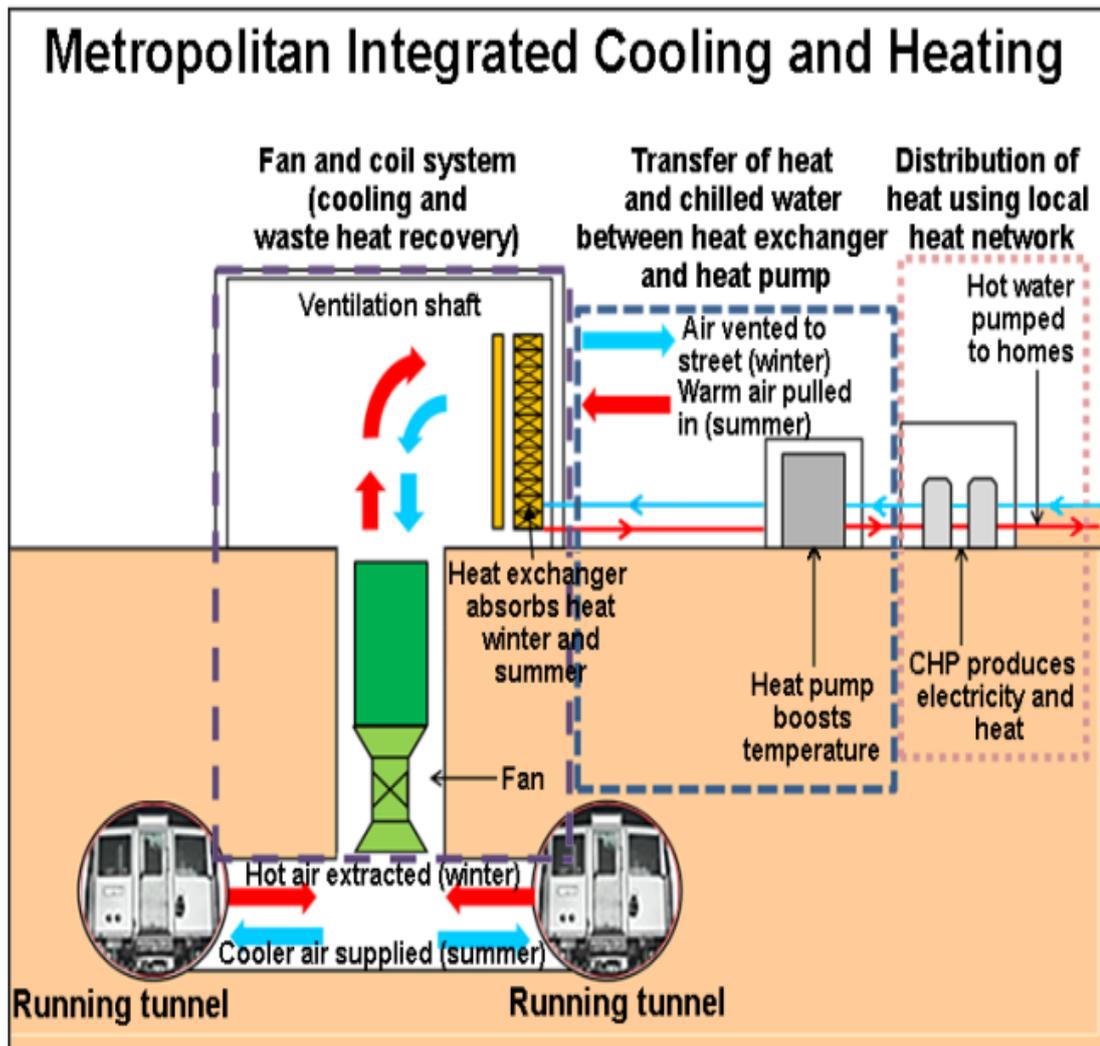
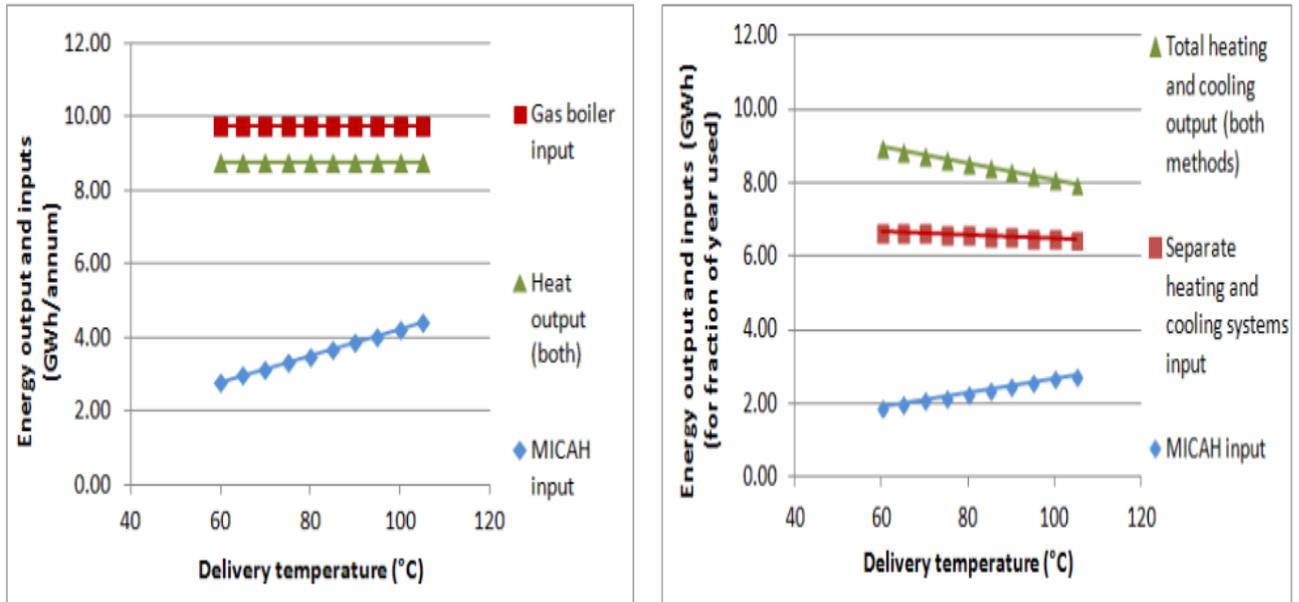


Figure II.8 : Schéma du système MICAH



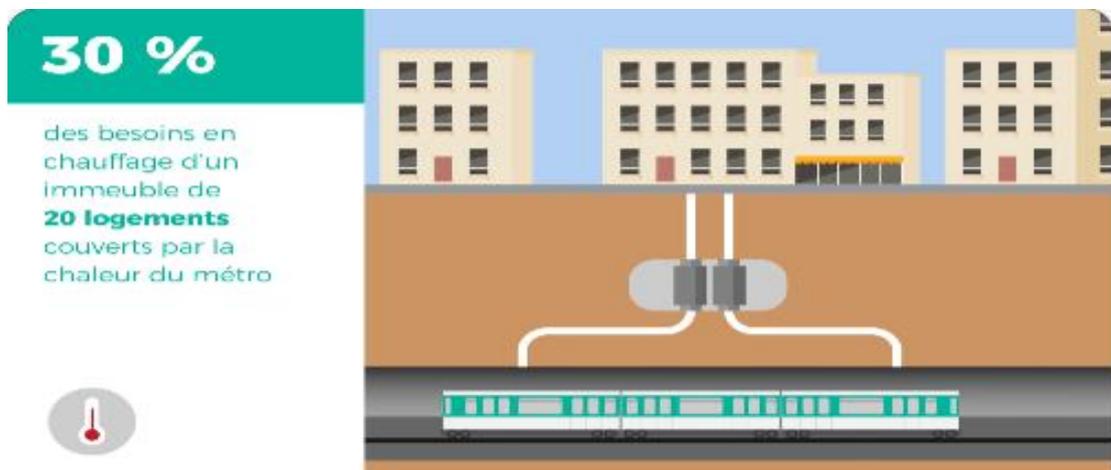
**Figure II. 9** Mode chauffage uniquement (c'est-à-dire mode extraction) Mode combiné de refroidissement et de chauffage

#### 4.4 Projet de paris habitat

A Paris, un immeuble chauffé grâce à la chaleur de la ligne 11 du métro . Tous deux signataires de la Charte du Plan Climat de Paris, le groupe RATP et Paris Habitat présentent une réalisation concrète de récupération de chaleur du métro pour chauffer un immeuble en plein cœur de Paris. Cela se passe sur la ligne 11 du métro et dans un immeuble géré par Paris Habitat situé dans le 4ème arrondissement. La chaleur du tunnel du métro y est récupérée et acheminée vers une pompe à chaleur qui se trouve dans l'immeuble. L'énergie ainsi produite est utilisée pour chauffer les 20 logements de l'immeuble. Les résultats sont très satisfaisants puisque le dispositif permet de couvrir en moyenne 35% des besoins en chauffage de l'immeuble. [38]

Mois	Température Tunnel (°C)	Besoins Chauffage (kWh)	Flux de Chaleur Récupérée (kWh)
Janvier	25	2000	700
Février	24	2200	770
Mars	23	2500	875
Avril	22	2700	945
Mai	21	3000	1050
Juin	20	3200	1120
Juillet	19	3500	1225
Août	18	3700	1295
Septembre	17	4000	1400
Octobre	16	4200	1470
Novembre	15	4500	1575
Décembre	14	4700	1645

**Figure II. 10** Températures du Tunnel, Besoins en Chauffage et Flux de Chaleur Récupérée



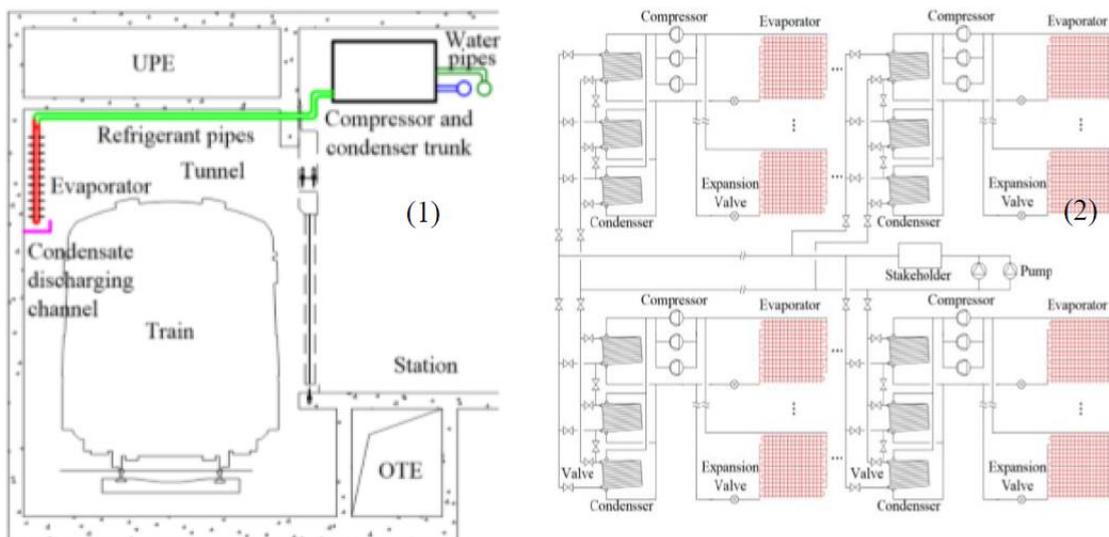
**Figure II. 11** : Un immeuble chauffé grâce à la chaleur de la ligne 11 du métro de paris

#### 4.5.Métro de chine

l'étude de Yongjin Chaia et al. (2017) présente un nouveau schéma pour la récupération de la chaleur perdue dans les systèmes de récupération de chaleur waste heat recovery system (WHRS) dans les tunnels de métro, tout en fournissant simultanément un sous-produit pour le refroidissement des espaces du métro via des pompes à chaleur à source d'air ASHP (air source heat pump). Ce système de récupération de chaleur résiduelle se compose de quelques pompes à chaleur air/eau modulaires et d'une boucle d'eau, La charge de refroidissement des pompes à chaleur à air pour la station visée est totalement d'environ 312 kW un design flexible et efficace

est proposé, une capacité de refroidissement de 25 kW dans les conditions les plus défavorables est délimitée en tant que modulateur de pompe à chaleur. Ainsi, la capacité de refroidissement de chaque modulateur de compresseur est de 8,3 kW. Les échangeurs de chaleur à tubes à ailettes fonctionnent comme des évaporateurs à refroidissement par air. Les résultats des calculs montrent que le taux de transfert de chaleur moyen est de 394,27 W / m<sup>2</sup> et que la capacité de transfert de chaleur moyenne d'un évaporateur est de 4,42 kW.

Les avantages du système développé sont induits d'être : petit, flexible, sécurisé, pratique et efficace. Il s'applique à la fois au métro nouvellement construit, flexible, sécurisé, pratique et efficace. [40]

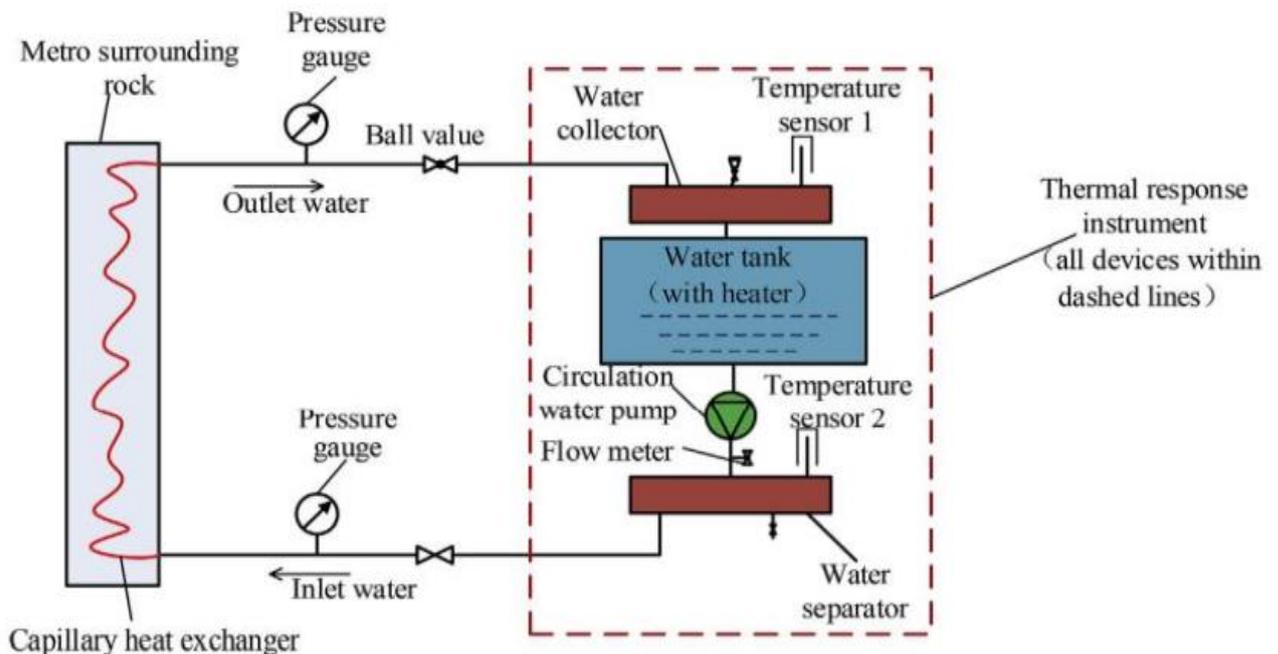


**Figure II. 12** (1) Disposition des appareils pour whrs dans la station, (2) schema d'un système Modulaire de WHRS basé sur ASHP

#### 4.5.1. Etude expérimental sur le métro de Qingdao

Afin de résoudre le problème de l'accumulation de chaleur dans les tunnels de métro, un système de pompe à chaleur de métro avec réseau capillaire comme échangeur de chaleur frontal est proposé par (Liu et al , 2019). L'article présente une méthode simplifiée unidimensionnelle pour calculer le transfert de chaleur dans un échangeur de chaleur capillaire (CHE) basé sur la source de chaleur de surface, utilisant une charge progressive, un principe de superposition, des économies d'énergie et une approche itérative. Les tests réalisés à la station Zhiquan Road de la ligne R2 du métro de Qingdao montrent une erreur maximale du modèle de 8,79%. L'impact de la température de l'eau d'entrée, de la conductivité thermique du revêtement et de la roche

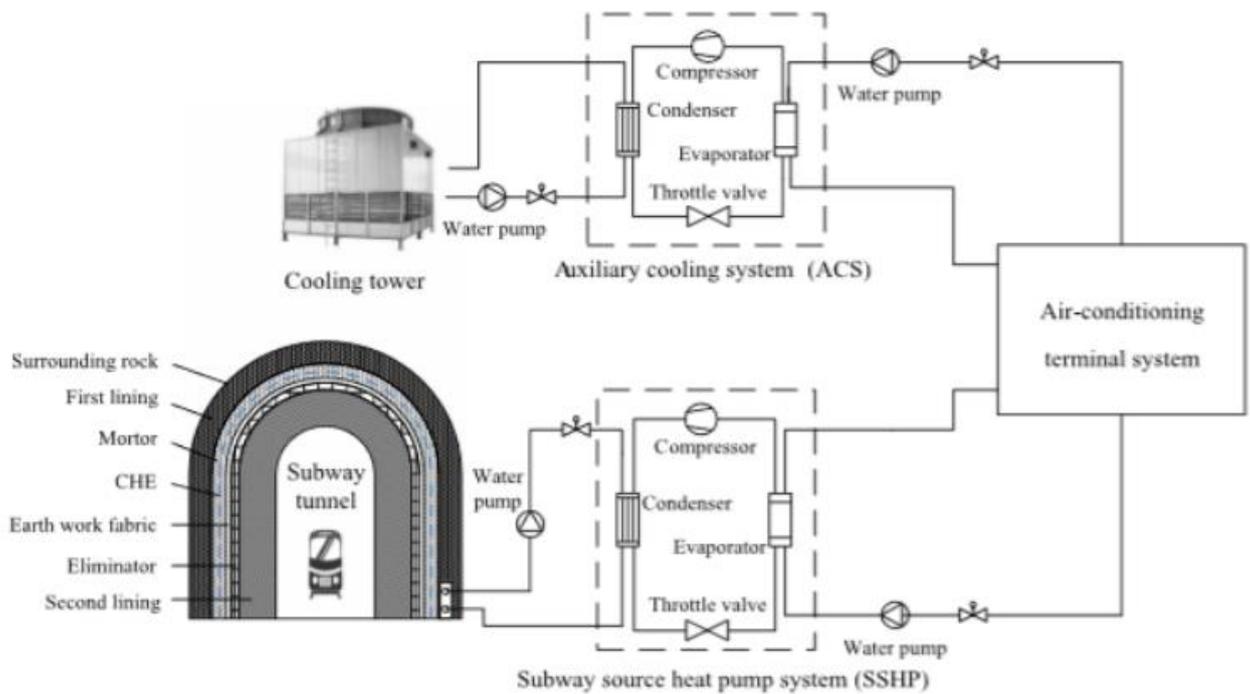
environnante, ainsi que de la diffusivité thermique de la roche environnante sur les performances du CHE a été analysé. Les paramètres thermiques sont traités comme fixes pour simplifier le modèle, affectant légèrement sa précision. Le modèle est surtout applicable aux CHE sur des surfaces planes de tunnels, et son utilisation sur des plafonds en arc sera abordée dans de futures recherches. [41]



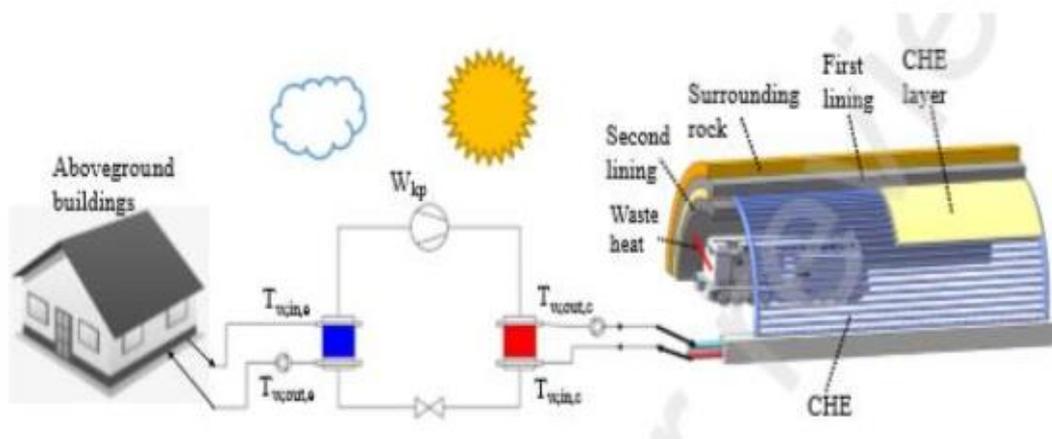
**Figure II. 13** Schéma de principe expérimental des équipements

#### 4.5.2. Etude Expérimental sur le métro de Qingdao PAC hybride

Une autre étude expérimentale a eu lieu pour exploiter la chaleur du métro à grande échelle, **Zhu Mao et al.** (2021) ont développé un modèle de simulation dynamique sur TRNSYS pour un système de pompe à chaleur hybride, intégrant le transfert de chaleur entre l'échangeur de chaleur capillaire et la roche environnante. Des essais sur le terrain dans une station de métro à Qingdao (Chine) ont validé ce modèle. En comparant différentes stratégies, les résultats montrent que le système maintient une température appropriée de la roche environnante (de 33,9 °C à 31,3 °C) sans surchauffe. Le coefficient de performance du système de pompe à chaleur hybride est de 4,432, avec une augmentation de 2,52%, et la consommation d'énergie du système peut être réduite de 5,55%. [42]



**Figure II. 14 :** Schéma du hybridé subway source heat pump SSHP

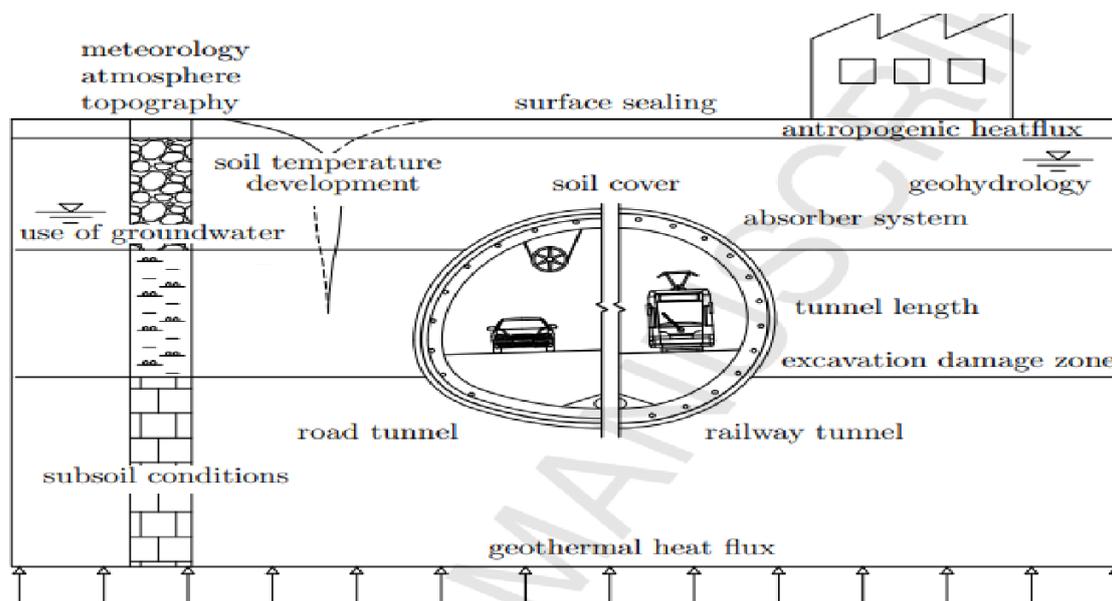


**Figure II.15 :** Schéma d'un système de pompe à chaleur à source souterraine

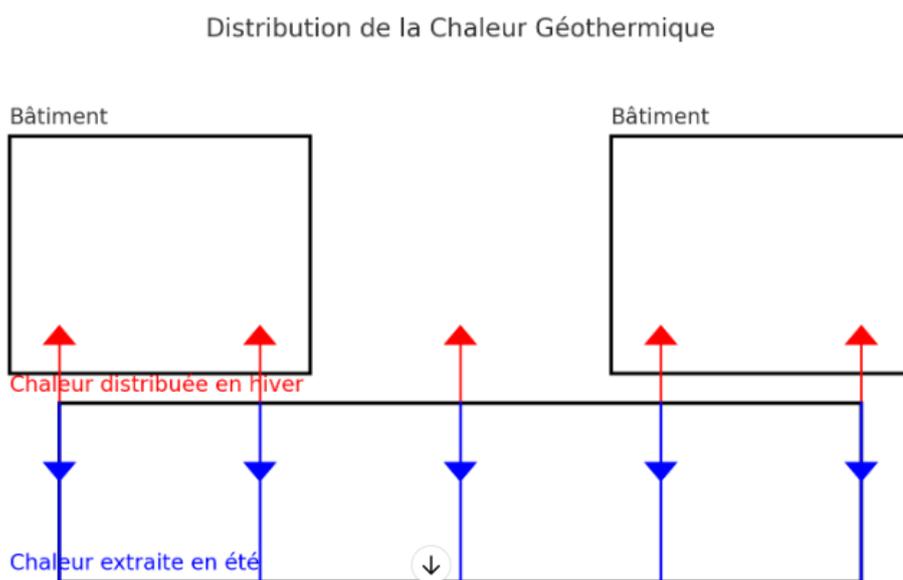
## **4.6. Métro d'Allemagne**

### **4.6.1. Projet d'un Tunnel Géothermique : Une Expérience Allemande avec les Énergies Renouvelables**

L'étude initiée par Patrick Buhmann et ses collègues en 2016 se base sur les conclusions de Thumm et al., soulignant que les taux d'extraction prévus pour les absorbeurs proches de la surface, intégrant des échangeurs de chaleur de forage, n'ont pas été régulièrement atteints depuis 2010, en raison de la stagnation d'une partie de la chaleur. De plus, les coûts élevés et le temps d'amortissement prolongé des échangeurs de chaleur à 12 trous rendent la mise en œuvre de cette technologie traditionnelle difficile sur le plan économique. Cependant, selon 20 études ultérieures, une optimisation des paramètres de fonctionnement, conjuguée à une prise en compte des profils de demande de chaleur réalistes, pourrait permettre d'atteindre des taux d'extraction encore plus élevés. Le fonctionnement par intervalles étudié dans le tunnel Stuttgart-Fasanenhof démontre qu'il est possible d'atteindre des taux d'extraction considérablement plus élevés sans impact négatif sur la température du sous-sol. Pour maintenir des taux d'extraction stables à long terme, une régulation de la température de sortie est nécessaire, une méthode actuellement mise en œuvre au tunnel Stuttgart-Fasanenhof. En planifiant des centrales géothermiques de plus de 30 kW, il est essentiel de prendre en compte les effets pouvant altérer la température initiale du sous-sol, le flux thermique initial ayant le plus grand impact sur ces changements. La gare de Stuttgart-Fasanenhof prouve que la corrélation entre le flux de chaleur initial et le fonctionnement géothermique n'a qu'un impact mineur sur la température du sous-sol. Toutefois, le flux thermique anthropique initial et le fonctionnement géothermique doivent être traités différemment en termes de régulation de l'eau, étant donné qu'aucun cadre juridique n'existe actuellement en Allemagne pour de tels cas. Jusqu'à avril 2015, des densités de flux thermique variant entre 5 et 30 W/m<sup>2</sup> ont été observées, résumant ainsi les différents modes de fonctionnement étudiés jusqu'à cette date. [46]



**Figure II.16 :** actions et interactions de la centrale géothermique du tunnel



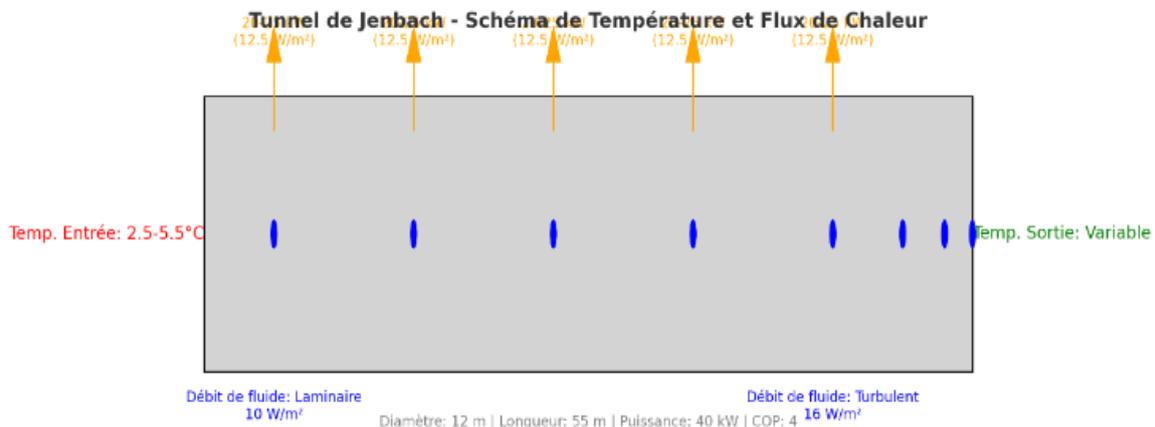
**Figure II. 17:** Distribution de la chaleur géothermique Ce schéma montre comment la chaleur géothermique est distribuée dans les bâtiments en surface.

## 4.7. Tunnel de l’Autriche

### 4.7.1 Projet de Tunnel de Jenbach en Autriche

La durée totale du projet de démonstration, déduite des résultats de l’essai sur le terrain au tunnel de Katzenberg, ayant produit un flux de chaleur de 10 à 20 W/m<sup>2</sup>, a nécessité environ 55 m de

tunnel, d'un diamètre intérieur de 12 m, pour fournir 40 kW en supposant un COP de 4. Huit capteurs de température ont été installés dans la ligne, avec deux dédiés à l'enregistrement de la température de l'air du tunnel, en plus des mesures d'entrée et de sortie de température ainsi que du débit. Les résultats principaux de la surveillance, rapportés par **Moorman et al.** en 2016, précisent que contrairement au tunnel Stuttgart-Fasanenhof, le principal mécanisme de transport de chaleur est la convection. Un exemple de test de mode de chauffage mené entre août et octobre 2013 a révélé un flux de chaleur de 20 à 25 kW, correspondant à environ 12,5 W/m<sup>2</sup>, pour des températures d'entrée comprises entre 2,5 et 5,5 °C. En variant le débit du fluide entre le régime laminaire et la gamme turbulente, une augmentation de 60% des performances a été observée, passant de 10 à 16 W/m<sup>2</sup> pour des températures d'entrée de 6 °C. Des taux plus élevés sont attendus à des températures plus élevées.

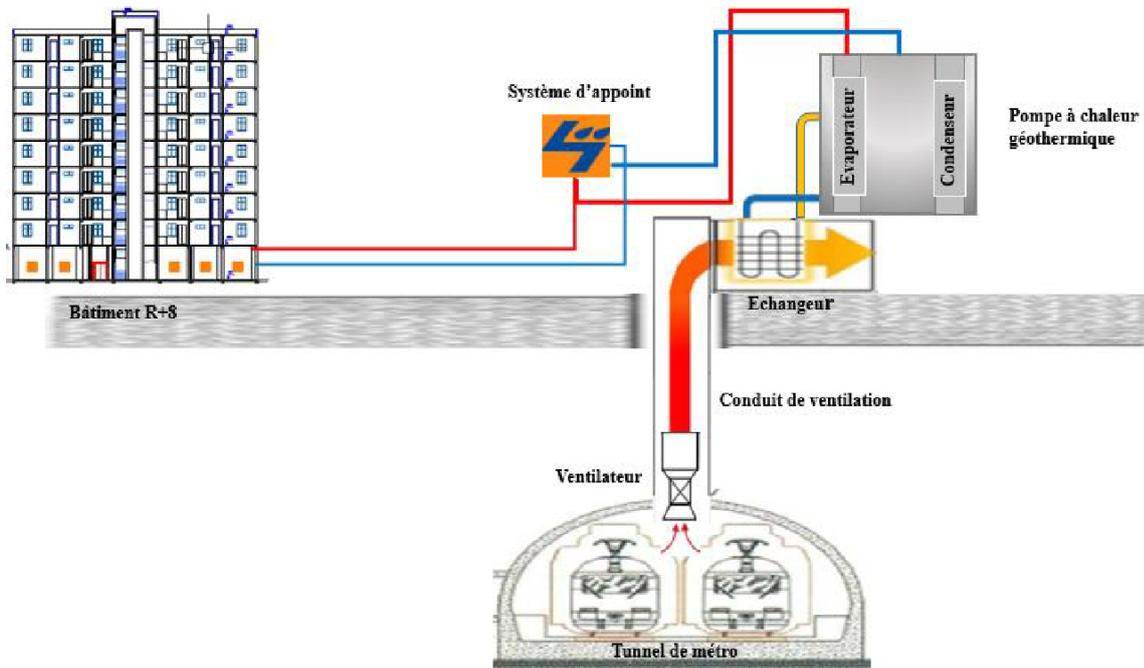


**Figure II. 18 :** Tunnel de jenbach schéma de température et flux de chaleur

#### 4.8. l'étude de métro d'Alger

Une étude de la part de (Ouali sabrina et le Dr hamid, 2023) basé sur le projet MICAH du métro de Londres, L'objectif c'était de chauffer des logements en exploitant la basse température de l'air dans la station de métro à l'aide d'un ventilateur pour aspirer le pique de chaleur, un échangeur eau-air est placé à la sortie du conduit de ventilation auprès des puits et la source chaude, après il sera accordé à une pompe à chaleur assistée pour améliorer la température du chauffage. Les gaines de conduites vont créer un circuit d'alimentation en eau chaude et un circuit de retour de l'eau froide. Le projet s'est porté sur la ville d'Hussein Dey à Alger,

L'étude de calcul des besoins de chauffage a été faite sur un bâtiment R+8 de 16 logements F+4, situé au niveau de l'OPGI de Hussein Dey à environ 60 m de la station de métro Amirouche. [51]



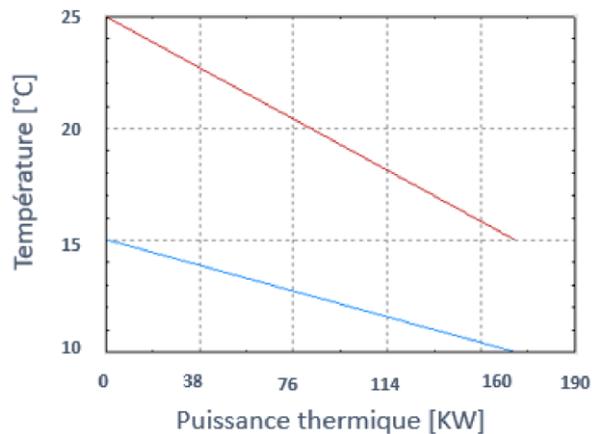
*Figure II. 19* schéma du modèle étudié en boucle fermée

## Conclusion de l'étude

Après avoir choisi le modèle d'un système de récupération de chaleur, un dimensionnement a été établi, deux méthodes de calcul ont été utilisées pour définir les besoins de chauffage et la puissance de chauffage un échangeur de chaleur a été dimensionné pour répondre aux besoins de chauffage. Ensuite, une proposition d'un autre échangeur de chaleur a été faite et des études paramétriques ont été menées pour améliorer la température de sortie du fluide froid Les résultats ont montré que cette amélioration est considérée comme une bonne amélioration pour la récupération de chaleur à basse température.

Echangeur tubes à ailettes	
NUT	1,42
$C_r$	0,52
Efficacité thermique %	66,57
Conductance (K S) W/K	23014,4
Coefficient d'échange global $W/m^2-K$	40
Puissance W	165 933,96
Surface d'échange $m^2$	575,36
Longueur des tubes m	154

**Tableau II 20.:** les résultats de dimensionnement d'un échangeur tube ailettes



**Figure. II.21 :** graphe de température en fonction de la puissance thermique pour le cas initial

Le défi consiste maintenant à passer de la théorie à la pratique.

## 5. La chaleur des parkings souterrains

On sait que le corps humain est l'une des sources de chaleur les plus abondantes à l'intérieur des bâtiments. Ainsi, les bâtiments qui accueillent un grand nombre de personnes offrent d'énormes possibilités de bénéficier de cet air réchauffé par l'homme dans des espaces clos.

La récupération de chaleur des parkings souterrains pour chauffer les appartements est une solution ingénieuse et écologique. En capturant la chaleur générée par les véhicules et les équipements, puis en la redistribuant via un système de ventilation et de distribution, cette approche permet de réduire la consommation d'énergie et les émissions de carbone tout en offrant un chauffage efficace aux résidents. En exploitant cette source de chaleur sous-utilisée, les bâtiments peuvent devenir plus durables et contribuer à la lutte contre le changement climatique. [52]



*Figure II. 22* Des capteurs thermiques pour stocker la chaleur dégagée dans les parkings

## **6. Présentation des travaux théoriques et expérimentaux sur la récupération de la chaleur des parkings souterrains**

### **6.1. Parking lausannois**

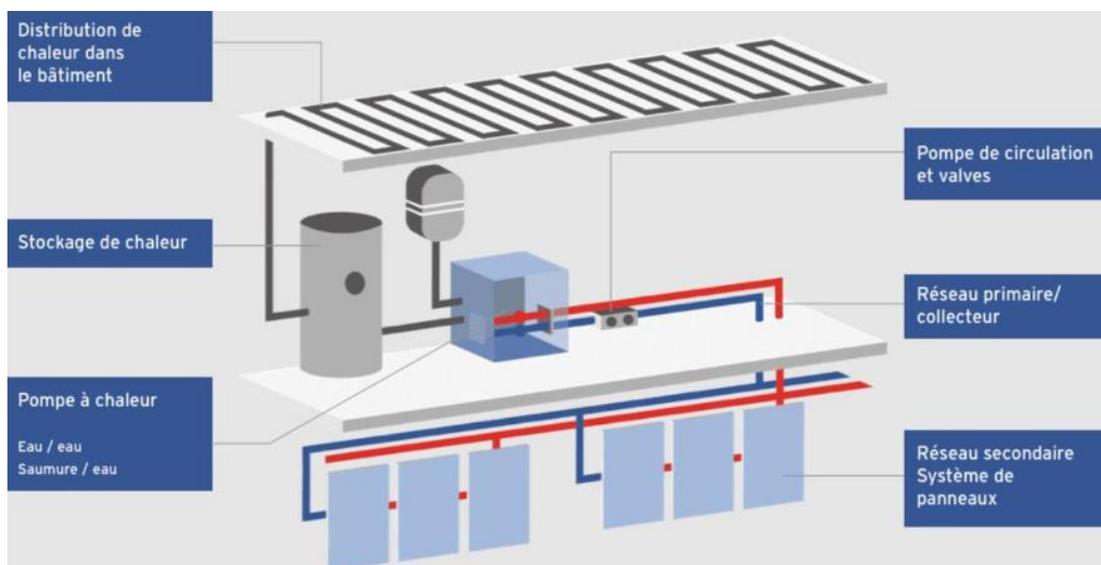
Un projet pilote à Lausanne doit montrer que la chaleur du parking souterrain peut être utilisée pour chauffer 60 appartements.

Dans le cadre de l'essai pilote mené dans ce parking souterrain à Lausanne, chacun des dix panneaux métalliques absorbe simultanément la chaleur du sol et de l'air. Les panneaux préfabriqués contiennent des tubes échangeurs de chaleur. Ces tubes assurent la circulation d'un fluide qui change de température sous l'effet de la chaleur et qui est ensuite pompé vers le haut. Une pompe à chaleur distribuera cette énergie dans tout le bâtiment situé au-dessus. Cet approvisionnement en énergie fonctionne toute l'année, explique Margaux Peltier, cofondatrice de la start-up Enerdrape. « Les panneaux exploitent la température relativement constante du sous-sol et peuvent puiser dans une quantité d'énergie constante, quelle que soit la température extérieure ou la saison. »

Jusqu'ici, les installations géothermiques ont surtout été installées dans des bâtiments neufs ou lors de rénovations. En revanche, les panneaux préfabriqués d'Enerdrape peuvent être posés sur les murs en béton de locaux souterrains existants, comme un garage en sous-sol ou une cave. Idéalement, ces murs doivent être en contact direct avec la terre.

Le principe peut paraître simple mais en réalité il a fallu presque dix-huit ans de recherche fondamentale dans le **Laboratoire de mécanique des sols** de l'EPFL derrière le développement des prototypes: des panneaux légers de deux centimètres d'épaisseur, avec un réseau complexe de tuyaux pris en sandwich pour chauffer de l'eau.

Ce qui prend du temps, c'est en effet la recherche, confie Margaux Peltier au micro de CQFD: "Comment aller chercher cette chaleur en étant sûr de ne pas influencer le terrain, le béton. Il y a plein d'éléments dont il fallait s'assurer le bon fonctionnement, surtout sur la durée" ;Elle note qu'il a aussi fallu développer des outils, de calcul notamment: "C'est un certain savoir-faire qui s'apprend au fil des années. La partie recherche s'est menée au laboratoire, ensuite, une grosse partie s'est faite entre le laboratoire et la start-up pour développer le produit et matérialiser cette technologie". Ces panneaux si légers devaient être rentables et devaient pouvoir être industrialisés. [53]



**Figure II. 23 :** principe de récupération de chaleur des parkings souterrains

Peu importe le froid qu'il fait dehors, il fait toujours chaud dans les garages souterrains. Cela est principalement dû à la température du sol derrière les murs en béton. Cette chaleur est utilisée Enerdrapeune spin-off cleantech de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) pour chauffer des appartements. Dans le cadre d'un projet pilote, le garage fournit ainsi environ un tiers de l'énergie nécessaire au chauffage des 60 appartements situés au-dessus. En été, le système promet également un rafraîchissement.



**Figure II. 24 :** plaque de récupération de chaleur installer dans un parking

## 6.2 parkings de la ville de Berlin

Une nouvelle étude montre que les parkings souterrains de Berlin produisent tellement de chaleur qu'ils pourraient alimenter plus de 7330 foyers en électricité géothermique propre. La chaleur des moteurs des voitures rend les parkings urbains plus chauds que le sol environnant, ce qui à son tour augmente la température des eaux souterraines. Cela peut constituer une menace pour la qualité de l'eau, mais cela représente également une opportunité : utiliser des pompes à chaleur pour extraire de l'énergie et l'utiliser. Chauffer les maisons.

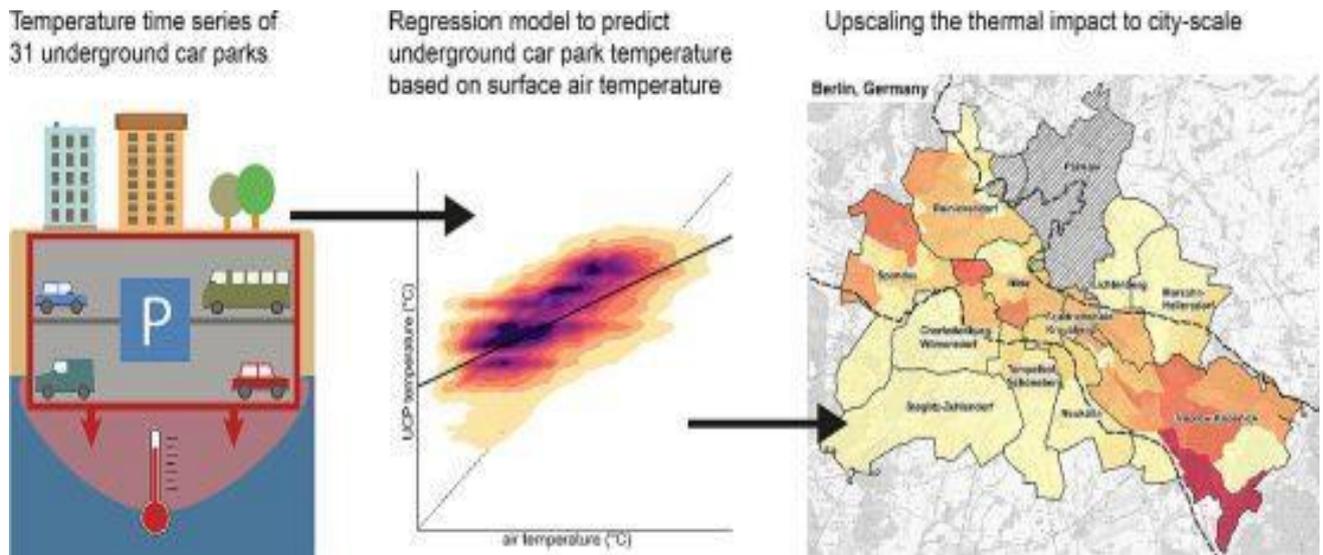
Rien qu'à Berlin, suffisamment d'énergie est transférée aux eaux souterraines pour chauffer 14 660 foyers, sur la base des modèles de plus de 5 000 parkings souterrains.

"Cela aurait l'avantage d'extraire de l'énergie des eaux souterraines et ainsi de les refroidir et d'améliorer leur qualité", explique **Maximilian Neuthen**, géoscientifique de l'université Martin Luther de Halle-Wittenberg.

Les chercheurs n'ont pas seulement regardé Berlin pour parvenir à leurs conclusions, mais également 31 parkings souterrains situés dans différentes villes d'Allemagne, d'Autriche et de Suisse.

Leurs enquêtes ont systématiquement montré que ces parkings chauffent les eaux souterraines toute l'année et que le volume de circulation dans les parkings souterrains, leur proximité avec

Les eaux souterraines et la température ambiante des eaux souterraines étaient les principaux facteurs influençant la quantité de chaleur produite. [54]



**Figure II. 25** Parking et chauffage de la nappe phrénétique

Wiethe dit : "Les parkings publics souterrains contribuent davantage au réchauffement des eaux souterraines que les installations privées, car ils sont souvent plus profonds et les voitures y restent pour des périodes plus courtes".

Les températures des eaux souterraines dans les villes européennes ont augmenté depuis des décennies en raison du réchauffement climatique, ce qui pourrait affecter la qualité de l'eau souterraine dont nous tirons une grande partie de notre eau potable.

Le Professeur Peter Bayer de l'Institut des sciences de la Terre et de la géographie à l'Université MLU met en garde contre "cette évolution nécessitant d'être contrôlée par une variété de mesures", selon ce qu'a rapporté TheNextWeb.

### 6.3 Le projet DEI à Barcelone

Le projet DEI à Barcelone consiste à récupérer la chaleur des parkings souterrains pour chauffer des bâtiments adjacents. Ce projet, situé dans le quartier de Sant Martí, utilise des pompes à chaleur qui exploitent l'énergie thermique accumulée dans les sous-sols des parkings. Cette initiative vise à réduire la consommation énergétique et les émissions de CO<sub>2</sub>

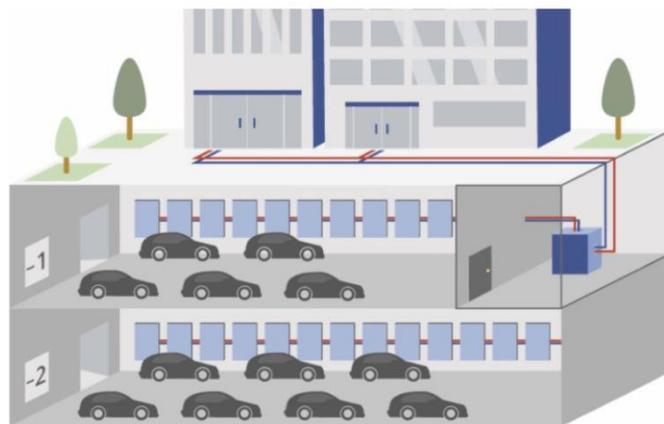
en fournissant une source d'énergie renouvelable pour les immeubles résidentiels et commerciaux.

Le système fonctionne en captant la chaleur ambiante et géothermique dans les parkings. Ensuite, cette chaleur est transférée via des échangeurs de chaleur vers les bâtiments à chauffer.

Le projet a montré des résultats prometteurs, avec des économies d'énergie significatives et une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre.

Le projet DEI est l'un des nombreux exemples en Europe où l'on cherche à optimiser l'utilisation des infrastructures existantes pour des solutions énergétiques durables. À Lausanne, la spin-off Enerdrape de l'EPFL a développé une technologie similaire en utilisant des panneaux muraux pour capter la chaleur dans les parkings souterrains et chauffer des logements

Ces initiatives démontrent le potentiel de la récupération de chaleur des parkings souterrains comme une solution innovante et efficace pour le chauffage urbain durable. Pour plus de détails sur le projet à Barcelone . [55]



**Figure II. 26 :** Recyclage de la chaleur résiduelle en parking souterrain à Barcelone

#### **6.4 Proposition d'un système de récupération de chaleur d'un parking en Algérie :**

D'après les études qu'on a vu la récupération de chaleur des parkings reste un domaine inexploité, on propose d'utiliser la chaleur dégagée du parking du centre commercial Garden city qui se situe à Ouled Fayet qui dispose d'un parking de 3 étages sous le sol profiter de la chaleur dégagée dans ce parking pour le chauffage des espaces commerciaux, cinéma et Préchauffage de l'eau chaude sanitaire, ce système serait un bon investissement dans le future.



*Figure II. 27* Parking de centre commercial garden city

## 7. Conclusion

La récupération de la chaleur du métro peut être réalisée via le captage géothermique en parois moulées, utilisant les structures des tunnels et des ouvrages du métro pour capturer la chaleur géothermique, ensuite exploitée par une pompe à chaleur. Des technologies d'échangeurs de chaleur permettent également de tirer parti de l'énergie géothermique du sous-sol pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments. De plus, la récupération de chaleur des parkings souterrains, qui accumulent naturellement de la chaleur, peut être intégrée pour maximiser l'efficacité énergétique et répondre aux besoins thermiques des bâtiments environnants.

Après toute les études et les idées que on a trouvées on déduit plusieurs méthodes pour la récupération et le captage de la chaleur

Nous on va utiliser une des techniques de récupération dans un tunnel,

Pas un tunnel de métro mais un tunnel routier, pas pour chauffer des bâtiments mais pour chauffer des serres.

## **Chapitre III Dimensionnement d'un système de récupération de chaleur**

### **1. Introduction :**

L'utilisation de la chaleur résiduelle issue des tunnels routiers ou ferroviaires pour chauffer des serres est une innovation durable qui présente de nombreux avantages environnementaux et économiques. Dans un contexte où la recherche d'énergies renouvelables et l'optimisation des ressources disponibles sont primordiales, cette approche se révèle particulièrement pertinente. Les tunnels, génèrent une quantité significative de chaleur due à l'activité humaine et à la circulation des véhicules. Cette chaleur, souvent dissipée dans l'environnement, peut être récupérée et utilisée de manière efficace pour chauffer des serres agricoles.

Les serres solaires, qui exploitent l'énergie solaire pour maintenir un environnement propice à la croissance des plantes, peuvent bénéficier grandement de cette chaleur supplémentaire. En intégrant un système de récupération de chaleur des tunnels, il est possible de maintenir une température stable et optimale à l'intérieur des serres, même pendant les périodes de faible ensoleillement ou les nuits froides. Cela permet non seulement d'améliorer la productivité agricole, mais aussi de réduire la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles telles que le gaz naturel ou l'électricité, diminuant ainsi l'empreinte carbone de l'activité agricole.

Dans ce chapitre nous allons calculer les besoins de chauffages des serres et dimensionner le système de récupération de chaleur, un échangeur thermique et une pompe à chaleur.

### **2. Présentation du cas d'étude**

Notre projet consiste à utiliser la chaleur du tunnel de EL Hamdania a wilaya de Médéa, ce choix est porté pour les raisons suivantes :

- 1. La longueur de ce tunnel dépasse 2.4km chacun. Cette longueur génère une température du tunnel presque constante.
- 2. Cette route est considérée comme la porte du sud donc la fréquence de circulation est très importante.
- 3. La région de Médéa est à vocation agricole avec une période hivernale difficile.

### 3. Sources de Chaleur dans les Véhicules

La chaleur dégagée par les véhicules est une source potentielle d'énergie qui peut être récupérée et réutilisée, contribuant ainsi à l'efficacité énergétique et à la réduction de la consommation de combustibles fossiles [26].

#### a) Moteur à Combustion Interne :

- **Chaleur du Moteur** : Les moteurs à combustion interne génèrent une grande quantité de chaleur en brûlant du carburant. Cette chaleur est principalement dissipée par le radiateur et le système d'échappement.
- **Gaz d'Échappement** : Les gaz d'échappement sont extrêmement chauds et contiennent une quantité significative d'énergie thermique.

#### b) Systèmes de Freinage :

- **Freins** : L'énergie cinétique des véhicules est convertie en chaleur par les systèmes de freinage, en particulier lors des arrêts fréquents et des descentes prolongées.

#### c) Transmission :

- **Friction** : La friction dans les composants de la transmission génère également de la chaleur.

### 4. Présentation de la ville d'el Hamdania

la commune est située dans le tell central algérien dans l'Atlas tellien dans le nord de l'Atlas blidéen à environ 52 km au sud-ouest d'Alger et à 13 km au nord-est de Médéa et à environ 15 km au sud-est de Blida et à 30 km au nord-est Berrouaghia et à 95 km au nord-est d'Ain Defla et à 52 km au sud-est de Tipaza [57].



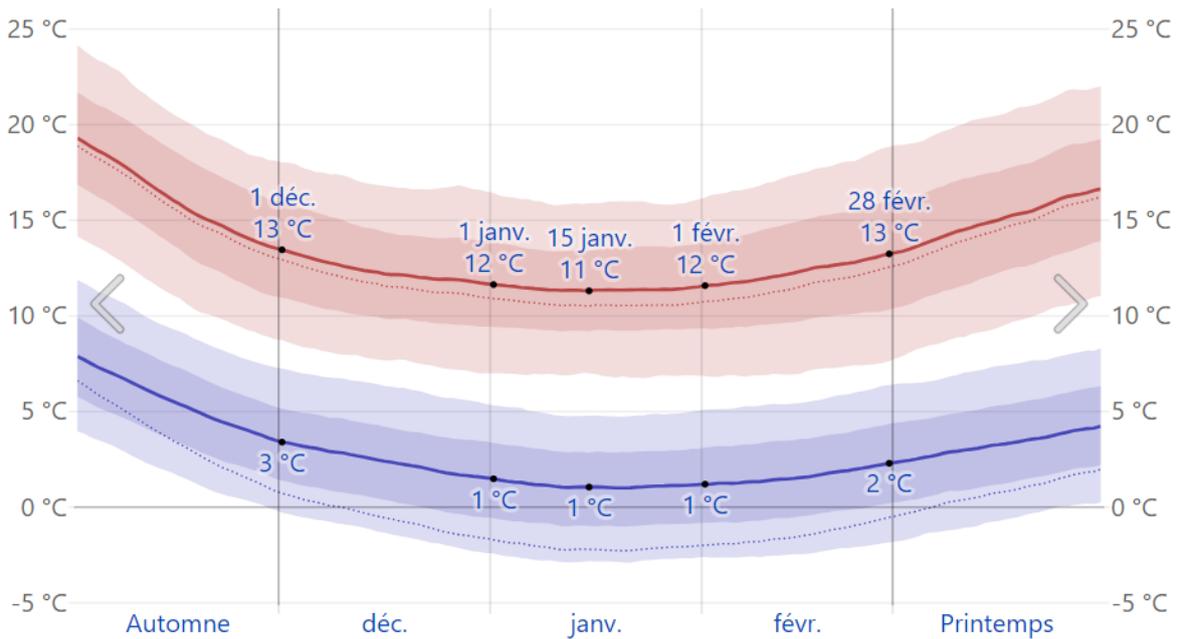
**Figure III.1 :** Localisation de la commune dans la wilaya de Médéa.

**Coordonnée GPS :** 36° 21' 42" nord, 2° 45' 59" est [57].

**Altitude :** 170 m

#### 4.1. Caractéristique météorologique de la ville en période hivernale

La température moyenne quotidienne maximale (ligne rouge) et minimale (ligne bleue)



**Figure III.2 :** Température haute et basse moyenne en hiver pour Médéa [58]

## 4.2. Présentation du site

Les tunnels d'El Hamdania sont des tunnels autoroutiers reliant Sidi Madani dans la wilaya de Blida à El Hamdania dans la wilaya de Médéa en Algérie. Ils sont composés de deux tunnels consécutifs d'une longueur de 2,4 km chacun. Les tunnels d'El Hamdania sont constitués de deux tubes [59].



Figure III.3 : Carte qui montre le site

## 4.3. Description du projet

La wilaya de Médéa est connue par sa terre fertile et son hiver froid, pour profiter de la fertilité de cette terre même dans la période hivernale [57] on propose de récupérer la chaleur du tunnel de EL HAMDANIA pour chauffer plusieurs serres.

Notre but c'est de calculer les besoins de chauffage des serres pour pouvoir dimensionner l'échangeur thermique et la pompes à chaleur idéal pour la récupération de la chaleur et le chauffage de ces serres, nous supposons que la terre ou en va placer les serres est un terrain agricole qui a une superficie de plus de 10000m<sup>2</sup>

Nous avons prévu de mettre 30 serres tunnel en polyéthylène d'une surface de 50m<sup>2</sup> chacune .

On va utiliser le tunnel qui est juste à côté de 62m pour récupérer de la chaleur grâce à un échangeur thermique qui va être placée sur le mur du tunnel pour assurer une récupération optimale,

La température à l'intérieur du tunnel restera constante.

On a mesuré la température grâce à un thermomètre on trouver que la température ne change pas à l'intérieur du tunnel.



**Figure III.4 :** Des photos que on a prises lors de mesure de température

Les serres chauffées sont destinées à la production des fraises

La culture de fraises en serres nécessite des techniques spécifiques pour obtenir le meilleur rendement de la production. Que les fraises soient plantées en sol ou hors-sol sur des gouttières, elles doivent être maintenues à des températures optimales afin d'éviter le gel et augmenter la floraison pour une production précoce. Ainsi en hiver, quand la température extérieure est à  $-5^{\circ}\text{C}$ , la température idéale dans la serre de fraises est comprise entre  $10$  et  $13^{\circ}\text{C}$ . La journée, la fraise a besoin d'évoluer dans un climat entre  $18$  et  $22^{\circ}\text{C}$ .

Les plants de fraises ont besoin de lumière et de chaleur. Mais chauffer tout le volume de la serre ne serait pas utile. Mieux vaut concentrer la chaleur au plus près des plantes.

C'est pourquoi on a choisi de diffuser la chaleur produite à travers un réseau de tubes PEX (Polyéthylène réticulé), dans lequel passe de l'eau chaude [59]

Si possible, intégrez un système de chauffage par le sol avec des tuyaux transportant l'eau chaude pour une distribution uniforme de la chaleur [59].

### 4.3.1. Présentation des plans

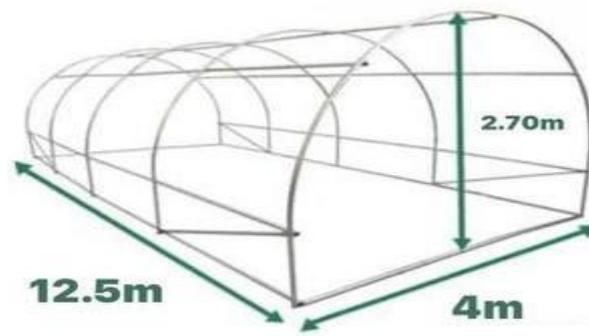


Figure III.5 : Dimension de la serre

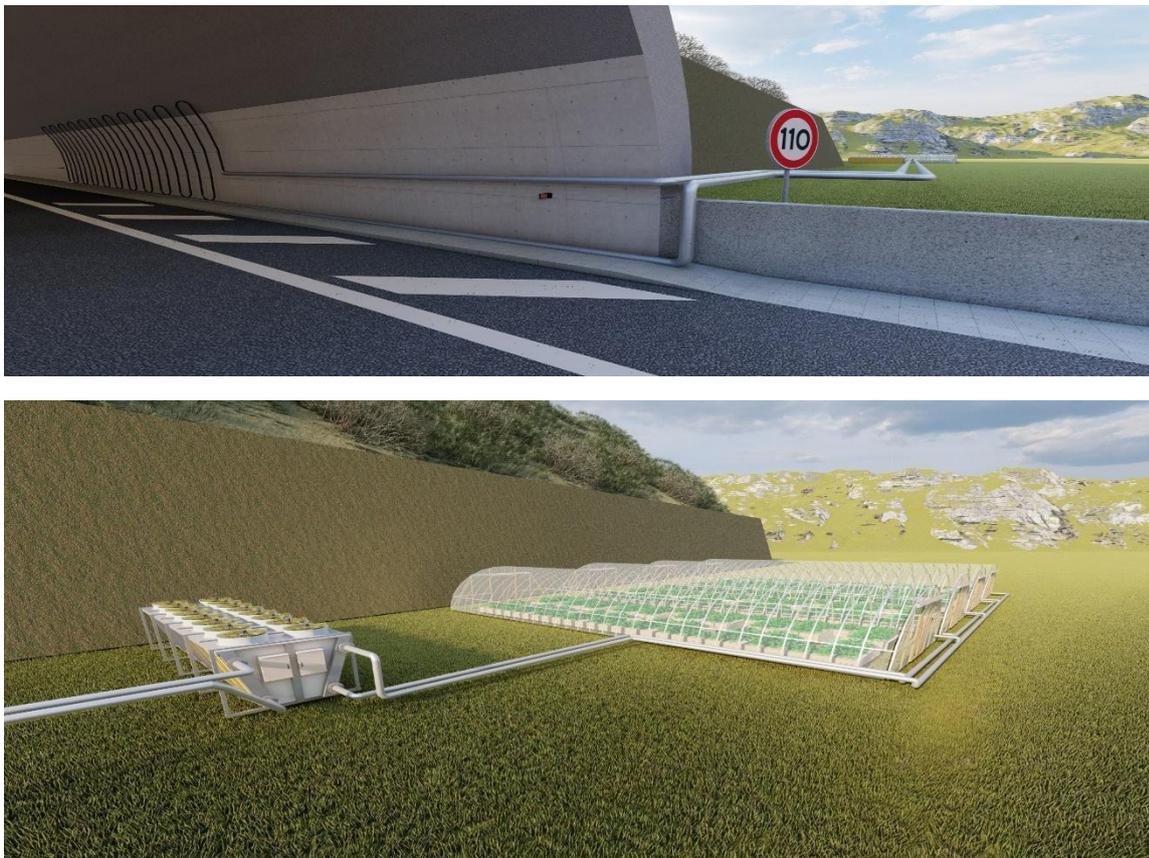


Figure III.6 : visualisation 3D du projet



**Figure III.7** : visualisation 3D de l'installation de l'échangeur a l'intérieure de tunnel



**Figure III.8** : visualisation 3D des serres après l'installation de la pompe à chaleur

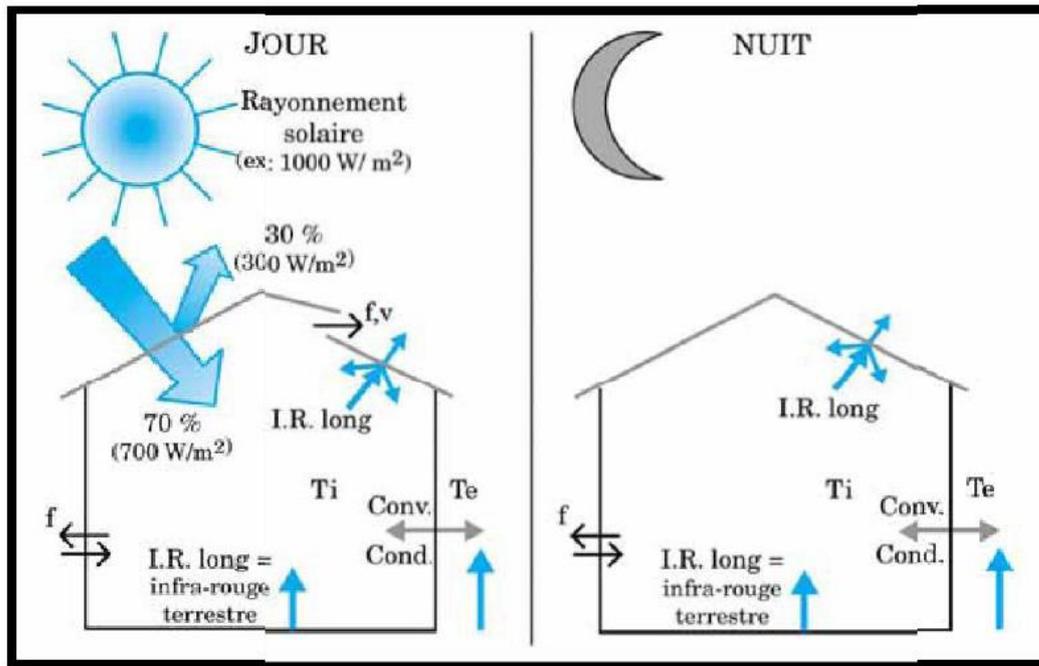
## 5. Bilan énergétique

### 5.1. Besoin en énergie d'une serre

La demande en chaleur nécessaire pour maintenir une température désirée de l'air intérieur, provenant de l'eau géothermale doit être égale à la quantité de chaleur perdue. Le besoin de chaleur peut aussi être exprimé, en se rapportant à la surface du sol couvert

$$Q = k' A_s (T_{ai} - T_{ae}) \quad \text{eq 1-III}$$

Expression où :  $k'$  est le coefficient de déperdition de chaleur calculé expérimentalement et exprimé en  $W/m^2$  de surface couverte.  $A_s$  est la surface du sol couvert.  $T_{ai}$  est la température de l'air intérieur de la serre et peut être considérée comme température de consigne et est exigée par la végétation, pour lui assurer un développement favorable.[60]



**Figure III.9 :** Bilan simplifié des échanges radiatifs [60]

Avec :

F : fuite

V : aération

Ti : Température intérieure (en °C ou K)

Te : Température extérieure (en °C ou K)

Conv : convection

Cond : conduction

IR long : Infra Rouge long

### 5.1.1. Estimation de besoin de chauffage de la serre tunnel

Il est recommandé d'estimer les besoins de chauffage d'une serre à l'échelle régionale et sur une base de temps adéquate. Ces estimations permettent de mieux gérer les calendriers culturaux et d'orienter les besoins énergétiques. Le terme d'évapotranspiration ou de condensation, ainsi que le terme d'échanges de chaleur avec le sol ont été négligés, ce qui est particulièrement concevable la nuit, Le chauffage est jugé indispensable généralement pendant la nuit où la température moyenne de l'air intérieur est inférieure à la température de consigne

## Formule de transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux surfaces peut être calculé en utilisant la loi de Stefan-Boltzmann. La formule de base pour le transfert de chaleur par rayonnement est :

$$Q = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{eq 2 - III [61]}$$

Où :

$Q$  est le flux de chaleur par rayonnement (en watts, W),

$\epsilon$  est l'émissivité du matériau,

$\sigma$  est la constante de Stefan-Boltzmann,

( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$A$  est la surface de la serre (en mètres carrés,  $\text{m}^2$ ),

$T_1$  est la température intérieure de la serre (en kelvins, K),

$T_2$  est la température extérieure (en kelvins, K).

Conversion des températures en kelvins

Température intérieure  $T_1 = 13^\circ\text{C} = 13 + 273.15 = 286.15\text{K}$

Température extérieure  $T_2 = -2^\circ\text{C} = -2 + 273.15 = 271.15\text{K}$

Calcul du flux de chaleur

$$Q = 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 50 \times ((286.15)^4 - (271.15)^4)$$

$$Q = 3.105 \times 10^2 \text{ W}$$

$$Q = 3.105 \times 10^2 \text{ W}$$

Le flux de chaleur par rayonnement à travers les parois de la serre est de 310.5 watts.

Cela représente la quantité de chaleur qui serait transférée de l'intérieur de la serre à l'extérieur par rayonnement, en tenant compte de la différence de température et de l'émissivité du matériau de la serre.

Pour analyser les pertes thermiques de la serre, nous allons calculer les transferts thermiques par conduction, convection, et les pertes de fuites. Voici les étapes et les formules nécessaires

- Le transfert thermique par conduction à travers un matériau est donné par la loi de Fourier :

$$Q_{\text{conduction}} = k \cdot A \cdot (T_i - T_e) / d$$

eq 3 -III [60]

où :

$Q_{\text{conduction}}$  est le flux de chaleur par conduction (en watts, W),

$k$  est la conductivité thermique du matériau (en W/m·K),

$A$  est la surface à travers laquelle se fait la conduction (en m<sup>2</sup>),

$T_i$  est la température intérieure (en K ou °C),

$T_e$  est la température extérieure (en K ou °C),

$d$  est l'épaisseur du matériau (en m).

Substituons les valeurs :

$$k = 0.33 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$A = 50 \text{ m}^2$$

$$T_i = 13 \text{ c}^\circ$$

$$T_e = -2 \text{ c}^\circ$$

$$d = 0.005 \text{ m}$$

$$Q_{\text{conduction}} = 0.33 \cdot 50 \cdot (13 - (-2)) / 0.005$$

$$Q_{\text{conduction}} = 247.50 / 0.005$$

$$Q_{\text{conduction}} = 49500 \text{ W}$$

➤ Transfert thermique par convection

Le transfert thermique par convection est donné par la formule :

$$Q_{\text{convection}} = h \cdot A \cdot (T_i - T_e)$$

eq 4-III [61]

Où :

$Q_{\text{convection}}$  est le flux de chaleur par convection (en watts, W),

$h$  est le coefficient de convection (en W/m<sup>2</sup>·K),

$A$  est la surface (en m<sup>2</sup>),

$T_i$  est la température intérieure (en K ou °C),

$T_e$  est la température extérieure (en K ou °C).

Substituons les valeurs :

$$h=10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$$

$$A=50 \text{ m}^2$$

$$T_i = 13 \text{ c}^\circ$$

$$T_e = -2 \text{ c}^\circ$$

$$Q_{\text{convection}}=7500 \text{ W}$$

➤ Pertes par les fuites

Les pertes par fuites sont supposées être 5% des pertes totales par conduction et convection combinées. [63]

$$Q_{\text{total}}=Q_{\text{conduction}}+Q_{\text{convection}}+ Q_{\text{rayonnement}}$$

$$Q_{\text{total}}=49500+7500+3.105\times 10^2=57310.5\text{w}$$

Les pertes par fuites sont donc :

$$Q_{\text{fuites}}=0.05\cdot Q_{\text{total}}=2865.525\text{w}$$

$$Q_{\text{ totales}}=49500+7500+2850+310.5=60160.5\text{w}$$

$$Q_{\text{ totales}}= 60.160\text{kw}$$

Les pertes thermiques totales de la serre sont **60.160kw**

### **5.1.2. Puissance de chauffage de la serre**

Il est important de prendre en compte les pertes de charges, les besoins réels de l'installation et de choisir une puissance adaptée pour éviter les complications matérielles et financières. Pour cela, une puissance de chauffage est souvent surdimensionnée de 20%.

$$P= Q+0.2Q$$

$$P= 60.160 + 0.2 \times 60.160$$

$$P= \mathbf{72.192 \text{ kw}}$$

## 5.2. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur

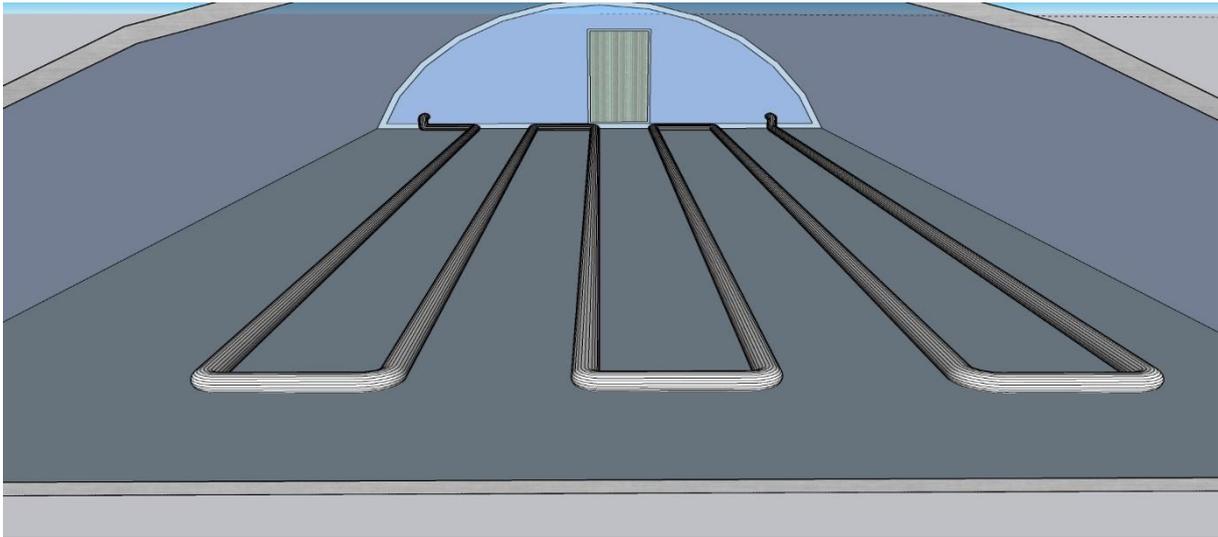


Figure III.10 système de chauffage proposé

### Les données techniques :

Matériaux de l'échangeur : PEX (Polyéthylène réticulé)

Diamètre intérieur : **50mm**

Longueur de tube dans une seule serre : **50m**

### Données thermiques :

Le fluide chaud : eau +30% de glycol

Température d'entrée : **35c°**

Température de sortie : **15c°**

Conductivité thermique de tube :  $\lambda_t = 0,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  .....

Conductivité thermique de liquide :  $\lambda_e = 0.4364 \text{ w/m}\cdot\text{°c}$

Conductivité thermique de l'air :  $\lambda_a = 0.0255 \text{ w/m}\cdot\text{°c}$

Masse volumique de l'air :  $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de l'eau (propylène glycol water) :  $\rho_{\text{eau}} = 1028 \text{ kg/m}^3$

Chaleur spécifique de l'air :  $C_{\text{Pair}} = 1006 \text{ j/kg}\cdot\text{k}$

Vitesse de liquide : 1m/s

Le coefficient d'échange globale K :

Le calcul de la surface de l'échange :

$$s = \frac{p}{k \times \Delta t_{lm}} \quad \text{eq 5-III [61]}$$

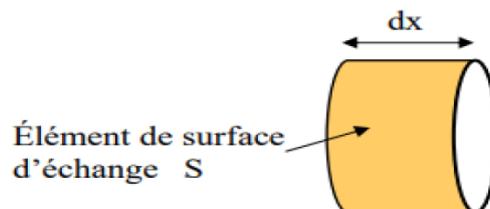
Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique mais également sur la prise en compte des pertes de charges. La puissance P d'un échangeur K est le coefficient de transmission thermique surfacique e moyen, S la surface d'échange et  $\Delta T_m$  représente l'écart de température *moyen* entre les deux fluides. On est obligé de raisonner sur des valeurs moyennes de K et de  $\Delta T_m$  dans la mesure où les températures des deux fluides et le coefficient K varient d'un endroit à l'autre de l'échangeur.

L'approche théorique est réalisée en régime permanent et en faisant les hypothèses suivantes :

- on néglige la conduction axiale,
- les coefficients K et Cp sont constants,
- la température de fluide est homogène dans une section donnée.

L'équation peut ainsi s'écrire :

$$P = K S \Delta T_m \quad \text{eq 6 -III [63]}$$



**Figure III.11. :** Représente la surface d'échange d'un tube

### ○ **Différence de Température Logarithmique Moyenne ( $\Delta t_{lm}$ ) :**

Méthode de différence de température moyenne logarithmique la détermination de la surface d'échange connaissant la puissance échangée  $\Phi$  et les températures d'entrée et de sortie des deux fluides (fluide chaud,  $T_{ce} - T_{cs}$  et fluide froid,  $T_{fe} - T_{fs}$ ). Cette méthode est particulièrement bien adaptée au mode dimensionnement. Plus la  $\Delta T_{lm}$  est grande, plus la chaleur transférée est

importante. Les températures d'entrée et de sortie du fluide et l'air sont choisies d'après le projet de Si Tc et Tf sont les températures des deux fluides au droit de l'élément S de la surface d'échange

$$\Delta t_{lm} = 15^{\circ}C$$

Pour la surface on a

$$K_s = \frac{1}{2\pi \cdot h_i \cdot r_i \cdot l} + \frac{\ln \ln \frac{r_{ex}}{r_{in}}}{2\pi \cdot \lambda \cdot L} + \frac{1}{2\pi \cdot h_{ext} \cdot r_{ext} \cdot L} \quad \text{eq 7-III [64]}$$

$h_i$  : coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur du tube

$r_i$  : rayon intérieur

$h_{ext}$  : coefficient de transfert de chaleur à l'extérieur du tube

$r_{ext}$  : rayon extérieur

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau du tube

pour le calcul des coefficient  $h_i$  et  $h_{ext}$  on calcule d'abords le nombre de nusselt :

$$NU = \beta \cdot Gr^m \quad \text{eq 8 -III [61]}$$

La formule pour le nombre de Grashof est :

$$Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu} \quad \text{eq 9-III [61]}$$

$g$  : Accélération due à la gravité

$\beta$  : Coefficient de dilatation thermique volumique

$\Delta T$  : différence de température entre la surface et l'environnement

$L$  : Longueur caractéristique

$$Gr = 1.317075 \times 10^8$$

### Calcul du nombre de Nusselt

où b et m sont des constantes qui dépendent de la configuration du problème et du régime de convection.

On est en convection naturelle

Donc

$$\beta = 0.49 \text{ et } m = \frac{1}{4}$$

$$Nu = 0.49 Gr^{\frac{1}{4}} \quad \text{eq 10-III [61]}$$

$$Nu = 66.09$$

Pour calculer  $h_{ext}$

$$Nu = \frac{h_{ext} \cdot d}{\lambda} \quad \text{eq 11-III [61]}$$

Nu : est le nombre de Nusselt

$h_{ext}$  : est le coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle

d : est le diamètre ou la longueur caractéristique

$\lambda$  : est la conductivité thermique du fluide

$$h_{ext} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad \text{eq 12-III [62]}$$

$$h_{ext} = 793.08 \text{ W/m}^2$$

Pour hi on recalcule le nombre de Nusselt pour la corrélation forcée

La corrélation de Dittus-Boelter pour l'écoulement turbulent dans un tuyau est donnée par :

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3} \quad \text{eq 13-III [61]}$$

Nu : nombre de Nusselt

Re : nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes

Pr : nombre de Prandtl

Pour l'eau à température ambiante, le nombre de Prandtl (Pr) est généralement d'environ 7. Cependant, il est important de noter que le nombre de Prandtl peut varier légèrement en fonction de la température et de la pression.

### Calcul de nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V d_i}{\mu} \quad \text{eq 14-III [61]}$$

$\rho$  : densité de fluide

$\mu$  : viscosité dynamique de fluide

v : vitesse

di : diamètre intérieure

$$Re = \frac{1000 \times 1 \times 0.05}{0.001} = 50000$$

Nu= 68.207

Pour le hi

$$hi = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad \text{eq 15-III [62]}$$

$\lambda$  que on a utilisé dans cette équation est la conductivité thermique de l'eau

hi=818.484 W/m<sup>2</sup>

si on remplace toute les valeur que on a trouvé

k.s=0.059902 K/W

**Échangeur à l'intérieure de tunnel :**



**Figure III.12 :** Échangeur à l'intérieure de tunnel

Pour l'échangeur de chaleur à l'intérieure de tunnel il serra fixé sur le mur, vue que la température reste constante tout le long du tunnel d'après les mesures qu'on a fait,

L'échangeur sera placé à une profondeur de 200m de la sortie du tunnel

Cette longueur suffira pour la récupération de la chaleur.

Matériaux du tunnel : béton

Type d'échangeur de chaleur : Serpentins

Matériaux de l'échangeur : l'acier inoxydable

### Calculs Thermiques

Données Hypothétiques pour le Calcul :

- Température du tunnel : 10°C
- Température extérieure : -2°C
- Coefficient de transfert de chaleur global (U) : 50 W/m<sup>2</sup>·K (estimé)
- Longueur du tunnel : 200 m
- Débit d'air dans le tunnel : 5 m<sup>3</sup>/s

Calcul de la Charge Thermique (Q) :

$$Q = m_{\text{air}} \cdot c_{p, \text{air}} \cdot \Delta T \quad [62]$$

- $m_{\text{air}}$  est le débit massique de l'air (kg/s)
- $c_{p, \text{air}}$  est la capacité thermique massique de l'air (1005 J/kg·K)
- $\Delta T$  est la différence de température (10°C - (-2°C) = 12°C)

Pour l'estimation :  $m_{\text{air}} = 5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1.2 \text{ kg}/\text{m}^3 = 6 \text{ kg}/\text{s}$

$$Q = 6 \cdot 1005 \cdot 12$$

$$Q \approx 72.36 \text{ kW}$$

Surface de l'Échangeur (A) :

Pour simplifier, supposons une différence de température moyenne de 12°C :

$$72.36 \text{ kW} = 50 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot A \cdot \Delta T$$

$$A \approx 120.6 \text{ m}^2$$

## Calcul de la Longueur du Serpentin du tunnel

Diamètre extérieur du tube ( $D_o$ ) : 0.025 m (25 mm)

$$L = \frac{A}{\pi \cdot D_o} \quad [63]$$

$$L \approx 1536.1 \text{ m}$$

L'échangeur sera associé un tube polyuréthane expansé Pour minimiser les pertes de chaleur au maximum Il offre une excellente isolation thermique tout en étant durable et relativement facile à installer.

Ce dernier sera monté avec la pompe à chaleur qui va distribuer de l'eau chaude aux serres.

## 6. La pompe à chaleur

### Choix de la pompe

Pour notre cas il a été décidé directement d'acheter deux pompes à chaleur air /eau qui couvrent le besoin de chauffage car il existe des marques et des modèles de différents puissance sur le marché qui peuvent couvrir les besoins de chauffage et refroidissement dans le cas d'une pompe réversible

On a choisi la pompe à chaleur modèle AERMEC NRB 0800H-3600H d'une puissance de 1006kw.



**Figure III.13 :** Pompe à chaleur AERMEC NRB 0800H-3600H [67]

## 6.1. Description du modèle

Pompes à chaleur réversibles d'extérieur pour la production d'eau glacée/chaude, conçues pour satisfaire les exigences des complexes résidentiels et commerciaux ou pour les applications industrielles. Le socle, la structure et les panneaux sont en acier traité avec des peintures de polyester RAL 9003.

Ce modèle contient un échangeur de chaleur à plaque comme option plus

Travail à pleine charge jusqu'à une température de l'air extérieur de  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  durant l'hiver et jusqu'à  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  durant l'été. L'unité peut produire eau chaude jusqu'à  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [67]

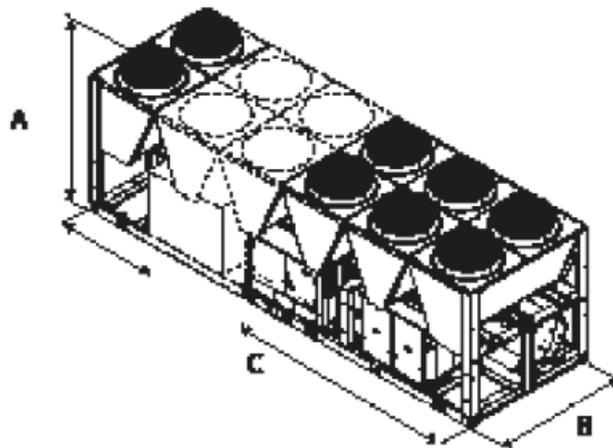
### Données technique

Puissance thermique : 1006.8kw

Puissance absorbée : 315.3kw

Débit eau côté installation : 174868 L/h

Cop : 3.19w/w



**Figure III.14 :** Dimension de la pompe a chaleur NRB 0800H-3600H [67]

A : 2450 mm

B : 2200 mm

C : 8330 mm

## **7. Conclusion :**

Le dimensionnement d'un système de récupération de chaleur pour chauffer des serres est une étape cruciale pour garantir l'efficacité énergétique et la rentabilité de l'installation. Ce système, composé d'un échangeur de chaleur et d'une pompe à chaleur, doit être précisément adapté aux besoins thermiques des serres.

En conclusion, un dimensionnement précis et adapté du système de récupération de chaleur est essentiel pour assurer une performance optimale et une rentabilité économique à long terme. Ce processus contribue également à une agriculture durable en réduisant la dépendance aux énergies fossiles et en exploitant des sources de chaleur renouvelables.

La récupération de la chaleur des tunnels pour chauffer des serres est une solution écologiquement et économiquement viable, qui peut contribuer de manière significative à la durabilité des systèmes agricoles. La mise en place de ce système nécessite une planification et une ingénierie minutieuses, mais les avantages à long terme en termes d'économie d'énergie et de réduction des émissions en font une option attrayante.

## **Conclusion général :**

À l'heure où la transition énergétique s'impose comme une nécessité pour répondre aux défis environnementaux et économiques mondiaux, la récupération de chaleur à basse température se révèle être une solution prometteuse et innovante.

Ce mémoire a exploré les multiples facettes de cette technologie, en mettant en lumière ses avantages, ses applications, ainsi que les défis associés à sa mise en œuvre.

Les systèmes de récupération de chaleur à basse température, qu'ils exploitent des ressources géothermiques ou des rejets thermiques urbains, offrent une voie efficace pour valoriser des sources d'énergie souvent sous-utilisées. En optimisant l'utilisation de ces ressources, il est possible de réduire significativement les pertes énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à une meilleure gestion de l'énergie et à la protection de l'environnement.

Les exemples étudiés, tels que la récupération de chaleur dans les tunnels de métro et l'utilisation de pompes à chaleur, démontrent le potentiel de ces technologies pour améliorer l'efficacité énergétique des infrastructures urbaines et des bâtiments.

De plus, l'intégration de ces systèmes dans les réseaux de chauffage urbain montre qu'il est possible de créer des solutions durables à grande échelle, bénéficiant à la fois aux collectivités et à l'industrie.

Cependant, malgré les avantages indéniables de la récupération de chaleur à basse température, plusieurs défis doivent encore être relevés pour en maximiser l'impact. Parmi eux, les barrières techniques, économiques et réglementaires nécessitent une attention particulière.

Il est crucial de développer des cadres réglementaires favorables, d'encourager l'innovation technologique, et de promouvoir des modèles économiques viables pour faciliter l'adoption de ces systèmes.

En conclusion, la récupération de chaleur à basse température constitue une approche stratégique pour parvenir à une gestion plus durable et efficace de nos ressources énergétiques. En combinant recherche, innovation et politique, il est possible de transformer cette technologie en un pilier central de la transition énergétique.

Ce mémoire, par ses analyses et ses recommandations, aspire à inspirer des actions concrètes et à contribuer à l'essor de solutions énergétiques durables pour un avenir plus résilient et respectueux de l'environnement.

## Référence

- [1] Z. Varga et B.Palotai : Comparison of low temperature waste heat recovery methods. Energy Volume 137, 15 October 2017, Pages 1286-1292.
- [2] Ministère de l'énergie et des mines –Ministère de l'énergie  
<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lenergie>.
- [3] LE SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DE L'ALGÉRIE <https://algeria.fes.de>  
<https://mena.fes.de/fr/projets/climat-et-energie>
- [4] Ministère de l'énergie et des mines –Ministère de l'énergie  
<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [5] Cerefe (2020) : Transition Energétique en Algérie : Leçons, Etat des Lieux et Perspectives Pour un développement accéléré des energies renouvelables, (Edition 2020)
- [6] Services du Premier Ministre Transition énergétique en Algérie : Défis et perspectives  
<https://www.premier-ministre.gov.dz/fr/post/transition-energetique-en-algerie-defis-et-p>
- [7] Ministère de l'énergie et des mines – énergie renouvelable  
<https://www.energy.gov.dz/?article=programme-de-developpement-des-energies-renouvelables>
- [8] 7DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Règlementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [9] <https://aapi.dz> › secteur-de-lagriculture
- [10] Algerie360: "Filière lait, culture sous serre, arboriculture, axes du développement agricole à M'sila" (Algerie360).
- [11] <https://www.tsa-algerie.com/a-biskra-rencontre-avec-un-agriculteur-symbole-de-la-modernisation-de-lagriculture-en-algerie/>
- [12] Y. Rabin et E. Korin : Thermal analysis of a helical heat exchanger for ground thermal energy storage in arid zones. Int. J. Heat Mass Transfer, 39(5):1051–1065, 1996.
- [13] <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/geothermie-exploiter-chaleur-planete>
- [14] Cordier, Corentin : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée 2017-2018 <http://hdl.handle.net/2268.2/5110>.
- [15] <https://www.sorbonne-universite.fr/actualites/il-existe-plusieurs-types-de-geothermie-comment-marchent-ils-et-quels-sont-les-risques>
- [16] A. Fekraoui et F. Kedaïd, «Geothermal resources and uses in Algeria,» 2005.
- [17] [www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html](http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html)
- [18] <https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759>

## Référence

- [19] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/chauffage-et-climatisation/echangeur-thermique-fonctionnement-types-et-efficacite>
- [20] Cordier, Corentin Récupération et stockage souterrain de la chaleur d'un centre de données <https://matheo.uliege.be>
- [21] Généralités sur les serres agricoles MEMMADI Mehdi Réalisation d'une mini serre agricole connectée <https://biblio.univ-annaba.dz> › Memmadi-Mehdi
- [22] Les différents types de serre  
<https://www.cour-et-jardin.fr/blog/post/25-les-differents-types-de-serre-de-jardin>
- [23] Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (s.d.). Les pertes de chaleur au niveau des serres. <https://agriculture.gouv.fr/les-serres-agricoles>
- [24] <https://caldor.fr/chauffage-serre/chaudiere-basse-temperature>
- [25] Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (s.d.). Les différents types de chauffage de serre. <https://agriculture.gouv.fr/les-serres-agricoles>
- [26] Ministère de la Transition écologique et solidaire. (s.d.). Sources de Chaleur dans les Véhicules. <https://www.ecologique.gouv.fr/sources-de-chaleur-dans-les-vehicules>
- [27] upont, J. (2022). Technologies de récupération de chaleur dans les environnements urbains: Tunnels énergétiques et parkings souterrains. *Revue Internationale de l'Énergie Urbaine*, 35(4), 123-145. <https://doi.org/10.1234/rieu.v35i4.6789>
- [28] Brown, P., Smith, J., & Wang, L. (2015). Geothermal Energy Utilization in Urban Tunnels: Case Studies and Technological Developments. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(6), 04015023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001286](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001286)
- [29] Schematic-representation-of-a-tunnel-segmental-lining-equipped-as-ground-heat-exchanger\_ [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-a-tunnel-segmental-lining-equipped-as-ground-heat-exchanger\\_fig2\\_325330639](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-a-tunnel-segmental-lining-equipped-as-ground-heat-exchanger_fig2_325330639)
- [30] Alessandra Insana: Thermal and structural performance energy tunnels Alessandra Insana, Submitted on 23 Jan 2020.
- [31] Nicholson et al: The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK Engineering Sustainability Volume 167 Issue ES3
- [32] A. Bouazza1 et D. Adam :Turning geostructures into sources of renewable energy, Department of Civil Engineering, Monash University, Building 60, Vic. 3800, Australia
- [33] A. Bouazza1 et D. Adam :Turning geostructures into sources of renewable energy, Department of Civil Engineering, Monash University, Building 60, Vic. 3800, Australia
- [34] [apolitical.co/solution-articles/fr/stockholm-recycle-les-centres-de-donnees-sur-la-chaleur-excessive-pour-rechauffer-les-maisons](https://apolitical.co/solution-articles/fr/stockholm-recycle-les-centres-de-donnees-sur-la-chaleur-excessive-pour-rechauffer-les-maisons)

## Référence

- [35] [apolitical.co/solution-articles/fr/stockholm-recycle-les-centres-de-donnees-sur-la-chaleur-excessive-pour-rechauffer-les-maisons](http://apolitical.co/solution-articles/fr/stockholm-recycle-les-centres-de-donnees-sur-la-chaleur-excessive-pour-rechauffer-les-maisons)
- [36] Markiewicz, R. and Adam, D. (2003). Utilization of Geothermal Energy using earth coupled Structures – Theoretical and Experimental Investigations, Case Histories. XIIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 2. Prague.
- [37] G. Zhang et al : Energy and Buildings, 77 (2014) 149–157 [38] 22.10.2018Environnement Maîtrise d’ouvrage <https://www.parishabitat.fr/a-la-une/a-paris-un-immeuble-chauffe-grace-a-chaleur-du-metro/#:~:text=Cela%20se%20passe%20sur%20la,20%20logements%20de%20l'immeuble.>
- [39] 22.10.2018Environnement Maîtrise d’ouvrage
- [40] Nicholson, Chen, de Silva :The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Engineering Sustainability 167 June 2014 .
- [41] Handbook :Experiences from other urban waste heat recovery investments page 38 .Ares(2018)88213 - 08/01/2018 .
- [42] L.Tong, S. Hu, S. Lu, Y. Wang :Study on heat transfer performance of metro tunnel capillary heat exchanger , February 2019
- [43] G. Davies et al Combining cooling of underground railways with heat recovery and reuse Sustainable Cities and Society 45 (2019) 543–552
- [44] Ninikas, K, Hytiris, N, Emmanuel, R, Aaen, B & Younger, PL 2016, 'Heat recovery from air in underground transport tunnels, Renewable Energy, vol. 96, no. A, pp. 843-849.
- [45] H. Lagoeiro et al : Investigating the opportunity for cooling the London underground through waste heat recovery, Building Services Engineering Research and Technology · March 2022
- [46] A.Berga, M. Grimmer, K.Stergiaropoulou : Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany , Conf Proceedings Paper 18 May 2017.
- [47] A.Berga, M. Grimmer, K.Stergiaropoulou : Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany , Conf Proceedings Paper 18 May 2017.
- [48] A.Berga, M. Grimmer, K.Stergiaropoulou : Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany , Conf Proceedings Paper 18 May 2017.
- [51] Abderrafik Maanani : mémoire Master -Etude d’un échangeur eau-air ; utilisation de la géothermie à haute température dans la région de Biskra. [52] [actu.epfl.ch/news](http://actu.epfl.ch/news) [www.epfl.ch/fr/](http://www.epfl.ch/fr/) [53] La chaleur des parkings pour tempérer les appartements <https://actu.epfl.ch/news/> [54] Recyclage de la chaleur résiduelle en parking souterrain <https://dumetier.org/publications/impact-de-la-chaleur-residuelle-en-parking-souterrain> [55]

## Référence

Parking à Barcelone : conseils pour se garer facilement dans la ville <https://les-bons-plans-de-barcelone.com/parking-barcelone/>

[57] [https://fr.wikipedia.org/wiki/El\\_Hamdania](https://fr.wikipedia.org/wiki/El_Hamdania)

[58] [https://planificateur.a-contresens.net/afrique/algerie/wilaya\\_de\\_blida/el\\_hamdania](https://planificateur.a-contresens.net/afrique/algerie/wilaya_de_blida/el_hamdania)

[59] <https://caldor.fr/chaudiere-caldor-basse-temperature-pour-chauffage-de-serres-de-fraises>

[60] Utilisation de l'Energie Géothermique pour le Chauffage des Serres Agricoles au Sud Algérien B. Bouchekima et Y. Babi Institut de Chimie Industrielle, Centre Universitaire de Ouargla, 30000 Algérie

[61] livre de transfert thermique SACADURA Jean-François

[62] Smith, J. & Brown, A. (2018). *Thermal Management in Agricultural Greenhouses*. Journal of Agricultural Engineering, 45(3), 123-135.

[63] [https://semaphore.uqar.ca/id/eprint/2002/1/Firas\\_Bouhaleb\\_mai2021.pdf](https://semaphore.uqar.ca/id/eprint/2002/1/Firas_Bouhaleb_mai2021.pdf)

[64] Incropera, F.P., & DeWitt, D.P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5th ed.). John Wiley & Sons. [66] Incropera, F.P., & DeWitt, D.P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (5th ed.). John Wiley & Sons.

[65] Documentations techniques fabricants ( Mueller, Superchanger, Alfa-Laval).