

République Algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Blida-1

Faculté de Technologie

**Département des Energies Renouvelables**



**Mémoire présenté pour l'obtention d'obtention du diplôme de  
Master**

**Option : Habitat bioclimatique**

Thème :

**Récupération de la chaleur de métro pour chauffer des logements  
à Alger**

Par :

OUALI Sabrina Tassadit

Soutenue devant les jurys composés par :

Mme. Samy Sabrina	MRB	USDB1	Président
Mr. Lafri Djamel	MCB	USDB1	Examineur
Mr. Boukenoui Rachid	MCB	USDB1	Examineur
Mr. AEK HAMID	Pr	USDB1	Promoteur
Mme.Oukaci Soumia	Dr	USDB1	Co-Promotrice

**Année universitaire : 2022 /2023**



## ملخص

يعد استرداد الحرارة المنخفضة حلاً مبتكراً سيساعد في تقليل استهلاك الطاقة. الحل هو تصميم منشأة لاستعادة الحرارة باستخدام مروحة ومبادل حراري ومضخة حرارية. علينا حساب احتياجات التدفئة لمبنى قريب من محطة المترو واستخدمت طريقتان للحساب لتحديد احتياجات التدفئة وطاقة التدفئة، وفقاً لـ DTR وباستخدام برنامج Pleiades، تم تحديد حجم مبادل من الحرارة إلى تلبية احتياجات التدفئة وفقاً لنموذج MICAH. بعد ذلك، تم تقديم اقتراح لمبادل حراري آخر وكانت هناك حاجة لدراسات بارامترية لتحسين درجة حرارة مخرج السائل البارد. أظهرت النتائج انخفاض قطر مقطع أنابيب المائع البارد إلى 0.231 م لمعدل تدفق مكافئ قدره 36 كجم / ثانية، ودرجات حرارة مدخل ومخرج السائل الساخن (27 درجة مئوية، 15 درجة مئوية). على التوالي وإضافة 23 ٪ من المحلول الملحي إلى السائل البارد سمح لنا بالحصول على درجة حرارة مخرج سائل بارد (17.42 درجة مئوية). يعتبر هذا التحسين تحسناً جيداً لاستعادة الحرارة المنخفضة. يمكن أن تشمل المعلومات التي تم النظر فيها الخصائص الفيزيائية الحرارية للسوائل، وفرق درجة الحرارة الذي تخضع له السوائل، وسطح التبادل للمبادل، وكفاءة المبادل.

**الكلمات المفتاحية:** حرارة النفق، استرداد الحرارة، نموذج MICAH، المبادل الحراري، حرارة الكبح بالمترو، الاختيار التكنولوجي، متطلبات التدفئة، التحجيم، المضخة الحرارية، المباني

## Résumé

La récupération de chaleur à basse température est une solution innovante qui va contribuer à diminuer la consommation énergétique. La solution est de concevoir une installation de récupération de la chaleur à l'aide d'un ventilateur, échangeur de chaleur et d'une pompe à chaleur. Nous proposons de calculer les besoins de chauffage d'un bâtiment proche de la station de métro et deux méthodes de calcul ont été utilisées pour définir les besoins de chauffage et la puissance de chauffage, selon le DTR et sous le logiciel Pléiades, un échangeur de chaleur a été dimensionné pour répondre aux besoins de chauffage selon le modèle de MICAH. 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 la diminution du diamètre de la section des tubes de fluide froid à 0,231m pour un débit équivalent de 36 kg/s, des températures d'entrée et de sortie du fluide chaud de (27°C ,15°C) respectivement et en ajoutant 23% de la saumure au fluide froid nous a permis d'avoir une température de sortie du fluide froide (17,42°C). Cette amélioration est considérée comme une bonne amélioration pour la récupération de chaleur à basse température. Les paramètres étudiés peuvent inclure les propriétés thermo physiques des fluides, l'écart de température que subissent les fluides, la surface d'échange de l'échangeur, l'efficacité de l'échangeur.

**Mots clés :** la chaleur des tunnels, récupération de la chaleur, modèle de MICAH, échangeur de chaleur, chaleur de freinage de métro, choix technologique, besoins de chauffage, dimensionnement, pompe à chaleur, Bâtiments.

## Abstract

Low-temperature heat recovery is an innovative solution that will help reduce energy consumption. The solution is to design a heat recovery installation using a fan, heat exchanger and a heat pump. We propose to calculate the heating needs of a building close to the metro station, two calculation methods have been used to define the heating needs, and the heating power, according to the DTR and under the Pleiades software, a heat exchanger has been dimensioned to meet the heating needs according to the MICAH model. Then, a proposal for another heat exchanger was made and parametric studies were carried out to improve the outlet temperature of the cold fluid. The results showed that the reduction of the diameter of the cross-section of the cold fluid tubes to 0.231m for an equivalent flow rate of 36 kg/s, the inlet and outlet temperatures of the hot fluid of (27 °C., 15 °C.) respectively and by adding 23% of the brine to the cold fluid allowed us to have a cold fluid outlet temperature (17.42 °C.). This improvement is considered a good improvement for low-temperature heat recovery. The parameters studied can include the thermophysical properties of the fluids, the temperature difference that the fluids undergo, the exchange surface of the exchanger, the efficiency of the exchanger.

**Keywords:** tunnel heat, heat recovery, MICAH model, heat exchanger, metro braking heat, technological choice, heating requirements, sizing, heat pump, buildings.

## Remerciements

*Je remercie Dieu tout puissant pour m'avoir donné de la force et du courage pour accomplir ce travail modéré.*

*J'exprime ma gratitude, mes remerciements à mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé le long de mon cursus pédagogique, que dieu les protège.*

*Au terme de ce travail, je tiens à témoigner ma profonde gratitude à Pr Abdelkader Hamid pour avoir accepté de m'encadrer dans cette étude.*

*Je le remercie pour son suivi et pour le temps qu'il a consacré et aussi pour les précieuses informations qu'il m'a prodiguées avec intérêt et compréhension tout au long de ce travail, par la même occasion, merci à ma co-promotrice Mme Oukaci Soumia pour sa disponibilité, ses réponses à mes nombreuses questions et pour la maîtrise du logiciel.*

*Aussi je remercie Monsieur Zrawlia qui m'a pris en charge à l'APRUE.*

*Merci aux membres de jury d'avoir bien voulu examiner et juger ce travail.*

*Je remercie tous les enseignants professeur ainsi les doctorants du département pour leurs précieux apports tout au long de ma préparation de mon mémoire.*

*J'adresse mes remerciements à l'Administration de mon département pour les informations fournies.*

*Finalement, je remercie tous mes chers ami(e)s et collègues qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de ce travail.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ma chère mère, mon cher père et mes deux frères Hamza et Sofiane pour leurs sacrifices, leurs présences à mes coté et leurs soutient à qui je leurs souhaite une longue vie pleine de bonheur et de santé.*

*Mes amies Meriem, Racha, Fati, Yasmine, Nesrine pour les bons moments qu'on a passé ensembles, à qui je leurs souhaite que le bonheur et que dieu béni notre amitié.*

*Qu'ils trouvent ici tous l'expression de mon éternelle reconnaissance et de ma profonde affection*

## Tableau de matières

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Tableau de matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction Générale.....	1
<b>Chapitre I Bibliographie et contexte de l'étude</b>	
1. Introduction .....	2
2. La transition énergétique .....	2
2.1. Les valorisations des transitions énergétiques .....	3
a) Investissements dans les technologies vertes .....	3
b) Sensibilisation et formation.....	3
c) Défis à relever.....	3
3. L'efficacité énergétique .....	4
3.1. Cadre réglementaire .....	6
3.1.1. Secteur du bâtiment .....	6
3.2. Besoins énergétiques des bâtiments récents .....	6
4. Récupération de chaleur résiduelle .....	7
5. Géothermie .....	8
5.1. Définition .....	8
5.2. Classification .....	9
5.3 L'utilisation de ressources géothermiques en Algérie : .....	11
6. Pompe à chaleur.....	12
6.1. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur.....	12
6.2. Les modes de fonctionnement de la pompe à chaleur.....	14
a) Le mode monovalent .....	14
b) Le mode bivalent .....	15
7. Conclusion .....	15
<b>Chapitre II Energie des tunnels et la chaleur des métros</b>	
1. Introduction .....	16
2. Energie des tunnels .....	16



2.1.	Activation thermique des revêtements de tunnel .....	17
2.2.	Comportement thermique des Tunnels .....	20
3.	La chaleur des métros .....	22
4.	Présentation des travaux théoriques et expérimentaux sur la récupération de la chaleur des tunnels de metro .....	23
4.1.	Métro du Royaume-Uni .....	23
4.2.	Métro de chine.....	30
4.3.	Métro d'Allemagne .....	36
4.4.	Métro de l'Italie.....	39
4.5.	Tunnel de l'Autriche .....	43
4.6.	Tunnel de métro de la Pologne.....	45
5.	Conclusion .....	46
<b>Chapitre III Dimensionnement d'un système de récupération de chaleur</b>		
1.	Introduction .....	47
2.	Etude thermique du Bâtiment .....	47
2.1.	Présentation du cas d'étude .....	47
2.1.1.	Présentation de la ville.....	47
2.1.1.1.	Données climatiques de la ville de Blida.....	48
2.1.1.2.	Caractéristiques météorologiques de la ville en période hivernale .....	48
2.1.2.	Présentation du site .....	49
2.1.3.	Description du bâtiment.....	49
2.1.3.1.	Présentation des plans .....	50
2.1.3.2.	Constitution des parois Horizontales et verticale .....	51
2.2.	La vérification thermique réglementaire .....	52
2.2.1.	Période Hivernale .....	53
2.3.	Le calcul des déperditions thermiques .....	53
2.4.	Puissance de chauffage à installer .....	54
2.4.1.	Puissances de chauffage calculé avec le DTR.....	54
2.4.2.	La puissance de chauffage calculé avec pléiades .....	54
2.5.	Amélioration thermique du bâtiment .....	57
3.	Dimensionnement .....	58
3.1.	Description du modèle étudié.....	58
3.2.	Le dimensionnement de chaque élément du système.....	58
3.2.1.	Puissance de chauffage du bâtiment.....	58
3.2.2.	Ventilateur .....	59

3.2.3.	Echangeur .....	59
3.2.3.1.	Echangeur tube à ailettes .....	59
3.2.4.	Echangeur à plaques .....	62
3.3.	Logiciel Echtherm : .....	66
3.3.1.	L'effet de la température .....	66
3.3.2.	L'effet du fluide frigorigène .....	66
3.3.3.	L'effet du débit massique du fluide froid .....	67
4.	la pompe à chaleur .....	69
4.1.	Le choix de la pompe à chaleur .....	69
4.2.	Description du model .....	69
5.	Métro d'Alger en Algérie .....	70
5.1.	Description de la ligne et station de métro d'Alger.....	70
6.	Conclusion .....	71

#### **Chapitre IV Résultats et discussion**

1.	Introduction .....	72
2.	Partie 01 .....	72
2.1.	Etude thermique du bâtiment .....	72
2.1.1.	La vérification de la conformité thermique du bâtiment selon la réglementation Algérienne .....	72
2.1.2.	La puissance de chauffage : .....	72
3.	Partie 02.....	74
3.1.	Dimensionnement de l'échangeur de chaleur .....	74
3.2.	Etude paramétriques .....	75
3.2.1.	L'effet de la température .....	75
3.2.2.	L'effet du fluide caloporteur.....	76
3.2.3.	L'effet du débit massique .....	77
3.2.4.	Le cas idéal .....	78
4.	Conclusion .....	78
	Conclusion Générale .....	80
	Références .....	81

## Liste des figures

<b>Figure I. 1:</b> consommation Energétique Finale de l'Algérie année 2021 (Ministère d'énergie 2022).....	4
<b>Figure I. 2:</b> Label énergétique européen .....	4
<b>Figure I. 3:</b> Profils simplifiés de température (T) - charge (Q) de la source de chaleur résiduelle et besoin de l'utilisateur .....	8
<b>Figure I. 4 :</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].....	10
<b>Figure I. 5:</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)[15] .....	11
<b>Figure I. 6:</b> Schéma du cycle de compression de vapeur et diagramme pression-enthalpie (Naicker, 2015) [19].....	12
<b>Figure III. 1:</b> situation de la ville dans la Wilaya d'Alger .....	47
<b>Figure III. 2:</b> Classification de la ville d'Hussein Dey (Alger) selon la classification thermique du DTR.....	48
<b>Figure III. 3:</b> OPGI cité Amirouche Hussein Dey .....	49
<b>Figure III. 4:</b> plan de la toiture.....	50
<b>Figure III. 5:</b> plan de tous les étages .....	50
<b>Figure III. 6:</b> plan du rez- de- chaussée .....	51
<b>Figure III. 7:</b> Organigramme de méthodologie de simulation sous pléiades .....	55
<b>Figure III. 8:</b> scénario d'occupation.....	55
<b>Figure III. 9:</b> scénario d'occupation.....	56
<b>Figure III. 10:</b> température de chauffage à 20°C .....	56
<b>Figure III. 11:</b> la puissance dissipée .....	57
<b>Figure III. 12:</b> schéma du modèle à étudié en boucle fermé.....	58
<b>Figure III. 13:</b> échangeur tube à ailettes .....	59
<b>Figure III. 14:</b> Abaques pour déterminer l'efficacité de l'échangeur $E=f(Nut, Configuration de l'écoulement)$ . [50] .....	62
<b>Figure III. 15:</b> échangeur à plaques .....	62
<b>Figure III. 16:</b> la deuxième fenêtre pour les données d'entrée sur le logiciel Echtherm.....	68
<b>Figure III. 17:</b> la composition de la pompe à chaleur Weishaupt W 180 ID [53]. .....	69
<b>Figure III. 18:</b> Courbes caractéristiques WWP W 180 ID [53]. .....	70



## Liste des tableaux

<b>Tableau I. 1:</b> Classification des ressources géothermiques [3].	9
<b>Tableau II. 1:</b> Variations saisonnières de la température de l'air dans le réseau de métro [34]	27
<b>Tableau II. 2:</b> Les performances mesurées (étude expérimentale) [45]	41
<b>Tableau II. 3:</b> échange de chaleur prévu à partir de l'activation thermique du prolongement nord-est de la ligne 2 du métro de varsovie [48]	45
<b>Tableau III. 1:</b> classification de la ville de Hussein Dey	48
<b>Tableau III. 2:</b> caractéristiques climatiques de la région d'Alger	48
<b>Tableau III. 3:</b> les résistances thermiques des parois	51
<b>Tableau III. 4:</b> les coefficients en fonction de la zone A et les surfaces des différentes parois du logement [9]	53
<b>Tableau III. 5:</b> La première fenêtre pour les données d'entrée sur le logiciel Echtherm	68
<b>Tableau IV. 1:</b> les déperditions totales et les déperditions de référence d'un appartement du dernier étage	72
<b>Tableau IV. 2:</b> les déperditions totales et les déperditions de référence d'un appartement du premier étage	72
<b>Tableau IV. 3:</b> les déperditions et la puissance de chauffage totale du bâtiment R+8	72
<b>Tableau IV. 4:</b> les besoins de chauffage et la puissance de chauffage totale du bâtiment R+8 sur pléiades en utilisant le béton lourd	73
<b>Tableau IV. 5:</b> les besoins de chauffage et la puissance de chauffage totale du bâtiment R+8 sur pléiades après l'amélioration en utilisant le béton cellulaire	73
<b>Tableau IV. 6:</b> les résultats de dimensionnement d'un échangeur tube ailettes	74
<b>Tableau IV. 7:</b> les résultats de dimensionnement d'un échangeur à plaques	74

## **Nomenclature**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Introduction Générale**

L'ère actuelle représente un point de décision critique dans lequel l'humanité considère les effets négatifs des choix énergétiques passés. Pour faire la différence et façonner notre avenir énergétique, nous devons accélérer la transition vers le zéro carbone et les ressources renouvelables.

L'énergie géothermique et les émissions de chaleur peuvent apporter une contribution significative à cette situation. Ces dernières années, des développements technologiques innovants et performants ont été réalisés pour capter la chaleur de la Terre enfouie dans les couches peu profondes, notamment les structures énergétiques et géologiques des tunnels de métro.

De nombreuses études ont déjà porté sur les performances énergétiques et structurelles de la récupération de chaleur des pieux, des murs énergétiques et des tunnels de métro, mais elles ne sont pas encore utilisées en Algérie. Pour relever ce défi, cette étude porte sur des études théoriques et numériques de tunnels énergétiques avec échangeurs de chaleur et pompes à chaleur afin d'obtenir des estimations pour leur application pratique dans la rénovation du métro d'Alger.

L'objectif de ce mémoire est de dimensionner un système de récupération de chaleur dans la station de métro, en choisissant un modèle et une technologie adaptés aux projets qui sont déjà réalisés dans certains pays.

Le mémoire se compose de 4 chapitres, le premier aborde le contexte général de la transition énergétique, de la géothermie et de la récupération de chaleur résiduelle, en se concentrant principalement sur les aspects technologiques tels que la pompe à chaleur et les échangeurs thermiques. Le chapitre 2 présente plusieurs études de cas sur la récupération de chaleur des tunnels en général et de la chaleur de métro en particulier. Le chapitre 3 se concentre sur les explorations numériques, telles que le calcul des besoins de chauffage d'un immeuble à Hussein Dey près de la station de métro à l'aide du DTR Algérien et du logiciel Pléiades. La conformité du bâtiment est également examinée, puis l'échangeur est dimensionné et une pompe à chaleur est choisie pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment. Le chapitre 4 concerne la présentation et la discussion des résultats.



## Chapitre I Bibliographie et contexte de l'étude

### 1. Introduction

Actuellement, la réduction de la consommation d'énergie devient l'un des facteurs clés pour la concurrence en se dirigeant vers la transition énergétique et l'Algérie fait partie, car les législations à adopter pour réduire les émissions de gaz à effet de serre deviennent plus strictes partout dans le monde. De plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique se traduit également par une augmentation de la rentabilité [1]. Les méthodes de récupération de chaleur ont été appliquées de manière routinière il y a longtemps, mais la pratique générale d'utilisation du contenu énergétique des flux à basse température inférieure à 150 °C n'a pas encore été élaborée [2]. Malgré le 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 quelle été adopté par certain pays depuis 1980. Le chauffage et le refroidissement représentent environ la moitié de l'énergie consommée dans l'Union européenne (chaleur Feuille de route Europe1). Dans ce contexte, la géothermie peu profonde devient de plus en plus attractive, étant donné qu'elle est accessible partout dans le monde (en dessous de 10-15 m jusqu'à 400 m de profondeur). Aujourd'hui, l'utilisation de cette énergie est commune à de nombreux pays. Généralement, la chaleur est extraite du sol et aussi par la chaleur des métros pour le chauffage domestique ou pour produire de l'eau chaude par boucle ouverte ou fermée systèmes. Par conséquent, il peut potentiellement contribuer à réduire le carbone de chauffage et de refroidissement empreint écologique, entraînant des avantages environnementaux importants (Commission européenne, 2016).

### 2. La transition énergétique

La transition énergétique est un processus qui consiste à passer d'une économie basée sur les énergies fossiles à une économie basée sur les énergies renouvelables et l'énergie décarbonée.

En Algérie, la transition énergétique est un sujet important car le pays dépend fortement des exportations de pétrole et de gaz pour son économie. Le gouvernement algérien a récemment pris des mesures pour encourager la transition énergétique en investissant dans les énergies renouvelables et en adoptant des politiques visant à réduire la consommation d'énergie de 10% d'ici 2030 [3]. Cependant, il reste encore beaucoup à faire pour atteindre les objectifs fixés.

L'analyse montre que l'Algérie a déjà franchi les premiers pas d'une transition vers les énergies renouvelables. Selon le modèle de phases Middle East and North Africa (MENA), [4] l'Algérie peut être classée comme entrant dans la phase « Décollage des ER ». Néanmoins, les énergies fossiles jouent toujours un rôle dominant dans le secteur énergétique algérien et dans l'économie en général. Pour accompagner le décollage des énergies renouvelables, un soutien fort est donc nécessaire à tous les niveaux. Ce n'est qu'alors que les conditions-cadres nécessaires pourront être créées pour encourager la participation et attirer

les investissements du secteur privé. Pour cela, il convient de développer une stratégie énergétique à long terme qui prend en compte le potentiel des énergies renouvelables pour accompagner une transformation efficace de l'approvisionnement énergétique algérien et permettre une transition en douceur. Avec les efforts mondiaux de décarbonisation en cours et l'évolution attendue de la demande des consommateurs du monde entier en faveur des carburants durables, l'Algérie serait bien avisée de s'engager le plus tôt possible sur une voie durable pour saisir les opportunités économiques et éviter les effets de verrouillage technologique et les investissements bloqués dans le secteur des combustibles fossiles. Les résultats de l'analyse selon le modèle de la phase de transition vers une énergie 100% renouvelable visent à stimuler et à soutenir la discussion sur le futur système énergétique de l'Algérie en fournissant une vision d'orientation globale pour la transition énergétique et le développement de politiques appropriées [4].

## **2.1. Les valorisations des transitions énergétiques**

### **a) Investissements dans les technologies vertes**

L'Algérie encourage les investissements dans les technologies vertes, notamment l'énergie solaire et éolienne, pour réduire sa dépendance aux combustibles [5].

Des projets tels que le parc éolien de Tlemcen, qui produira 60 MW d'énergie renouvelable, sont en cours de développement grâce à des partenariats public-privé et à des financements internationaux.

### **b) Sensibilisation et formation**

La sensibilisation du public et la formation des professionnels sont essentielles pour promouvoir l'efficacité énergétique en Algérie. Des programmes de formation ont été mis en place pour aider les ingénieurs et les architectes à concevoir des bâtiments économes en énergie, tandis que des campagnes de sensibilisation sont organisées pour encourager les comportements économes en énergie chez les particuliers et les entreprises.

### **c) Défis à relever**

Malgré les progrès réalisés, l'Algérie doit encore relever plusieurs défis pour améliorer son efficacité énergétique. Cela comprend la modernisation de son réseau électrique vieillissant, l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les secteurs industriels et de transport, et la réduction de la consommation d'énergie dans les foyers et les entreprises.

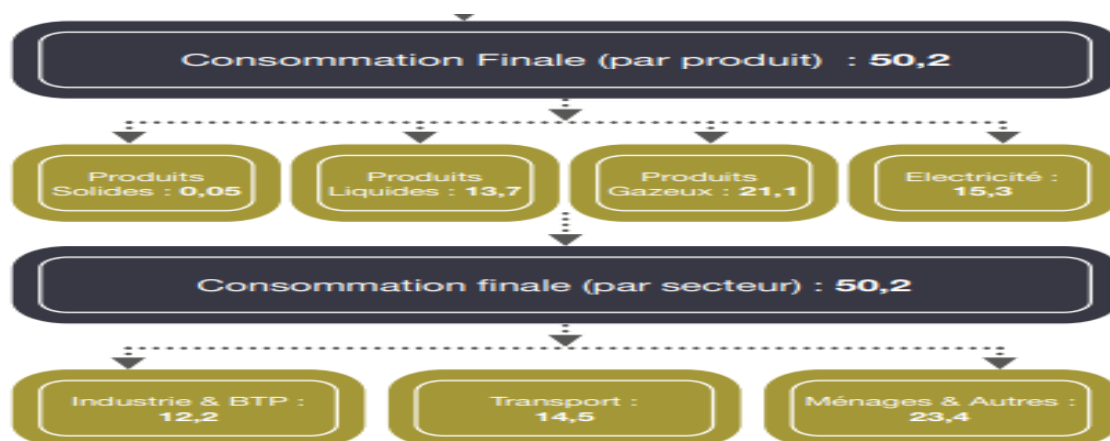


Figure I. 1: consommation Energétique Finale de l'Algérie année 2021 (Ministère d'énergie 2022)

### 3. L'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est un concept important dans la gestion de l'énergie aujourd'hui. Elle consiste à utiliser l'énergie de manière efficace pour réduire les coûts et minimiser les impacts environnementaux.

L'efficacité énergétique peut être améliorée grâce à des technologies innovantes, des pratiques de gestion intelligente de l'énergie et une sensibilisation accrue à l'utilisation de l'énergie [6].

Le certificat énergétique est un document officiel portant sur la performance énergétique d'un bâtiment (délivré en Europe mais pas encore en Algérie). Il est quantifié en kWh par m<sup>2</sup> par an (la consommation du bâtiment est exprimée en kilowattheure par mètre carré par an). Ce chiffre est complété d'un label, afin de visualiser facilement cette performance.

Avec une valeur d'énergie consommée = 156,36 kWh/m<sup>2</sup>.an, l'habitat est classé à la D (voir schéma du label européen), moyen mais reste énergivore, des solutions existent pour élever le niveau énergétique.

En moyenne, l'habitat en Algérie se situe à la D voir (figure 2), en consommant plus que 151 kWh/an pour le chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire



Figure I. 2: Label énergétique européen

et éclairage [7].

### **3.1. Cadre réglementaire**

Le gouvernement algérien a mis en place un cadre réglementaire pour encourager l'efficacité énergétique, y compris des normes de performance énergétique pour les bâtiments et les équipements électriques.

Le ministère de l'Energie et des Mines a également créé une agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) pour aider à coordonner les efforts en matière d'efficacité énergétique.

#### **3.1.1. Secteur du bâtiment**

Visions et grands objectifs de l'État qui vise à atteindre les objectifs de la politique d'efficacité énergétique par la mise en œuvre des actions et projets du Programme National de Maîtrise d'Énergie (PNME) à l'horizon 2030, adopté par le gouvernement qui vise la réduction de la consommation de l'énergie et la préservation des ressources naturelles du pays. La préservation de l'environnement passe par la réduction de l'effet des gaz à effet de serre sur la planète et l'atténuation des effets du changement climatique. L'Etat veille également à l'impact sur l'économie nationale en matière de création de richesse et d'emploi [7].

Aujourd'hui, les bâtiments jouent un rôle très important dans la dépense énergétique. Pour cela nous devons réfléchir aux procédés qui permettront la réduction de cette dépense énergétique. Plusieurs paramètres agissent sur le comportement thermique du bâtiment dont la forme, l'orientation, ses éléments constructifs et les aménagements intérieurs. Pour plus de confort, on a recours à une surconsommation d'énergie, donc il faudrait d'abord améliorer le bâtiment afin de réduire la demande en chauffage et en rafraîchissement puis bien réfléchir sur la composition des parois de l'enveloppe, la compacité du volume chauffé, l'emplacement, l'orientation et le type de vitrages. Des solutions existent pour aboutir à un habitat basse consommation énergétique. En guise d'illustration, on peut citer : - Meilleure isolation de l'enveloppe qui fera diminuer la dépense énergétique de chauffage et de rafraîchissement, - Utilisation des énergies renouvelables dans les équipements de chauffage et de rafraîchissement des bâtiments.

### **3.2. Besoins énergétiques des bâtiments récents**

Les systèmes sur pompes à chaleur s'inscrivent dans la logique de réduction des consommations énergétiques, et contribuent ainsi à remplir les objectifs fixés par les réglementations thermiques. Il ne s'agit pas de diminuer l'énergie finale fournie au bâtiment, mais l'énergie primaire permettant de répondre à ces besoins (cf. partie 1.2), en faisant appel à une ressource locale et renouvelable. L'installation de telles machines thermiques n' nécessite toutefois un dimensionnement cohérent, moins aisé à obtenir que pour d'autres systèmes plus classiques, dans lesquels la question du surdimensionnement se pose de façon moindre. Pierre Tittlein rappelle dans sa thèse de doctorat [11] que les environnements de simulation énergétique existants ont été conçus pour des bâtiments classiques pour lesquels les consommations sont beaucoup plus importantes que celles fixées pour 2012. On conçoit aisément que les estimations énergétiques des nouveaux bâtiments soient encore l'affaire de

spécialistes, et que la bonne utilisation de modèles simples nécessite un réel savoir-faire de la part de l'utilisateur. Certains logiciels ont toutefois été développés spécialement pour estimer ces besoins thermiques, par exemple sous un environnement Simspark ou TRNSYS (Benoit Beauchamp et al) [12]. Signalent également une étude réalisée à partir d'EnergyPlus. Comme les systèmes géothermiques ne viennent pas s'intégrer en façade, ils n'influent pas sur les besoins énergétiques du bâtiment, du moins s'ils ne modifient pas les échanges thermiques entre le sol et le bâtiment [13]. C'est pourquoi ce type de logiciels reste adapté à l'estimation des besoins thermiques du bâtiment lorsque l'on considère une solution géothermique. Il est alors possible de réaliser ces estimations de manière indépendante, puis de dimensionner en conséquence la pompe à chaleur et le système permettant les échanges avec la source froide ventilation par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur [1].

#### 4. Récupération de chaleur résiduelle

Le chauffage et le refroidissement représentent environ la moitié de la consommation d'énergie dans l'Union européenne. Assurer un chauffage durable et des solutions de refroidissement qui répondent à ce besoin est la base pour atteindre l'objectif européen de neutralité climatique [14]. Des études suggèrent que le chauffage et le refroidissement urbains pourraient être étendus pour fournir 50 % de la chaleur. 25 à 30 % de la demande sont assurées avec des grandes pompes à chaleur électriques. Des études supposent prudemment que la chaleur résiduelle pourrait couvrir au moins 25 % de l'approvisionnement en chauffage urbain. De plus, il existe un grand potentiel de récupération de chaleur à partir de sources de chaleur résiduelle non conventionnelles. Réel Environ 1,2 EJ (ou 340 TWh) peuvent être récupérés annuellement dans les centres de données, les stations de métro, etc. Bâtiments tertiaires et stations d'épuration (équivalent à plus de 10 secondes) Demande totale d'énergie pour le chauffage et l'eau chaude dans l'UE. La chaleur résiduelle est libérée à n'importe quelle température. Classiquement Plus la température est élevée, plus la qualité de la chaleur perdue n'est élevée. Pour Faciliter l'optimisation des processus de récupération de la chaleur résiduelle, il est important de connaître la quantité maximale de chaleur récupérée. Maximiser le potentiel du processus et assurer sa mise en œuvre pour une efficacité maximale du système de récupération de la chaleur perdue [14]. La quantité de chaleur résiduelle disponible peut être calculée à l'aide de la formule :

$$Q = q_v \times \rho \times C_p \times \Delta T$$

Où,  $Q$  (J) est la teneur en chaleur,  $q_v$  est le débit de la substance ( $m^3/s$ ),  $\rho$  est la densité des fumées ( $kg / m^3$ ),  $C_p$  est la chaleur spécifique ( $J / kg.K$ ) et  $\Delta T$  est la différence de température de la substance (K) entre la température finale la plus élevée en sortie ( $T_{out}$ ) et la température initiale à l'entrée ( $T_{in}$ ) du système. En fonction de type et la source de chaleur résiduelle et afin de Justifier quel système de récupération de chaleur résiduelle peut être utilisé, il est essentiel d'étudier la quantité et la qualité de la chaleur récupérable du processus.

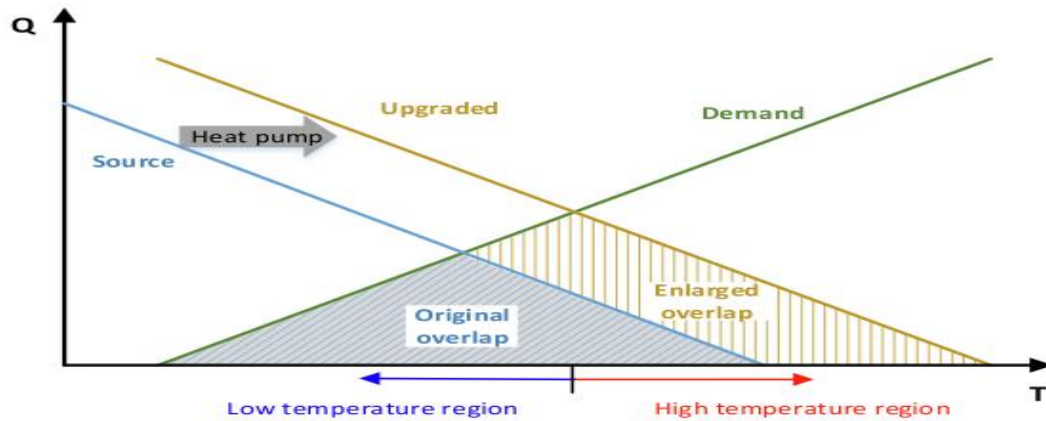


Figure I. 3: Profils simplifiés de température ( $T$ ) - charge ( $Q$ ) de la source de chaleur résiduelle et besoin de l'utilisateur

## 5. Géothermie

### 5.1. Définition

La géothermie se place au premier rang parmi les énergies renouvelables avec une production électrique représentant plus de 79 % de la production globale [15].

La géothermie consiste à exploiter les phénomènes thermiques internes du globe terrestre.

Elle culmine à environ 6 000 °C dans le cœur (Anzellini et al 2013). La croûte permet à une partie de cette chaleur d'atteindre la surface. Cependant, la majeure partie de l'énergie géothermique utilisée est produite par la décomposition d'isotopes radioactifs dans la croûte terrestre tels que l'uranium, le thorium et le potassium. Près de la surface, la température de Surface chute rapidement.

Là, elle correspond à la température annuelle moyenne du lieu considéré. Les températures de surface dépendent donc également du climat et se situent autour de 10 °C en Belgique (De Boever et al., 2012). Cela crée un gradient géothermique moyen de 3°C par 100 m au niveau de la croûte (Banks, 2008) [16].

## 5.2. Classification

La classification de la géothermie dépend du pays et du contexte dans lequel elle est employée. Il est en effet possible de la caractériser selon divers paramètres (profondeur des puits, température du fluide caloporteur, façon d'utiliser l'énergie géothermique, etc.),

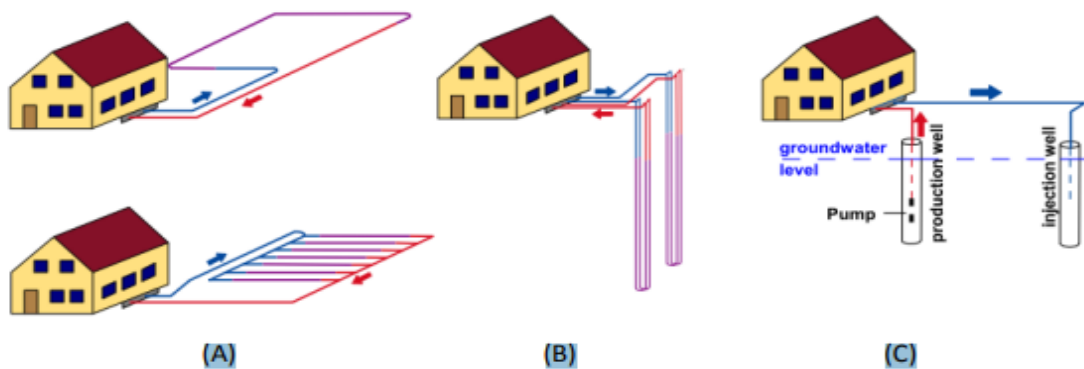
Laissant place à autant de classements différents. De plus, les seuils assignés à ces paramètres peuvent varier d'une classification à l'autre (Petit clerc et Vanbrabant, 2011). En Belgique, selon le Département de l'énergie et du Bâtiment durable, elle est classée en quatre catégories en fonction de son contenu énergétique : géothermie haute, moyenne, basse et très basse énergie. Celui-ci dépend de la température de la chaleur exploitée et est donc lié à la profondeur à laquelle elle est récupérée. L'usage qui pourra en être fait est également dépendant de cette catégorie. L'énergie géothermique peut en effet être utilisée de trois manières différentes : pour la production d'électricité, pour le chauffage direct et pour le chauffage et le refroidissement indirect via une pompe à chaleur (Wu, 2009) [16].

*Tableau I. 1: Classification des types ressources géothermiques [3].*

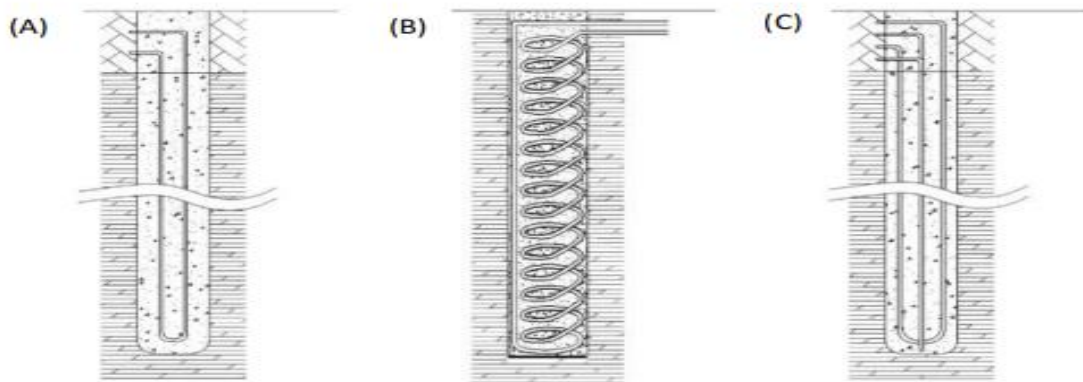
<b>Les types de ressources</b>	<b>Haute énergie</b>	<b>Base énergie</b>	<b>Très base énergie</b>
<b>La profondeur</b>	Plus de 1500m	1500-2500m	Centaines mètres.
<b>La température</b>	80-300°C	30-100°C	10-30°C
<b>L'objectif</b>	Production d'électricité et de chaleur à la fois.	Le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines applications industrielles.	La climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.
<b>La moyen</b>	Une turbine à vapeur pour l'électricité et de récupération des condensats de vapeur pour la chaleur.	Pompe à chaleur sur une nappe phréatique, afin de prélever et transférer de l'énergie contenue dans l'eau souterraine vers les locaux à chauffer ou à climatiser.	Pompe à chaleur géothermique prélevant la chaleur provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie, le sol du terrain jouant un rôle d'inertie thermique.



Il existe différents systèmes permettant d'échanger de la chaleur avec le sous-sol. On peut tout d'abord distinguer les systèmes ouverts des systèmes fermés. Dans les systèmes ouverts, au moins 2 puits sont forés. Le premier sert à pomper de l'eau dont la chaleur est extraite. L'eau refroidie est ensuite renvoyée dans le second puits et est réchauffée par le sol avant de pouvoir être à nouveau exploitée. Dans les systèmes fermés, la chaleur est échangée grâce à un mélange d'eau et d'antigel (souvent du glycol) s'écoulant dans un réseau souterrain de canalisations qui forment l'échangeur de chaleur. Cet échangeur est généralement directement installé dans le sol, mais il peut aussi être intégré à une structure souterraine (fondations, pieux, tunnels, égouts, etc.). On parle alors de géo structures échangeuses de chaleur. Les échangeurs géothermiques de chaleur sont eux même séparés en 2 groupes : les systèmes horizontaux et verticaux. Les échangeurs horizontaux sont composés d'une boucle en matière synthétique installée horizontalement, entre 1.2 et 2 m de profondeur (Figure 4A). Elle permet d'extraire la chaleur du sous-sol peu profond en hiver, tandis que celui-ci se recharge grâce au soleil et aux infiltrations d'eau de pluie en été. Ce système a l'avantage d'être facile à installer et peu coûteux. Il offre cependant une capacité limitée qui le restreint au secteur résidentiel, et nécessite une surface de sol importante. Il possède de plus un rendement moins important que les échangeurs verticaux et ne peut être utilisé pour le refroidissement (CSTC, 2017). Les échangeurs verticaux, ou Borehole Heat Exchanger (BHE), sont constitués de forages de 5 à 10 cm de rayon, généralement disposés entre 30 et 150 m de profondeur. L'échange de chaleur se fait également par l'intermédiaire de tubes en matière synthétique le plus souvent disposé en double U (Figure 5). Des variantes moins utilisées sont les tubes concentriques pour lesquels le second tube passe à l'intérieur du premier, ou encore les tubes spiralés utilisés à faible profondeur (jusqu'à 3 m). Ces différents systèmes sont résumés par le diagramme de la Figure 5 [15].



**Figure 1. 4 :** 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 1.5:** 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)[15]

Il existe également des systèmes dits à expansion directe dans lesquels le fluide de refroidissement circule directement dans des conduits en cuivre faisant à la fois office d'échangeur géothermique et d'évaporateur. Le cuivre possédant une meilleure conductivité thermique que le polyéthylène, ce système permet l'utilisation de circuits plus courts

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 ».

### 5.3 L'utilisation de ressources géothermiques en Algérie :

Les ressources géothermiques en Algérie sont principalement utilisées pour la balnéologie et le chauffage des locaux et des serres. Récemment, de nouveaux projets ont été mis en place pour la pisciculture et l'agriculture, où le gouvernement algérien apporte un soutien financier de 80% à ces projets. Un projet de pompe à chaleur a été installé dans une école primaire (école primaire Sidi Ben Saleh) à Saida (nord-ouest de l'Algérie) à des fins de chauffage et de refroidissement. Une eau thermale de 46°C avec un débit de 25 m<sup>3</sup> / h a été utilisée pour ce projet. Un projet similaire est prévu à Khenchla (NE Algérie) et une centrale géothermique à cycle binaire est également prévue à Guelma (NE Algérie). Récemment, certains projets de pisciculture de Tilapia ont démarré en Algérie (préfectures de Ghardaïa et Ouargla). Ces projets utilisent les eaux chaudes de l'aquifère Albien du sud de l'Algérie [17].

## 6. Pompe à chaleur

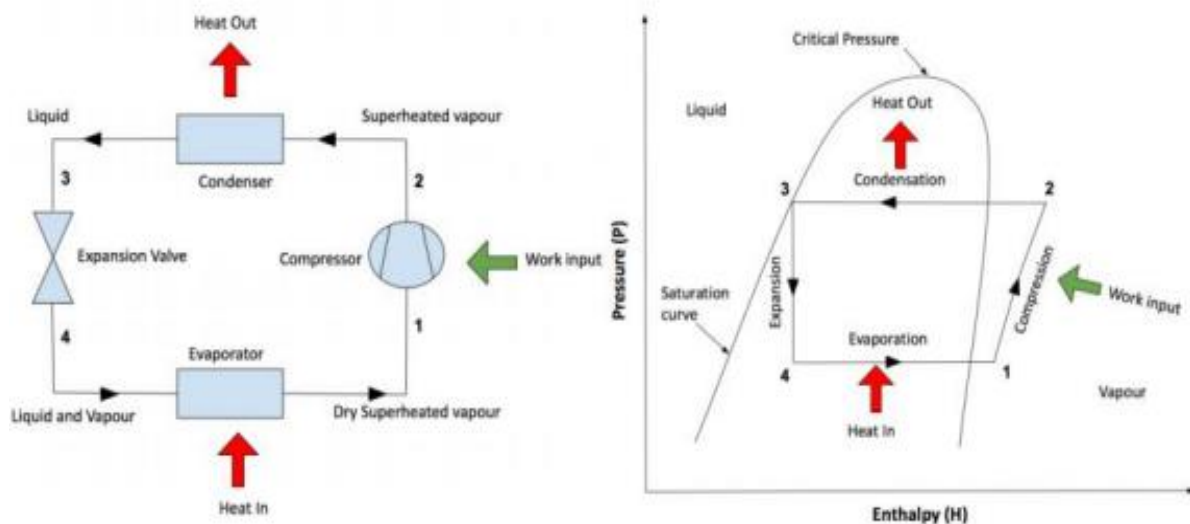
Les réseaux de chauffage et de refroidissement urbains de cinquième génération (5GDHC), permettent l'intégration de source d'énergies renouvelables qu'il serait impossible de l'exploiter dans les générations précédentes. L'intégration des sources d'énergie peut être variable en fonction de la charge thermique et des besoins de chauffage/refroidissement.

Aujourd'hui l'utilisation d'énergie allant de quelques kW à des dizaines de MW (Fabien Collard) [18]. La pompe à chaleur fait partie des technologies qui contribuent à faire valoriser ses ressources énergétiques.

### 6.1. 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 rejeté 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 puit 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 utilisé. Le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur n'est pas très différent de celui d'une pompe à chaleur inversée comme



**Figure 1.6:** Schéma du cycle de compression de vapeur et diagramme pression-enthalpie (Naicker, 2015) [19]

le réfrigérateur.

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.

La relation suivante est vraie :

$$Q_R = Q_a + PC - Q_l \quad I-1$$

où  $Q_R$  est la chaleur rejetée dans le dissipateur à haute température,  $Q_a$  est la chaleur absorbée par la basse température,  $P_c$  est la consommation électrique et  $Q_l$  sont les déperditions thermiques. Le schéma de fonctionnement d'une pompe à chaleur à compression est illustré à la **(Figure I. 6)** UN fluide de travail, appelé réfrigérant, est utilisé. Le réfrigérant est une substance capable de s'évaporer à faible températures élevées et de se condenser à des températures élevées. Échange de chaleur du circuit primaire vers le fluide frigorigène se produit dans l'évaporateur, tandis que l'échange de chaleur du fluide frigorigène vers le circuit secondaire a lieu dans le condenseur. Le principe de base est que lorsqu'un fluide s'évapore dans un gaz, il absorbe de la chaleur, tandis que le gaz la dégage en se condensant en un liquide. Ce processus circulaire en boucle fermée est le cycle de compression de vapeur ou réfrigérant cycle d'évaporation. Le principe de base est que lorsqu'un fluide s'évapore dans un gaz, il absorbe de la chaleur, tandis que le gaz la dégage en se condensant en un liquide. Ce processus circulaire en boucle fermée est le cycle de compression de vapeur ou réfrigérant cycle d'évaporation Sont de températures élevées et de se condenser à des températures élevées. Échange de chaleur du circuit primaire vers le fluide frigorigène se produit dans l'évaporateur, tandis que l'échange de chaleur du fluide frigorigène vers le circuit secondaire a lieu dans le condenseur. Le principe de base est que lorsqu'un fluide s'évapore dans un gaz, il absorbe de la chaleur, tandis que le gaz la dégage en se condensant en un liquide. Ce processus circulaire en boucle fermée est le cycle de compression de vapeur ou réfrigérant cycle d'évaporation.

Le paramètre typique utilisé pour évaluer les performances de la pompe à chaleur est le coefficient de performance COP, défini comme :

$$COP = \frac{\text{capacité de chauffage du condenseur [W]}}{\text{puissance absorbée du compresseur [W]}} \quad 2-I$$

Ceci est généralement utilisé pour le chauffage, tandis que pour le refroidissement, le taux d'efficacité énergétique, EER, s'utilise :

$$EER = \frac{\text{capacité de refroidissement de l'évaporateur [W]}}{\text{puissance absorbée du compresseur [W]}} \quad 3-I$$

Le COP et l'EER sont des indicateurs de performance énergétique instantanés, incapables de décrire les performances de fonctionnement à long terme. Le COP doit être d'au moins quatre pour les raisons qui signifie que les trois quarts de l'énergie utilisée dans le circuit secondaire proviennent de la chaleur du sol et un quart provient de l'électricité. L'efficacité est fortement affectée par la différence entre la température réellement utilisée et la température extraite : si la première est élevée et la deuxième est trop faible, le rendement diminue. Pour cette raison, l'acceptable et que les niveaux de température doivent être de 0-5°C pour le circuit primaire et de 35-45°C pour le deuxième circuit. Bien sûr, les systèmes de chauffage (et de refroidissement) à basse température peuvent profiter davantage de ces types d'échangeurs de chaleur au sol.

Le facteur de performance saisonnier (SPF) ou COP saisonnier (SCOP) est défini comme suit :

$$SCOP = \frac{\text{demande de chauffage annuelle [kWh]}}{\text{consommation annuelle d'électricité pour le chauffage [kWh]}} \quad 4-I$$

En hiver, la capacité thermique et le COP augmentent avec une augmentation de la température de l'eau dans le circuit primaire, tandis qu'en été la capacité de refroidissement et l'EER augmentent avec une diminution de celle-ci.

## 6.2. Les modes de fonctionnement de la pompe à chaleur

Une pompe à chaleur peut disposer de 2 modes de fonctionnement différents : monovalent ou bivalent. Votre choix dépendra de vos besoins en termes de puissance.

### a) Le mode monovalent

Une pompe à chaleur sera dite monovalente si elle assure à elle seule tous vos besoins en termes de chauffage et vient remplacer tous vos radiateurs électriques. Une pompe à chaleur monovalente sera dimensionnée pour couvrir tous vos besoins en termes de chauffage et sera, par conséquent, très puissante. Ce mode de fonctionnement est principalement adapté aux pompes géothermiques. Principal inconvénient du mode monovalent : le coût. Une pompe à chaleur monovalente sera certes la plus puissante, mais également la plus chère.

## **b) Le mode bivalent**

Si vous avez l'intention d'utiliser un système de chauffage complémentaire, qu'il soit électrique ou à gaz, notamment en cas de chute importante de la température extérieure en hiver. Une pompe à chaleur avec un mode bivalent est moins puissante, mais sera davantage capable de s'adapter à des besoins ponctuels. C'était d'autant plus vrai si un système de chauffage préexiste et c'est pour cela que le mode bivalent est privilégié lors de travaux de rénovations. Cela permet de conserver l'ancien mode de chauffage et de réaliser des économies dans certaines circonstances. Cette option demande quelques frais supplémentaires en matière de maintenance puisqu'il faudra entretenir deux systèmes, mais peut vous permettre de réaliser de véritables économies sur le long terme si vous ajustez finement l'utilisation des différents équipements. Veillez à bien le prendre en compte au moment de l'installation de votre PAC.

## **7. 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 faire réduire sont de plus en plus stricts, la géothermie et la récupération de chaleur dégagée par le métro peuvent être combinées en utilisant des technologies telles que les pompes à chaleur et les échangeurs. Ces systèmes permettent de capturer la chaleur du sol ou du métro et de l'utiliser de manière efficace pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments. Cela contribue à l'efficacité énergétique et à la réduction de la consommation d'énergie fossile.

## Chapitre II Energie des tunnels et la chaleur des métros

### 1. Introduction

Les tunnels énergétiques et la récupération de la chaleur des métros sont une technologie relativement nouvelle qui a été examinée à la loupe pendant les dernières décennies. La plupart des études trouvées se sont concentrées sur l'évaluation des performances thermiques des tunnels énergétiques, alors que les études rapportées sur la contribution de la chaleur de métro sont extrêmement peu nombreuses, contrairement par exemple aux études plus avancées connaissance et généralisation des pieux énergétiques.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter une revue à jour de différentes investigations numériques des études théoriques et applications expérimentales des tunnels énergétiques et de métro, axées sur le comportement mécanique, thermiques et identifier les aspects clés pour leur analyse, conception et application sur plusieurs tunnels un peu partout dans le monde. Une attention est également accordée aux directives de conception pour des tunnels déjà existant [18] à qui l'Algérie pourrait l'adapté pour inclure les technologies des tunnels comme celui de la chine, l'Autriche, la France et d'autres pays liés à l'activation thermique des tunnels et se bénéficier de la chaleur de métro comme un plus. Des recherches expérimentales et numériques sur l'énergie, technologie des tunnels et pour le développement d'une nouvelle procédure de conception, qui est proposée dans ce qui suit. Et comment la chaleur de métro va promouvoir au chauffage des maisons.

### 2. Energie des tunnels

Une assez grande quantité de sol peut être activée pour l'échange de chaleur géothermique. De plus, les tunnels avec une couche arable élevée peuvent avoir des charges nettement plus élevées. La température du sol environnant améliore les performances des systèmes géothermiques.

Cependant, les tunnels peu profonds (c'est-à-dire les tunnels souterrains/métro) peuvent également être utilisés de manière bénéfique pour la production géothermique car ils sont situés dans des zones urbaines [22]. L'installation des tuyaux d'absorption dans la structure en béton du tunnel est différente pour les tunnels à ciel ouvert et les tunnels miniers. Les tunnels en tranchée couverte sont équipés de tuyaux d'absorption au même titre que les pieux de forage.

Un mur continu utilisé à l'intérieur ou au-dessous d'un panneau de plancher. Cependant, lors de la fouille L'utilisation d'éléments d'échange de chaleur dans les tunnels pose de nouveaux défis aux ingénieurs.

Des systèmes d'absorption peuvent être installés dans le sol du tunnel en utilisant les méthodes existantes.

Il est nécessaire de développer une technologie entièrement nouvelle pour le revêtement des tunnels. La première utilisation d'échangeurs de chaleur dans des tunnels a eu lieu le 17 juin 2010 dans le tunnel Leinzer (Vienne). Section appelée Test Facility LT24. Il a été construit par la méthode à ciel ouvert sur le pieu excavé du tunnel. Il était composé de 59 pieux énergétiques d'un diamètre de 1,2 mètre et d'une longueur moyenne de 17, 1 mètre.

Le pieu était équipé d'un tube d'aspiration relié au collecteur par un tuyau. Une chambre reliée à 6 unités de pompe à chaleur pour le chauffage dans le bâtiment scolaire adjacent. Première opération. La mise en service de la centrale énergétique a commencé en février 2004 avec une première phase de test. Environ 70MWh de chaleur au cours des premiers mois de fonctionnement, l'énergie a été obtenue à partir de pieux énergétiques de l'automne. En 2004, le système énergétique alimentait une école adjacente en énergie géothermique [23].

Entre la seconde un total de 186,2 MWh d'énergie géothermique a été obtenu pendant la période de chauffage hivernale 2004/05, 193,9 MWh ont été récupérés en 2005/06. Cette quantité équivaut à la chaleur géothermique qui est roche de la puissance maximale attendue pour chaque période de chauffage.

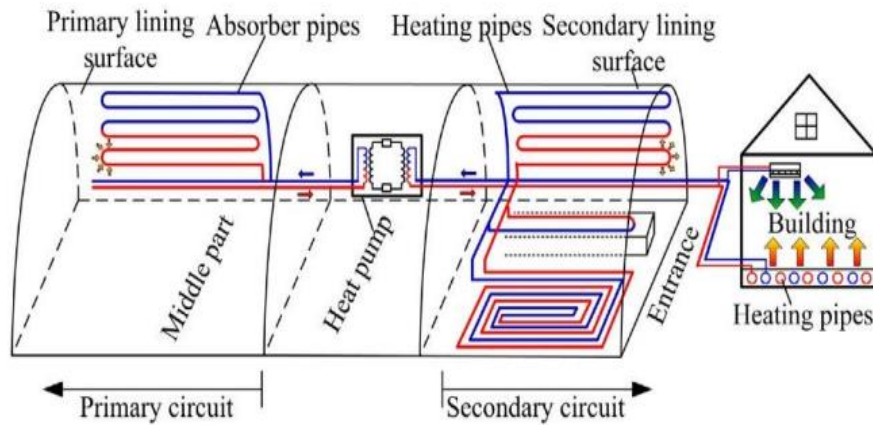
Développement d'éléments d'absorption spécialisés (Mankiewicz & Adam 2003)[24]. Géotextile énergétique développé pour les revêtements de béton à activation thermique.

Dans ce cas, le tube absorbant a été attaché au géotextile non tissé pour former un géo composite avec un géotextile sur le haut et le bas de tube.

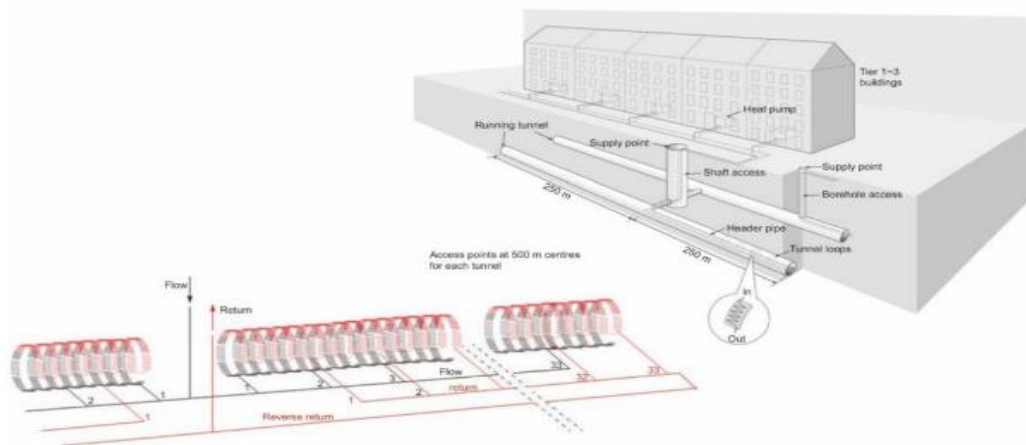
## **2.1. Activation thermique des revêtements de tunnel**

L'activation thermique des revêtements de tunnel est un système qui utilise l'activation thermique du sol pour fournir de l'énergie aux bâtiments. Ce système présente plusieurs avantages par rapport à l'activation thermique des fondations des bâtiments, notamment la possibilité d'activer de plus grands volumes de sol. Les tunnels énergétiques peuvent ainsi prendre en charge une fonction énergétique en plus de la statique principale avec peu de dépenses techniques supplémentaires. De plus, l'emplacement peu profond, en particulier dans les sols aquifères, représente une condition idéale pour l'exploitation géothermique. Comme dans la boucle fermée traditionnelle, aucune interférence avec les eaux souterraines n'est créée, avec de grands avantages pour l'environnement, contrairement aux systèmes en boucle ouverte. Le système se compose d'un circuit géothermique primaire, d'un circuit secondaire et d'une source d'eau unité de pompe à chaleur couplée aux collecteurs des échangeurs de chaleur au sol et/ou à une machine de refroidissement (figure 1). Un fluide caloporteur (eau, eau avec antigel sous forme de glycol ou solution saline qui peut travailler jusqu'à -20°C) est mis en circulation par une pompe hydraulique dans la boucle, extrayant la chaleur en hiver. Le fluide chauffé est ensuite réchauffé grâce à la pompe à chaleur pour augmenter son niveau d'énergie, typiquement de 10-15°C à 25-35°C. Un tuyau de distribution réseau fournit la chaleur aux utilisateurs finaux via le circuit secondaire. En été, l'excès de chaleur est extrait du bâtiment via des systèmes de refroidissement par air ou par eau intégrés dans les sols, les murs et les plafonds et dissipé/stocké dans le sol via les tuyaux absorbants. Dans ce cas, la chaleur de la pompe réduit la température du fluide en dessous de celle du système de conditionnement, améliorant ainsi l'efficacité de la réinjection. Dans le cas d'un chauffage ou d'un refroidissement gratuit, la pompe à chaleur peut être omise grâce à des températures de sol favorables et le seul apport d'électricité est celui nécessaire pour faire fonctionner les pompes de circulation. Par exemple, en mode free cooling, le fluide chaud est directement dissipé dans le sol en s'affranchissant de la pompe à chaleur et en gagnant en efficacité [22].

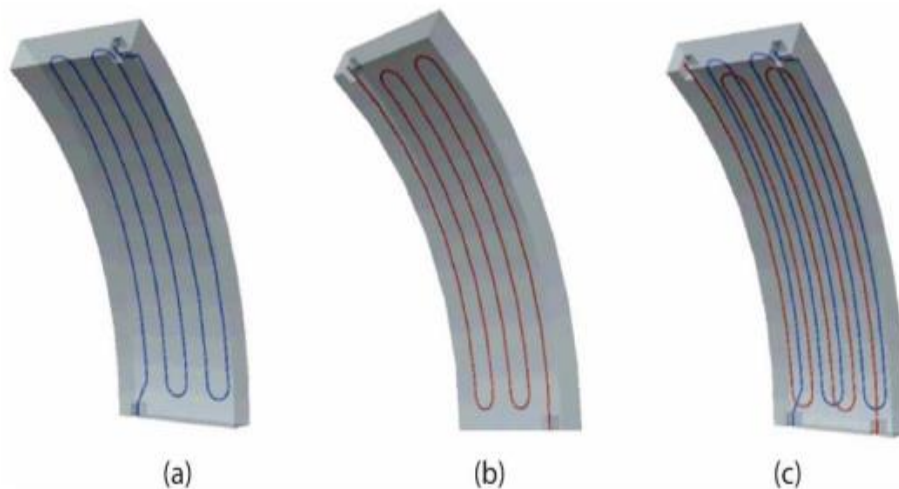




**Figure II. 1:** connexion de tuyauterie schématique avec des sous-circuits constitués de cinq anneaux en série (Nicholson et al., 2014) [21]



**Figure II. 2:** connexion de tuyauterie schématique avec des sous-circuits constitués de cinq anneaux en série (Nicholson et al., 2014) [21]



**Figure II. 3:** Configurations du brevet Enertun : (a) sol, (b) air et (c) sol & air [26]

Différentes utilisations de la chaleur extraite et injectée peuvent être mentionnées, telles que le chauffage et le refroidissement des stations de métro ou des bâtiments à proximité du tunnel (Nicholson et al., 2014 [21] ; Barla et al., 2016.)[24], chauffage du revêtement lui-même (Zhang et al., 2014) [25], dégivrage aux têtes de tunnel (Islam et al., 2006), chaussées routières, tabliers de ponts (Dupray et al., 2013 ; Bowers et Olgun, 2013), plates-formes, etc.. Les températures nécessaires pour ces applications sont de l'ordre de 40 à 50°C bien que le chauffage direct puisse être appliqué pour garder les surfaces de circulation exemptes de glace et de neige (Franzius et Pralle, 2011). Habituellement, les températures de fonctionnement peuvent être considérées dans la gamme 4-30°C (Knellwolf et al., 2011), mais dans certains cas des températures allant jusqu'à 40 et 50°C peuvent être atteintes, soit parce que d'un fonctionnement non optimisé ou parce que la chaleur est rechargée dans le sol à partir de la chaleur perdue. Alors que pour les tunnels en tranchée couverte, les méthodes déjà existantes pour l'installation des tuyaux peuvent être adoptés (pieux forés, parois moulées, dalles de fondation), pour les tunnels minés, en fonction de la technique de tunnelisation, les conduites peuvent être posées selon différentes configurations. Deux solutions technologiques, relatives aux méthodes de creusement conventionnel et mécanisé, sont décrites, le géotextile énergétique et le revêtement segmentaire énergétique [20].

- Les revêtements segmentaires énergétiques sont une technologie innovante qui permet l'échange de chaleur avec le sol pour chauffer et refroidir les bâtiments adjacents. Les tuyaux sont intégrés dans les structures géotechniques, les transformant en géo structures énergétiques activées thermiquement
- La nouvelle doublure segmentaire énergie est conçue pour s'adapter de manière flexible à trois configurations différentes : sol, air et autres [27].

En résumé, l'activation thermique des revêtements de tunnel est une technologie prometteuse pour fournir de l'énergie thermique renouvelable à des fins de chauffage et de refroidissement dans les zones urbaines. Les revêtements segmentaires énergétiques sont une solution intéressante pour améliorer le rendement thermique du système, et peuvent être utilisés pour chauffer et refroidir les stations de métro, les bâtiments environnants, les chaussées routières, les tabliers de ponts, les plates-formes.

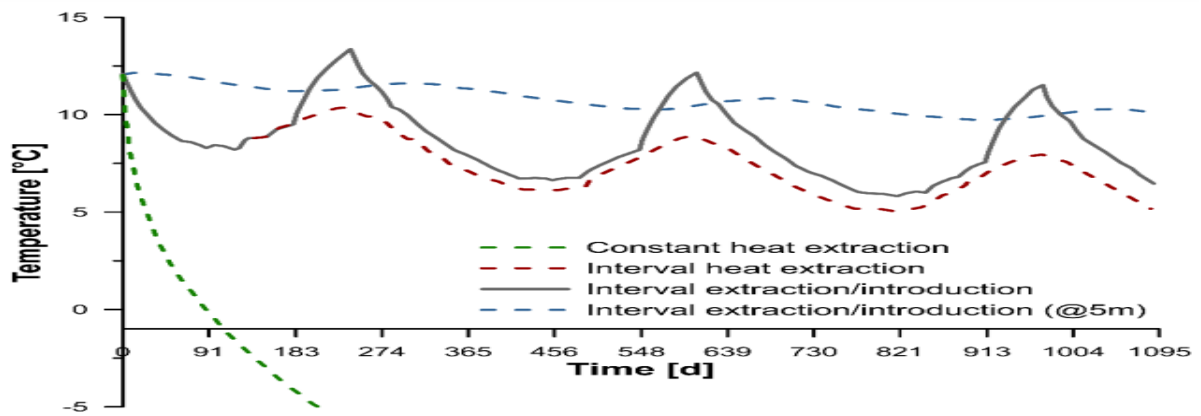


Figure II. 4: Température à l'extrados du tunnel et à 5 m du revêtement sur trois ans dans différents modes de fonctionnement (modifié de Franzius et Pralle, 2011)[20]

## 2.2. Comportement thermique des Tunnels

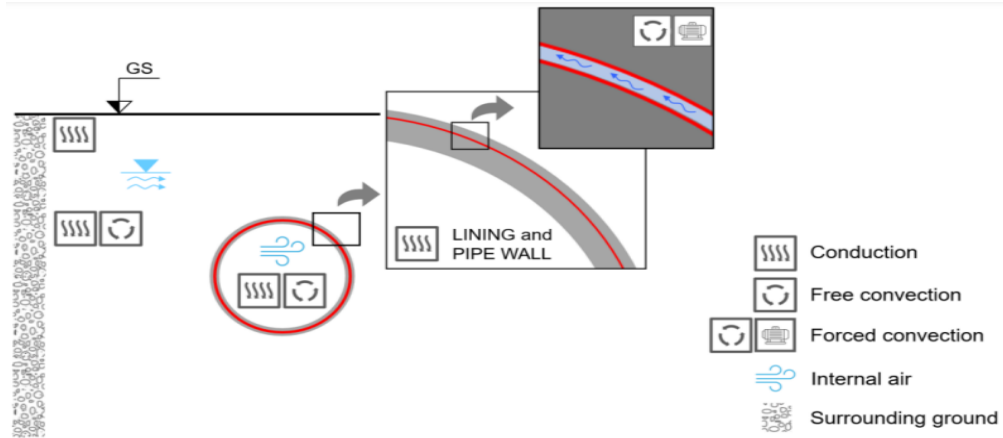
Un tunnel énergétique est un système caractérisé par trois éléments principaux : le fluide caloporteur à l'intérieur du tube, le sol ou la masse rocheuse environnante et l'air dans le tunnel (Tinti et al, 2017 ; Bidarmaghzet Narsilio, 2018). Leurs performances thermiques sont affectées par de nombreux 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 [20].

- ❖ 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 géo structures 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. 5:** Principaux mécanismes de transfert de chaleur impliqués dans le problème des systèmes de tunnel énergétique.[ 20]

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  $\dot{Q}$  en W extraite du sol en hiver et injectée en été peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p |T_i - T_o| \quad 1-II$$

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 exprimée 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 :

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{L\pi D} \quad 2-II$$

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

### 3. La chaleur des métros

De nombreux échanges de chaleur ont lieu dans les tunnels des trains et des métros. Par exemple, lorsqu'un métro freine ou accélère, la chaleur monte rapidement dans le tunnel. Cet air chaud se mélange à l'air naturellement présent dans les tunnels et à la chaleur dégagée par l'éclairage du métro, les voyageurs génèrent également de la chaleur et de la géothermie. Jusqu'à présent, les ingénieurs ont été imprécis dans le calcul de la chaleur provenant de l'air. Des chercheurs du Laboratoire de mécanique des sols [28] (LMS) de l'EPFL ont corrigé cela dans une étude publiée dans la revue *Applied Thermal Engineering*. Les ingénieurs ont en effet pu estimer avec précision cet important coefficient, appelé coefficient de convection. [28].

Les infrastructures souterraines ont tendance à permettre aux températures de se stabiliser et à l'excès de chaleur et de froid d'atteindre la surface. Ce rejet se traduit par le mouvement d'air chaud que l'on ressent parfois lors du passage dans les bouches de métro. C'est précisément cette physique que les ingénieurs veulent exploiter en plus de la chaleur qui existe naturellement dans le sol.

Concrètement, les chercheurs proposent d'insérer à intervalles réguliers des tuyaux en plastique dans la structure en béton des tunnels du métro et de les relier à des pompes à chaleur.

Un liquide riche en calories, ou simplement de l'eau, est ensuite introduit dans le tube comme dans un réfrigérateur. Ce système introduit de l'eau froide dans la canalisation du tunnel en hiver et rejette de l'eau chaude à la surface en été. Les chercheurs affirment que l'installation géothermique du tunnel peut stocker de l'énergie pendant une durée de vie de 50 à 100 ans avec un très petit investissement. Seule la pompe à chaleur doit être remplacée tous les 25 ans [28].

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 entraîner 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

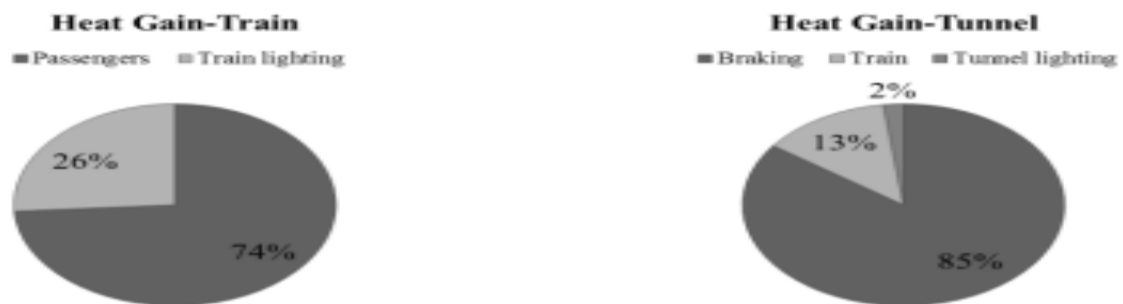


Figure II. 6: gains de chaleur dans un environnement ferroviaire souterrain typique [29]

pourraient être chauffé par le sol lui-même, qui en profondeur peut être rencontrées à des températures comprises entre 30 °C et 50 °C [29].

#### 4. Présentation des travaux théoriques et expérimentaux sur la récupération de la chaleur des tunnels de metro

##### 4.1. Métro du Royaume-Uni

Une simulation sur 10 ans par Nicholson et al. (2014) ont fait varier le taux d'extraction de chaleur de 5 à 50 W/m<sup>2</sup> dans les tunnels. La température moyenne du liquide devait chuter à -6 °C pour obtenir le taux d'extraction le plus élevé. Par conséquent, le fonctionnement doit être limité à 30 W/m<sup>2</sup> pour éviter le gel et à 20 W/m<sup>2</sup> pour assurer de bonnes performances. La température dans le circuit primaire atteint la pompe à chaleur [30].

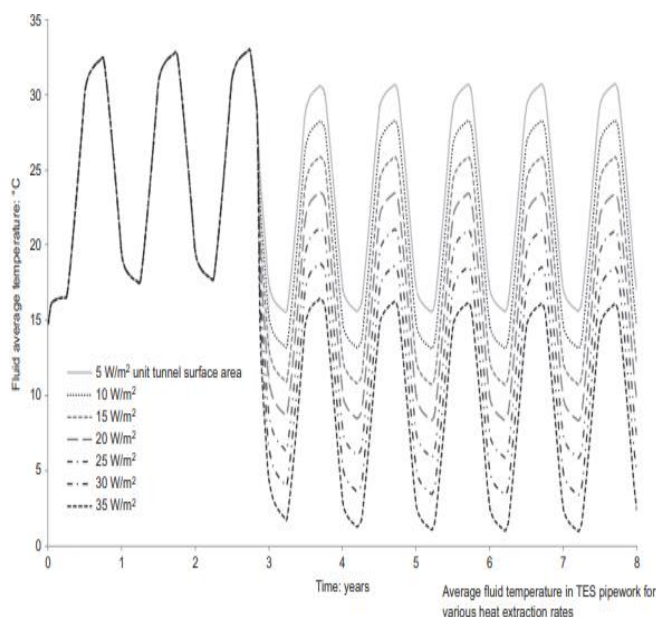


Figure II. 7: Température prévue du fluide à l'intérieur des tuyaux au fil du temps

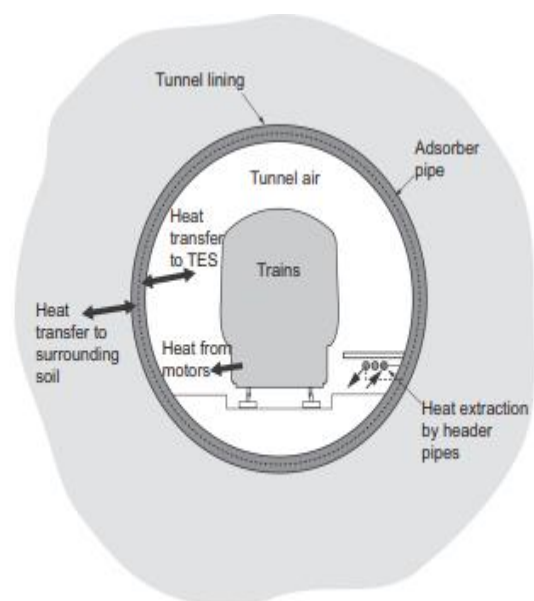


Figure II. 8: La configuration du modèle de ventilation, montrant le transfert de chaleur de l'air au tunnel et au sol environnant [30]

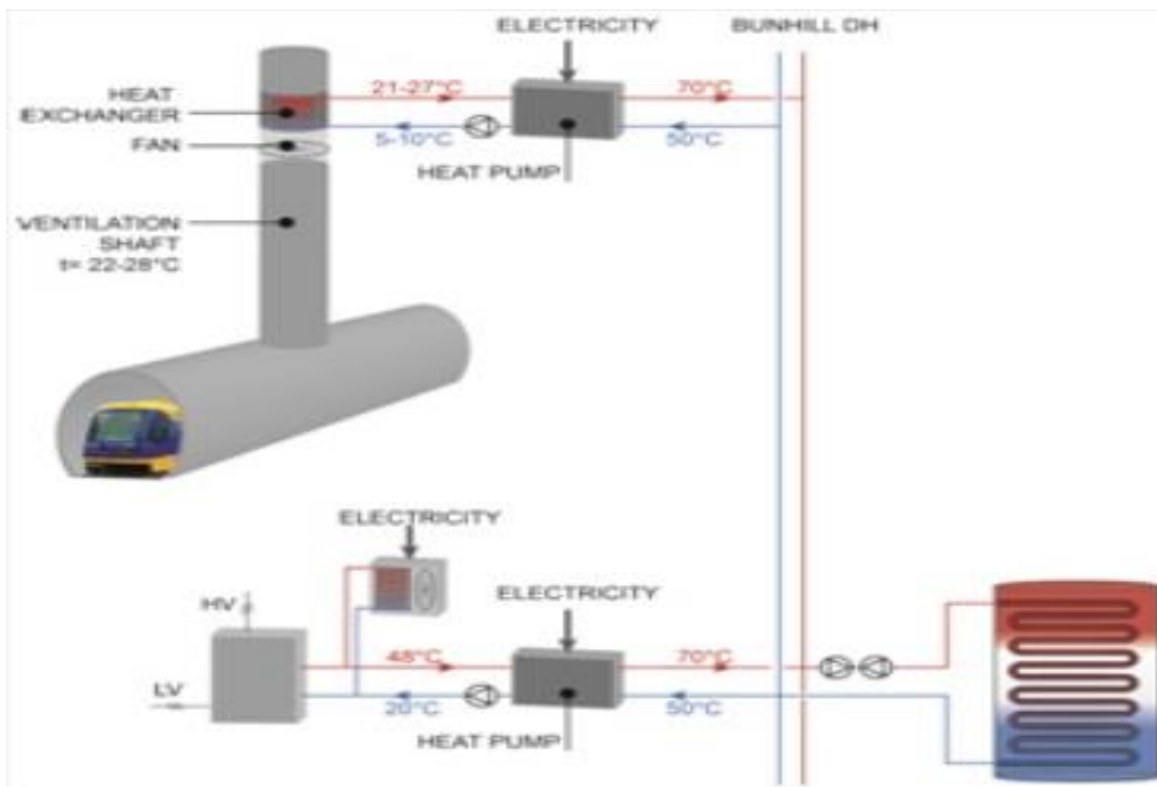


❖ **Projet CELSIUS à Londres**

Un projet mené par Jamie Byrne en 2015 pour récupérer la chaleur perdue des transformateurs et des conduits de ventilation tubulaires et intégrer le stockage de la chaleur.

Un projet précédent en 2012, le Banhill Energy Center, a construit un système de chauffage urbain pour chauffer deux centres de loisirs, trois maisons communautaires chauffées et un total de 805 maisons. Le système existant se compose d'un moteur à gaz de cogénération de 1,9 MW et d'un réservoir de stockage thermique de 115 m<sup>3</sup> avec 1,5 km de conduites de chauffage urbain. Le projet CELSIUS vise à étendre le réseau à 454 foyers et à exploiter l'énergie excédentaire du métro de Londres pour alimenter 1 000 foyers supplémentaires.

Les conduits de ventilation évacuent à une vitesse de 30 m<sup>3</sup>/s et à des températures de 22°C en hiver et 28 °C en été. Une étude de faisabilité a montré que la puissance calorifique du puits de ventilation au milieu du tunnel serait d'environ 0,4 MW. Afin de maximiser l'efficacité du démonstrateur, il a été décidé de moderniser le conduit de ventilation du conduit avec un ventilateur d'extraction. Le nouveau ventilateur éjecte de l'air à une vitesse de 70 m<sup>3</sup>/s, augmentant la puissance calorifique à environ 1 MW [31].



*Figure II. 9: les sources de chaleur utilisées dans le métro de Londres [32]*

❖ **Le projet Metropolitan Integrated Cooling and Heating (MICAH) 2019**

(Davies et al) ont proposé d'installer un système combiné de refroidissement et de récupération de chaleur à un site de puits de ventilation sur la ligne Piccadilly du métro de Londres. Les processus clés simulés par le modèle sont les suivants : (1) la récupération de la chaleur de l'air passant sur l'échangeur de chaleur HRHX; (2) une boucle d'eau primaire qui pompe l'eau chauffée sortant du HRHX et la transporte à l'évaporateur de la pompe à chaleur; (3) l'amélioration de la température de la chaleur récupérée à l'aide d'une pompe à chaleur; (4) une boucle d'eau secondaire pour transférer la chaleur améliorée au réseau de chauffage urbain. Dans les deux cas, la chaleur est extraite de l'air passant sur une bobine d'échangeur de chaleur à eau froide, où la chaleur est transférée à l'eau, augmentant sa température. Le modèle prévoyait que cela pourrait être réalisé de manière économique et pourrait générer d'énormes économies de carbone et de coûts. Avec 200 puits de ventilation à Londres, plus de 360 000 tonnes de carbone pourraient être économisées chaque année, tout en générant des revenus de 40 000 000£. L'application de cette technologie à 50% des 150 systèmes de métro dans le monde permettrait d'économiser plus de 27 millions de tonnes de carbone [33].

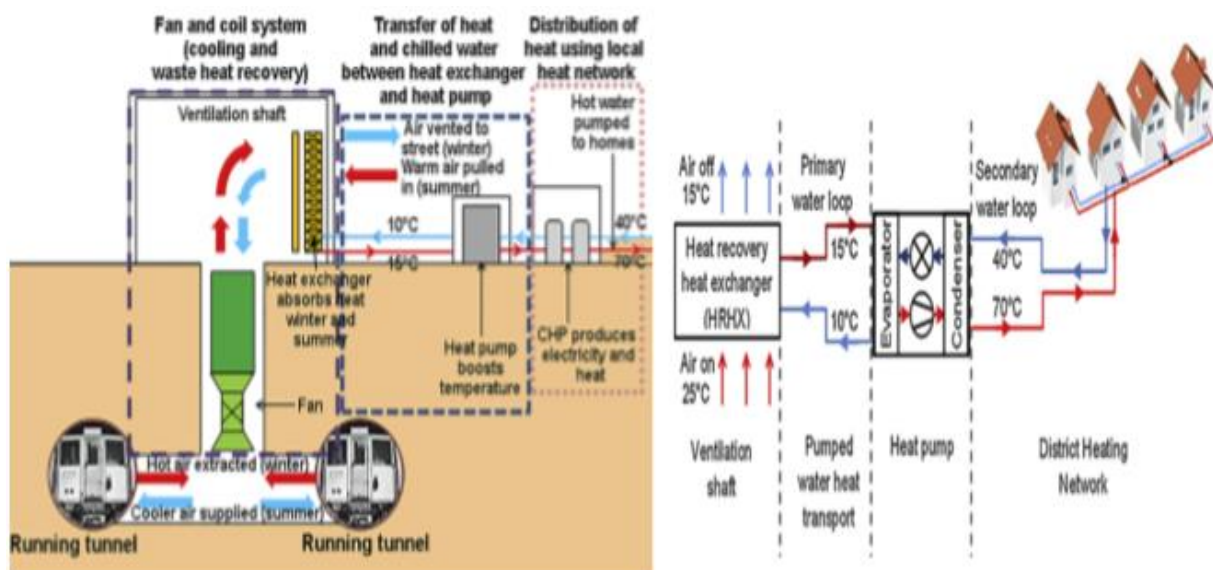
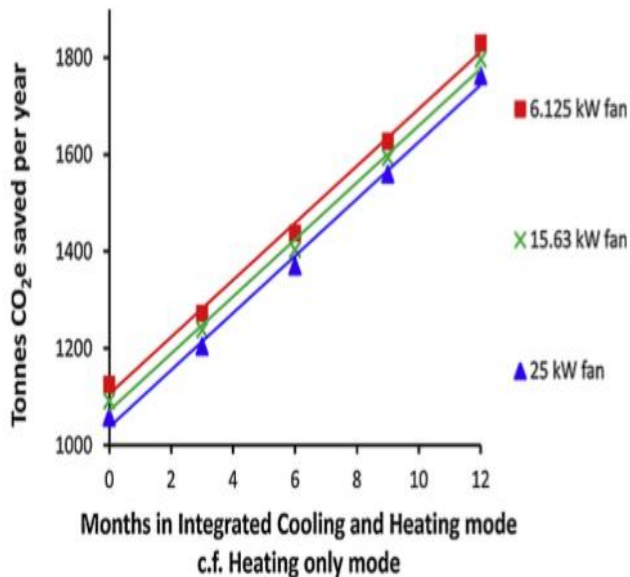
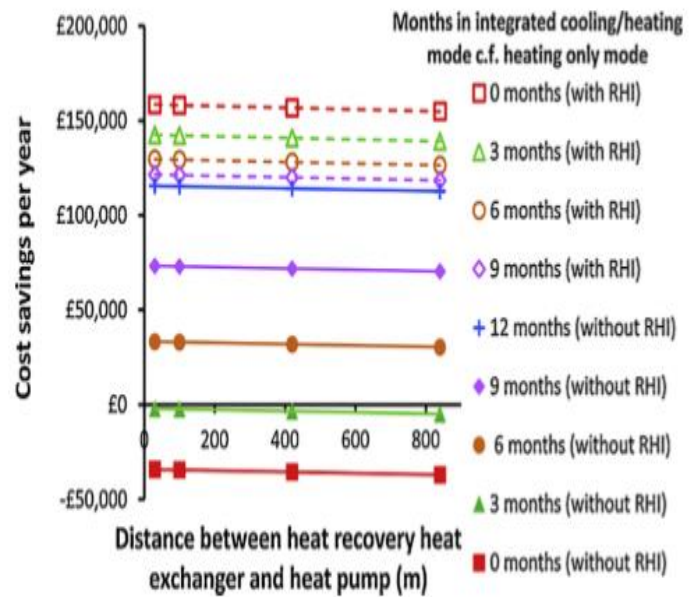


Figure II. 10: Schéma du système et du modèle MICAH.[33]





**Figure II. 12:** Économie de carbone pour trois puissances de ventilateur différentes pour MICAH par rapport au chauffage cogénération et au refroidissement du magnétoscope.[33].



**Figure II. 11:** Effet du prix du gaz sur les économies de coûts (avec et sans RHI) pour MICAH par rapport au chauffage par cogénération et au refroidissement par magnétoscope [33].

### ❖ Etude d'installation de ASHP) à Glasgow

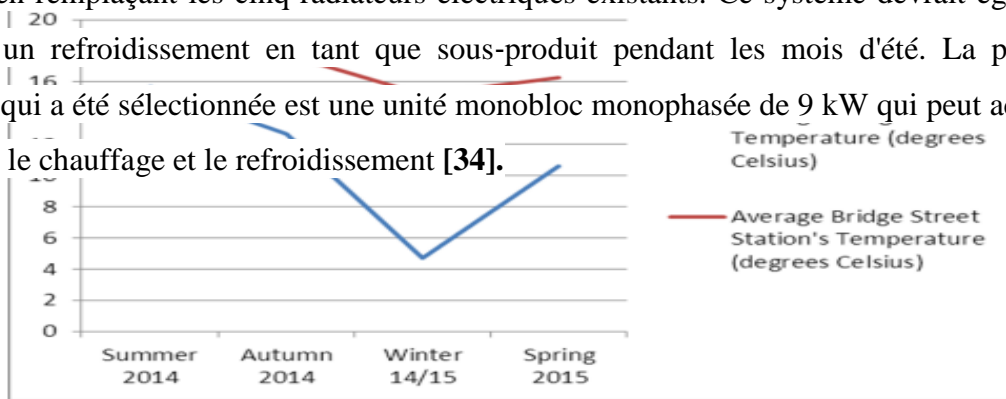
En 2016 (Ninikas et al) ont présenté une étude sur la récupération de la chaleur de l'air dans les tunnels de circulation souterrains pour chauffer des logements à l'aide d'une pompe à chaleur (ASHP) air source heat pump. Ils ont montré que de telles conditions prévalent dans les tunnels souterrains du métro de Glasgow. Ils ont mené une enquête annuelle sur le débit d'air, la température et l'humidité à 30 points différents du réseau de métro. Ils ont constaté que la température était relativement stable et qu'il y avait une circulation d'air adéquate dans les tunnels jumelés (température hivernale moyenne = 15 °C, variation annuelle = 2,6 °C, débit d'air moyen = 16,47 m<sup>3</sup>/h). Cela indique une plus grande efficacité du système par rapport aux tunnels. Une conception de la configuration pilote proposée a été interprétée et cela indiquait qu'un ASHP de 9 kW serait nécessaire pour répondre aux besoins de chauffage domestique et de chauffage de la station de métro Bridge Street et des besoins en eau (ECS). Ceci était basé sur les calculs de charge thermique de la station ainsi que sur les mesures d'apport d'énergie pour les radiateurs électriques qui était de 8,07 KW.

Cette installation alimentera cinq nouveaux radiateurs ventilo-convecteurs basse température avec température de retour d'eau à 40 °C qui sera suffisant pour chauffer la

**Tableau II. 1:** Variations saisonnières de la température de l'air dans le réseau de métro [34]

Subway Stations air temperature (degrees Celsius) - Average of six readings per station per season															
Season	Kelvinbridge	St George's Cross	Cowcaddens	Buchanan Street	St Enoch	Bridge Street	West Street	Shields Road	Kinning Park	Cessnock	Ibrox	Govan	Partick	Kelvinhall	Hillhead
Summer 2014	16.9	16.7	17.0	16.8	17.9	17.3	17.2	16.9	17.3	17.0	16.9	16.9	16.9	17.1	17.1
Autumn 2014	18.4	17.1	17.3	17.5	18.1	17.8	17.7	17.2	16.9	16.5	16.5	16.8	16.8	17.0	17.0
Winter 14-15	15.9	15.7	15.7	15.7	15.8	15.2	15.3	15.1	14.5	14.2	13.4	13.5	14.5	14.6	14.7
Spring 2015	16.0	15.9	15.7	15.7	16.1	16.5	16.3	15.2	14.8	13.9	13.6	11.5	15.7	14.9	15.1

station en remplaçant les cinq radiateurs électriques existants. Ce système devrait également fournir un refroidissement en tant que sous-produit pendant les mois d'été. La pompe à chaleur qui a été sélectionnée est une unité monobloc monophasée de 9 kW qui peut accueillir à la fois le chauffage et le refroidissement [34].

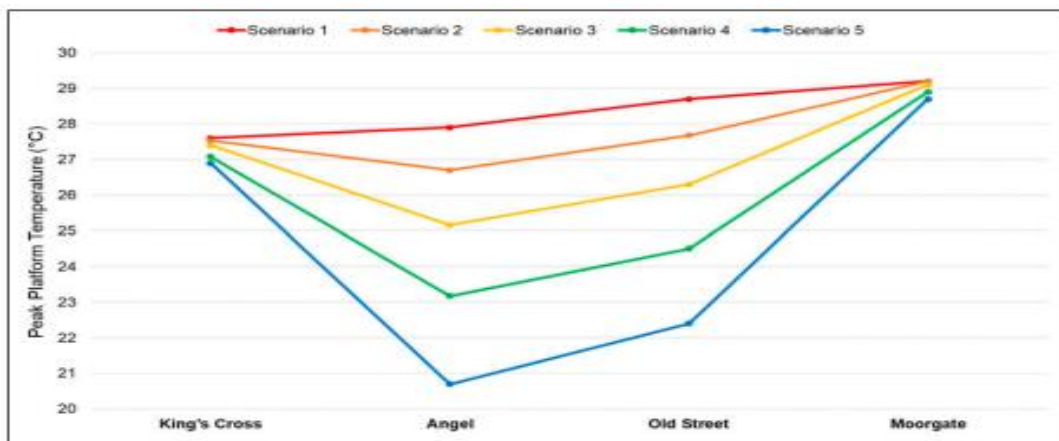
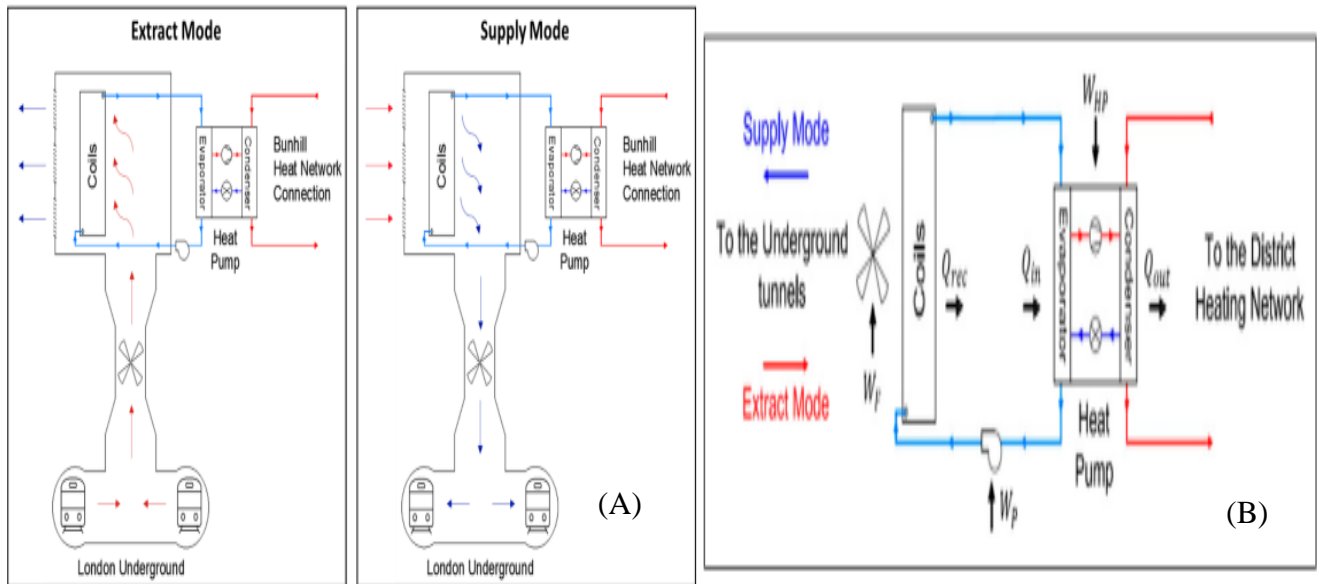


**Figure II. 13:** Variations de température: Glasgow ville et métro [34]

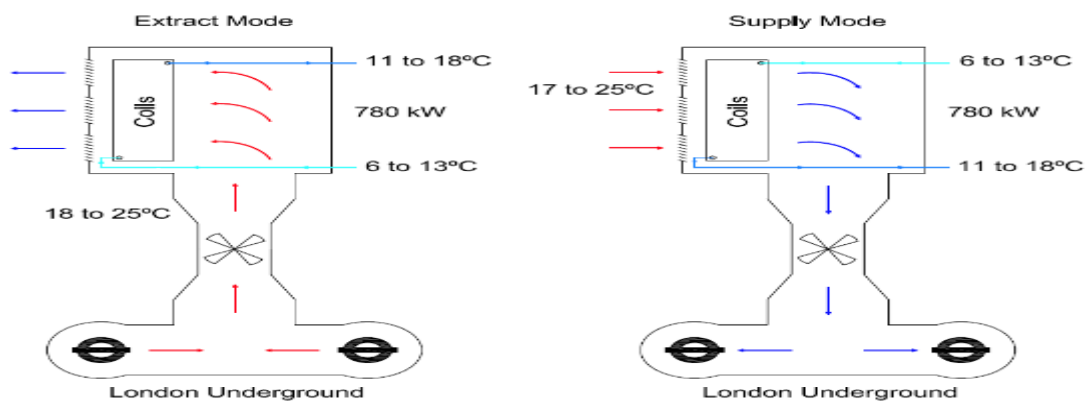
❖ **Les études sur le métro de Islington**

- 1) Cette étude est menée par (Henrique Lagoeiro et al ,2022) pour explorer les impacts du refroidissement sur les tunnels ferroviaires en étudiant l'opportunité de refroidir le métro londonien grâce à la récupération de la chaleur perdue. Le principe c'est d'étudier les performances du système de récupération de chaleur (WHR waste heat recovery) et son avantage de refroidissement associé. Cela à l'aide d'un logiciel Engineering Equation Solver (EES), pour cette étude ils ont utilisé un échangeur de chaleur en serpentin pour récupérer la chaleur, une pompe à chaleur à deux étages qui est conçue pour fonctionner

avec les températures de départ et de retour du réseau de chauffage 75°C et 55°C respectivement avec une efficacité de 50%. Le ventilateur réversible et la pompe à eau ont été modélisés afin d'estimer leur consommation d'énergie. Le modèle peut prédire les états suivants sur la base des paramètres d'admission. Plusieurs scénarios (figure 5) pour estimer des températures en 2030. Les réductions les plus élevées ont été estimées pour le scénario5, Où l'approvisionnement en refroidissement toute l'année pourrait potentiellement réduire les températures maximales de 7,2 K à Angel [35].



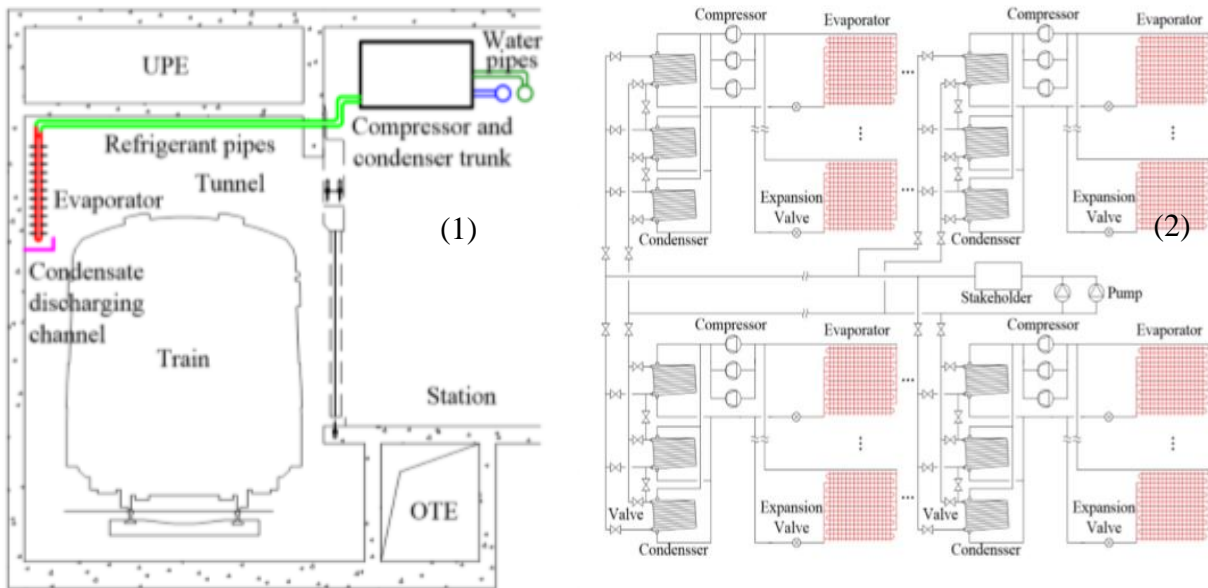
2) une étude similaire de la part de ((Henrique Lagoeiro et al 2019), un système de récupération de chaleur de l'énergie résiduelle du métro de Londres mais ce système est basé sur l'installation d'échangeurs de chaleur air-eau à l'intérieur des conduits de ventilation du métro de Londres. La chaleur captée est envoyée vers une pompe à chaleur pour la porter à une température adaptée à la réutilisation, fournissant une énergie décarbonée au réseau de chauffage urbain local. Les résultats présentent quelques aspects clés de la conception technique de ce nouveau système de récupération et de distribution de chauffage urbain. Son rendement théorique est recherché et comparé au comportement de chauffage antérieur des bâtiments alimentés par le réseau. De plus,des recommandations sont données pour l'introduction de futurs systèmes secondaires de récupération et de réutilisation de la chaleur dans les villes recommandations sont données pour l'introduction de futurs systèmes secondaires de récupération et de réutilisation de la chaleur dans les villes [36].



## 4.2. Métro de chine

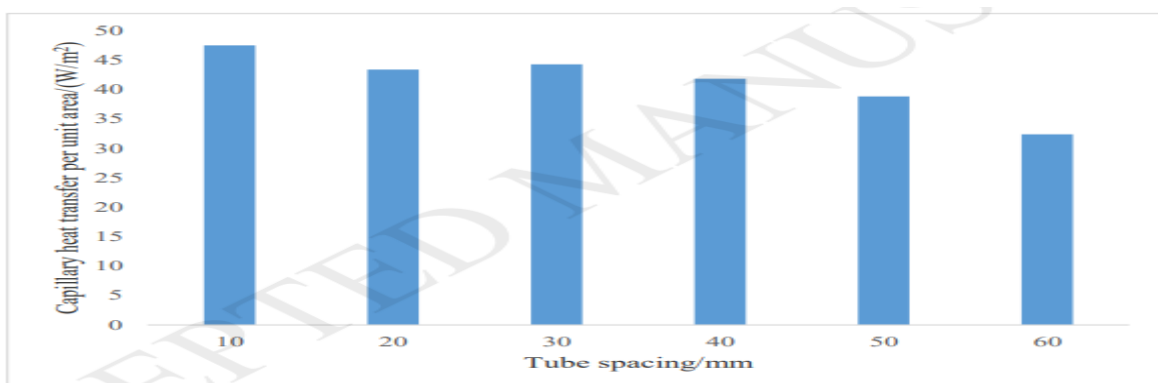
### ❖ Système de récupération de chaleur Air source heat pump

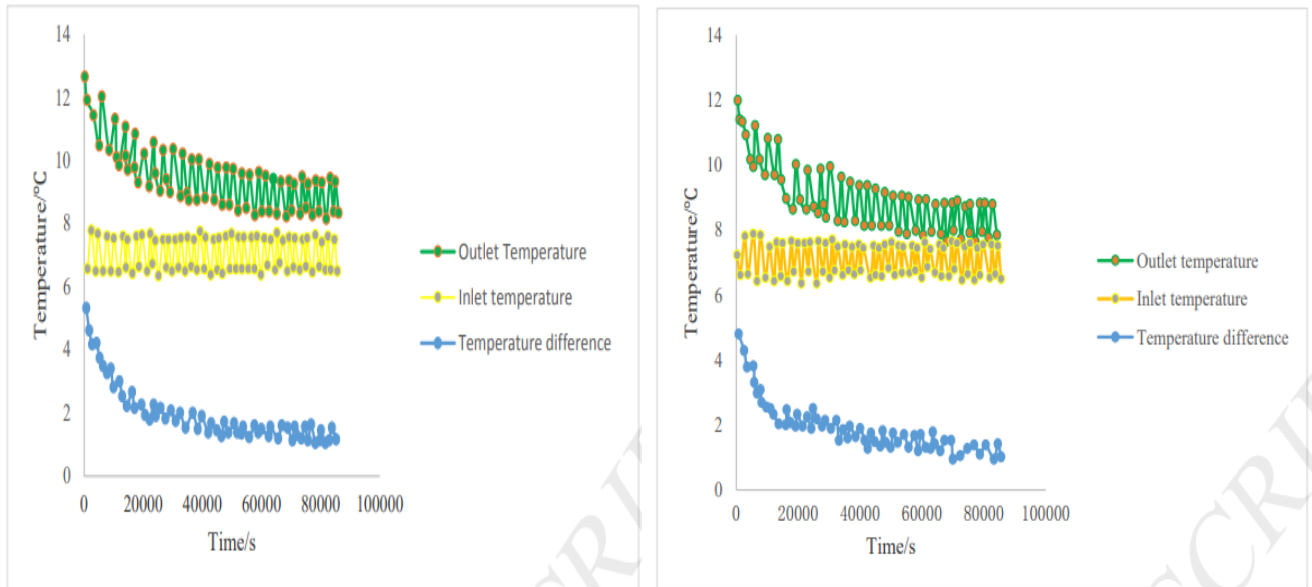
nouveau schéma est proposé dans cette étude (Yongjin Chaia et al ,2017) pour récupérer la chaleur perdue de l'air waste heat recovery systems (WHRS) dans le tunnel du métro et simultanément pour fournir un sous-produit utilisé pour le refroidissement des espaces du métro ASHP (air source heat pump). Ce système de récupération de chaleur résiduelle se compose de quelques pompes à chaleur air/eau modulaires et d'une boucle d'eau pour fournir de l'énergie thermique aux parties prenantes. Correspondant aux conditions d'utilisation du tunnel et de l'énergie, des modes de fonctionnement du système sont recommandés. Deux modes de fonctionnement sont proposés pour s'adapter à différentes utilisations de chaleur. La charge de refroidissement des pompes à chaleur à air pour la station visée est totalement d'environ 312 kW. En tenant compte de la taille des équipements, de la longueur totale des tuyaux de réfrigérant et de la flexibilité des combinaisons correspondantes, 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 compresseurs Scroll sont recommandés pour leur efficacité énergétique élevée à ce niveau de capacité. Le réfrigérant est adopté pour être R22. Compte tenu du niveau de capacité de refroidissement, les compresseurs scroll sont adoptés pour l'efficacité énergétique. Les échangeurs de chaleur hélicoïdaux à double tuyau sont utilisés comme condenseurs de refroidissement par eau pour un coefficient de transfert de chaleur élevé afin d'améliorer l'échange de chaleur et de réduire le volume et le poids de l'équipement. Les détendeurs thermiques sont utilisés comme dispositifs d'expansion pour surveiller le débit et le degré de surchauffe du réfrigérant. 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 pertes de charge locales du réfrigérant à travers un trajet dans un évaporateur sont parcourues par 5 coudes et 2 tés. Le résultat  $\Delta p$  calculé de est de 22,7 kPa. 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. Il s'applique à la fois a et réformé [37].



❖ Etude théorique

Une étude de (Li Tong et al 2019) est basée sur la simulation numérique qui est utilisée pour analyser les caractéristiques de transfert de chaleur de l'échangeur de chaleur capillaire du tunnel de métro posé sur les parois avec différents espacements de tuyaux. Combiné à la régulation et au fonctionnement du système, l'espacement optimal des tuyaux est de 10mm adapté à l'échangeur de chaleur capillaire du tunnel de métro . Grâce à des tests expérimentaux, ils ont conclu que la loi de distribution de la température et les caractéristiques de transfert de chaleur du sable avec l'échangeur de chaleur capillaire étaient enterrées, l'exactitude de la valeur simulée a été vérifiée [38].



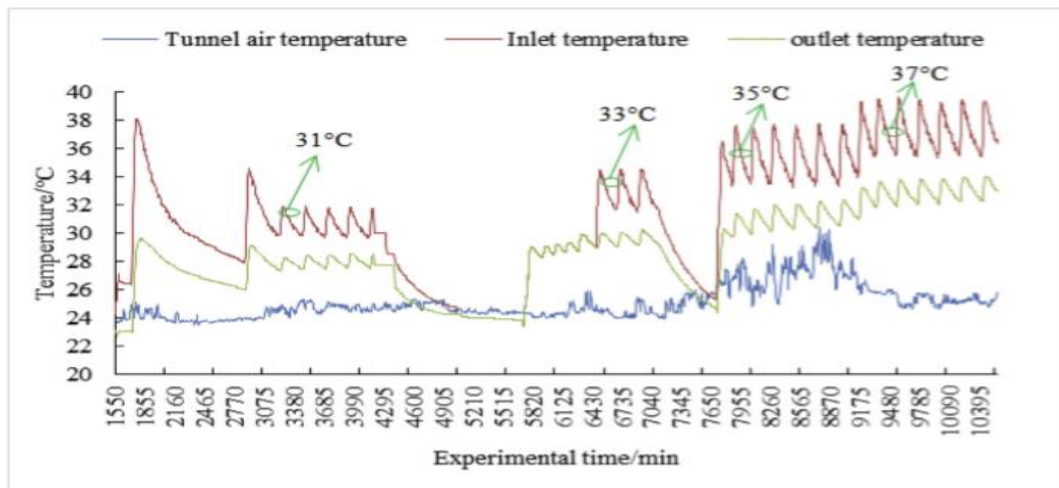
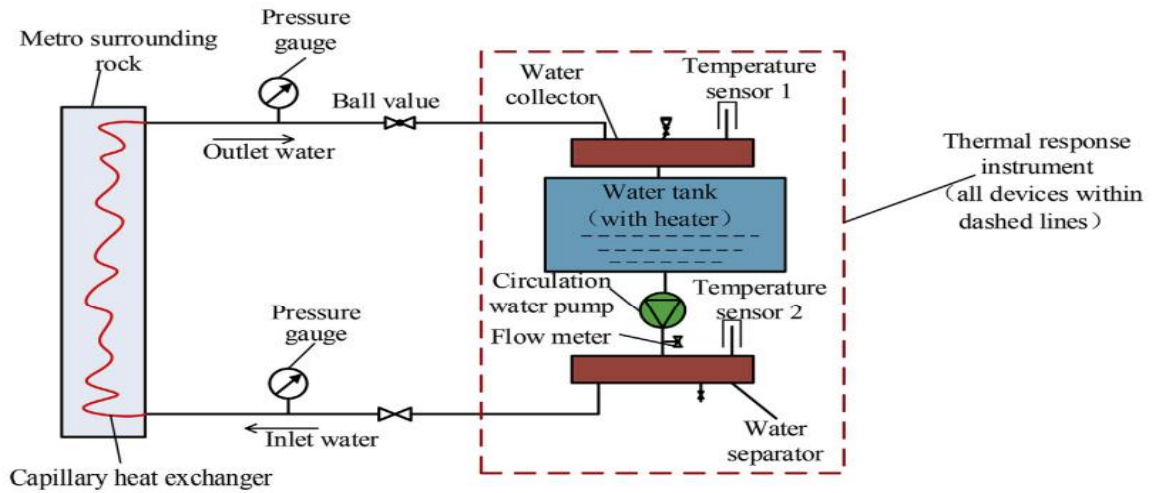


❖ **Etude expérimental sur le métro de Qingdao**

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). Une méthode de calcul de transfert de chaleur à plaques simplifiée unidimensionnelle pour échangeur de chaleur capillaire (CHE) basée sur la source de chaleur de surface. En tenant compte de l'évolution du flux thermique pendant le transfert de chaleur, leur article adopte une charge progressive, un principe de superposition, des économies d'énergie et une méthode itérative pour établir le modèle de transfert de chaleur de CHE. Les tests de transfert de chaleur ont été effectués à la station Zhiquan Road de la ligne R2 du métro de Qingdao pour prouver ce modèle. Les résultats montrent que l'erreur maximale du modèle est de 8,79%. De plus, l'impact de facteurs tels que la température de l'eau d'entrée du CHE, la conductivité thermique du revêtement, la conductivité thermique de la roche environnante et la diffusivité thermique de la roche environnante sur les performances de l'échangeur de chaleur a été analysé. Les paramètres de conductivité thermique de la roche environnante, de conductivité thermique du revêtement et d'autres facteurs qui changent avec la température sont traités comme des valeurs fixes afin de simplifier le modèle de transfert de chaleur, ce qui donne un certain impact sur la précision du modèle. (2) Le modèle de transfert de chaleur proposé dans cet article concerne principalement le CHE qui est posé sur la surface plane de la paroi du tunnel du métro. Ce



n'est pas si précis pour le CHE sur le plafond en arc du tunnel du métro. Cette question sera discutée à l'avenir [39].



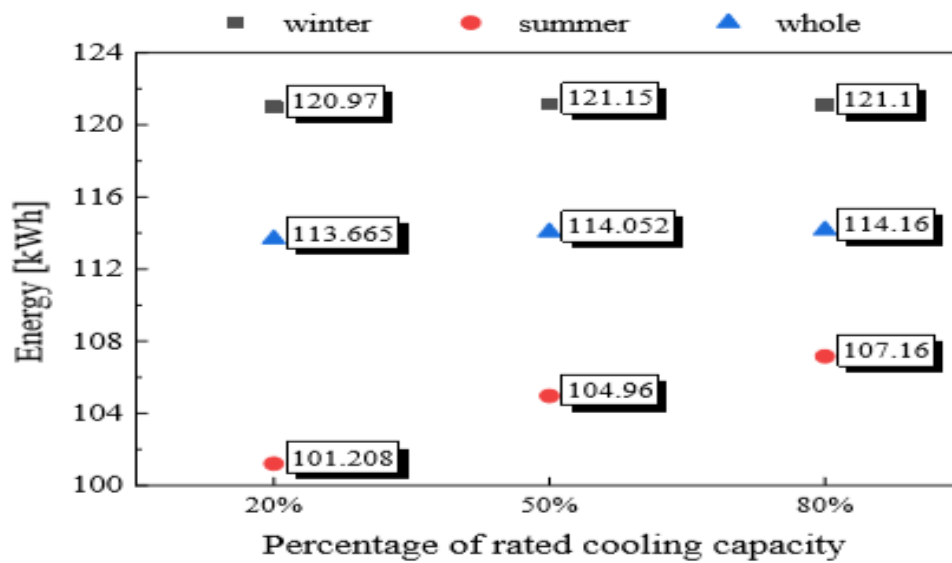
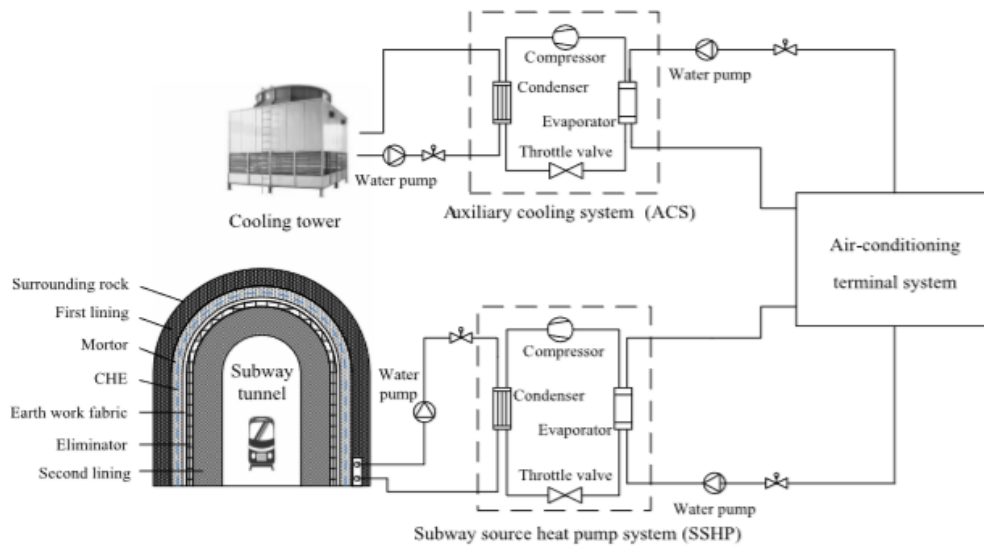
❖ E

### tude Expérimental sur le métro de Qingdao PAC hybride

Pour se bénéficier de la chaleur de métro à grande échelle, **un** modèle de simulation dynamique du système de pompe à chaleur hybride proposé (Zhu Mao et al, 2021) [40], qui inclut le processus de transfert de chaleur entre l'échangeur de chaleur capillaire et la roche environnante, a été développé sur TRNSYS. Des essais sur le terrain ont été menés dans une station de métro de Qingdao (Chine) pour valider ce modèle. Selon différentes stratégies, le coefficient de performance du système de pompe à chaleur hybride et les caractéristiques du champ de température de la roche environnante sont comparées. Les résultats ont indiqué que le système de pompe à chaleur hybride peut assurer une température appropriée de la roche environnante sans surchauffe (de 33,9 °C à 31,3°C). De plus, le coefficient de performance des



unités de pompe à chaleur de métro était de 4,432, augmenté de 2,52%, la consommation d'énergie du système de pompe à chaleur de métro peut être diminuée de 5,55%.

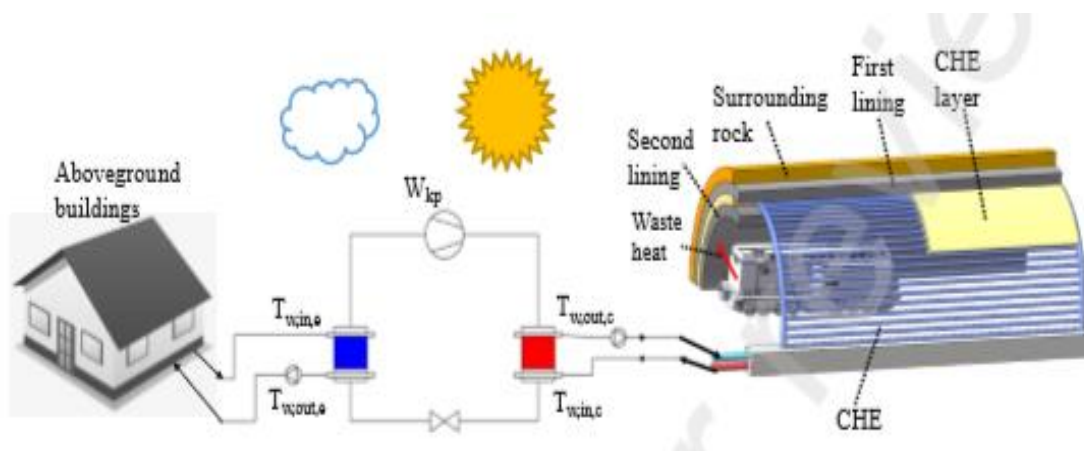


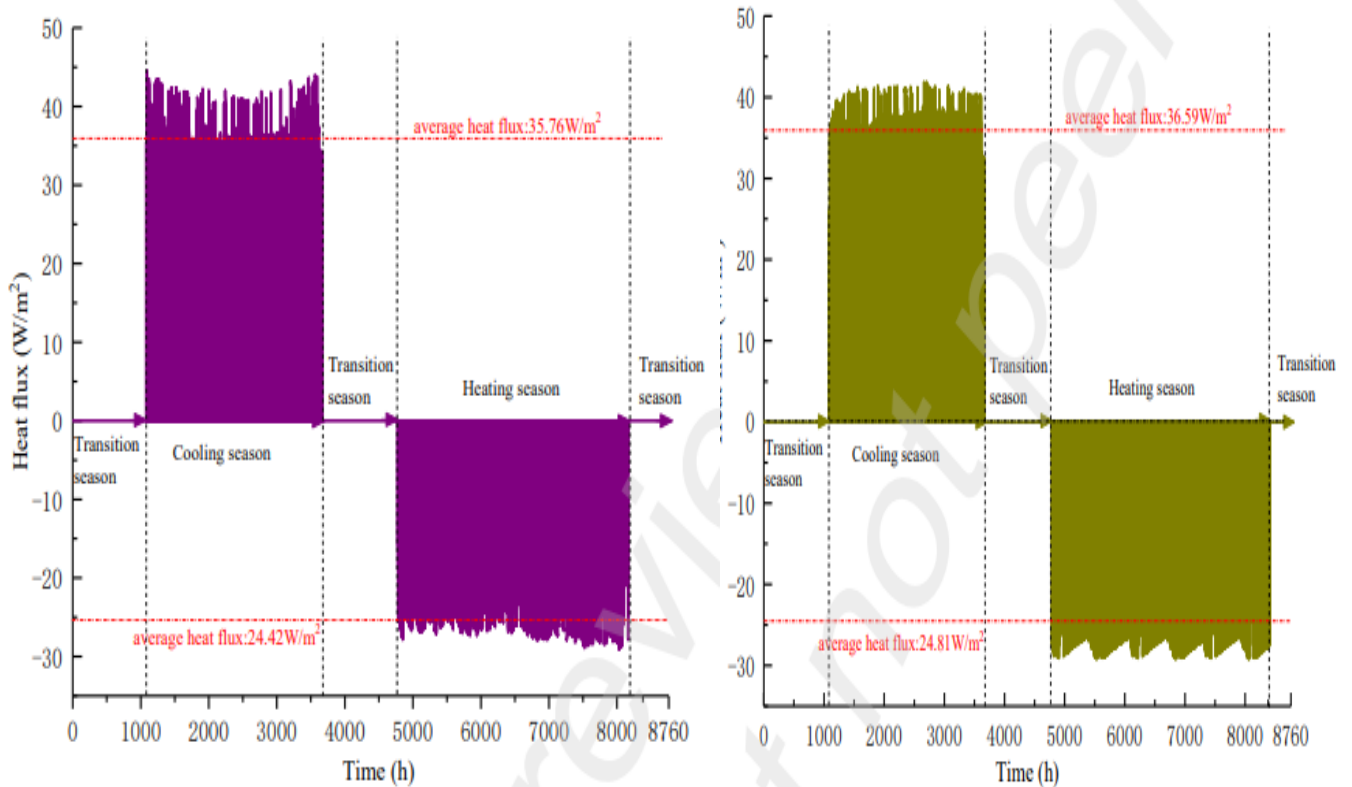
❖ **Etude théorique de la performance à long terme**

Une étude sur une Performance à long terme d'un système de pompe à chaleur souterraine de métro en chine avec deux types d'échangeurs de chaleur frontaux (**Yongming Ji et al ,2023**)[41]. Le système de pompe à chaleur mis en place dans cette étude peut utiliser pleinement la chaleur générée dans le tunnel tout en réduisant l'accumulation de chaleur, ce qui améliore l'environnement thermique du métro.

Après 10 ans de fonctionnement continu, la température annuelle de l'air augmente dans le tunnel avec un échangeur capillaire CHE, Ils sont respectivement d'environ 0,226 °C et 0,324°C.

Au cours des 10 années de fonctionnement du système, la variation du flux thermique de CHE n'est pas significative, à savoir inférieure à 1,24 W/m<sup>2</sup> et 0,36 W/m<sup>2</sup> pendant les saisons de refroidissement et de chauffage, respectivement. Par conséquent, le produit chimique peut maintenir une performance de transfert de chaleur élevée pendant une longue période en continu de fonctionnement. Les résultats de cette étude montrent que le projet de démonstration de SSHPS (subway source heat pump system) conçu dans cette étude peut maintenir un fonctionnement efficace pendant une longue période tout en garantissant que la température de l'air du tunnel de métro se situe dans la plage de conception. La raison principale en est le bilan thermique annuel du tunnel de métro. Il est suggéré que le bilan thermique d'équilibre du tunnel du métro pendant l'exploitation à long terme doit être pris en compte lors de la conception d'un système SSHPS. De plus, d'autres études sont nécessaires pour comparer les résultats de cette étude avec ceux d'autres études similaires afin de vérifier l'efficacité énergétique des SHPS.





(a) Flux de chaleur du CHE plat dans la section à coupe ouverte

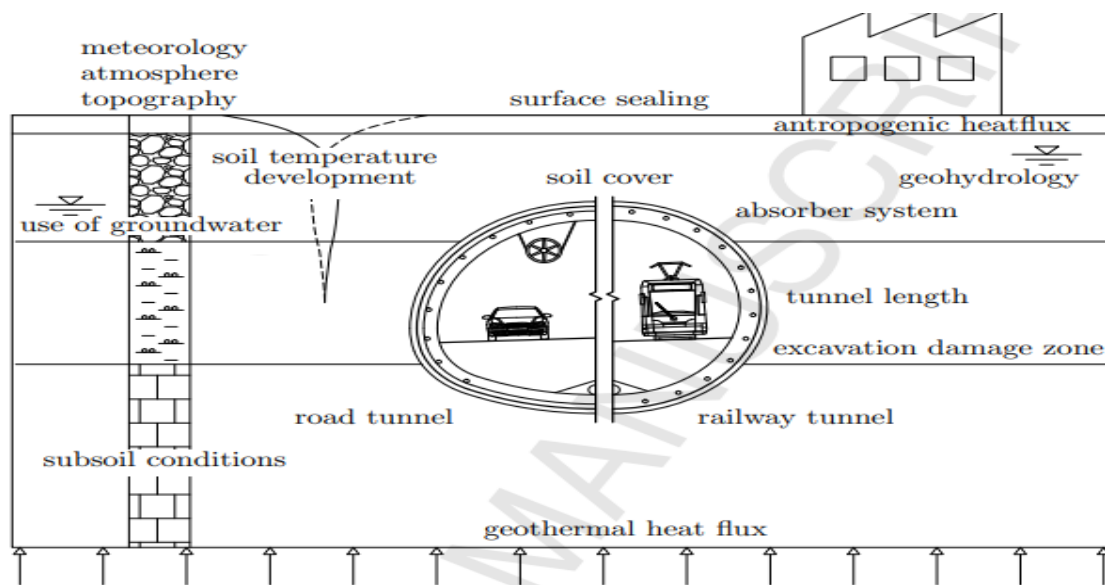
### 4.3. Métro d'Allemagne

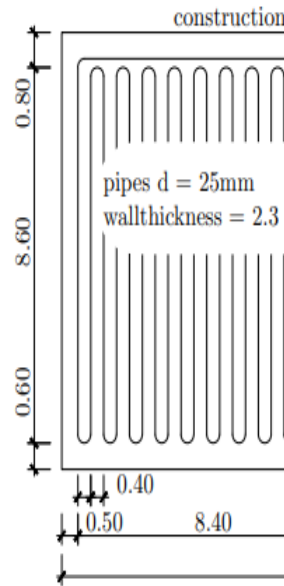
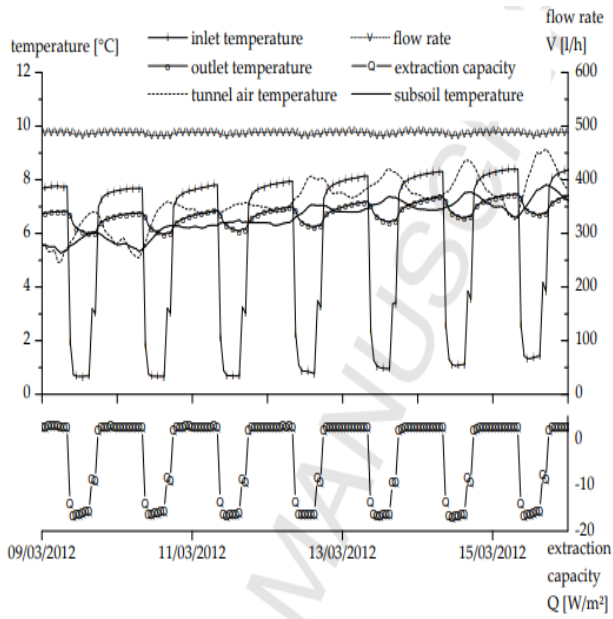
#### ❖ Projet d'un Tunnel géothermiques une expérience allemande avec les énergies renouvelables

(Patrik Buhmann et al 2016 ) [42], ont commencé l'étude de ce projet d'après les résultats de (thumm et al ) qui ont déclaré que le taux d'extraction prévus pour les absorbeurs proches de la surface dans lesquels des échangeurs de chaleur de forage contribue avec une partie de chaleur qui stagne depuis 2010 et cela veut dire les systèmes n'ont souvent pas été atteints . De plus, les coûts d'installation des échangeurs de chaleur à 12 trous sont élevés et l'amortissement prend donc beaucoup de temps, rendant l'application de cette technologie traditionnelle difficile pour l'économie.

Plus Loin 20 études montrent qu'en définissant des paramètres de fonctionnement optimisés et en tenant compte de profils de demande de chaleur réalistes, les taux d'extraction de chaleur pourraient être encore plus haut. Le fonctionnement par intervalles étudié dans le tunnel Stuttgart-Fasanenhof montre que des taux d'extraction considérablement plus élevés peuvent être atteints sans effets négatifs sur la température du sous-sol. La centrale

géothermique doit fonctionner avec un contrôle de la température de sortie afin d'obtenir des taux d'extraction stables pendant le fonctionnement à long terme. Ce contrôle est actuellement mis en œuvre au tunnel Stuttgart-Fasanenhof. Lors de la planification de centrales géothermiques > 30 kW, les effets susceptibles de modifier la température initiale du sous-sol doivent être pris en compte. Le flux thermique initial dans un tunnel a le plus grand effet sur les changements de la température souterraine. La gare de Stuttgart-Fasanenhof tunnel prouve que la liaison du flux de chaleur initial et de la géothermie le fonctionnement du tunnel de l'usine n'a que des effets mineurs sur la température du sous-sol. Le flux thermique anthropique initial et le fonctionnement géothermique doivent être traités différemment en ce qui concerne la réglementation de l'eau. À l'heure actuelle, il n'existe aucun cadre juridique en Allemagne pour de tels cas.. Résumant tous les modes de fonctionnement jusqu'à Avril 2015 densités de flux thermique entre 5 et 30 W / m<sup>2</sup> ont été observés.

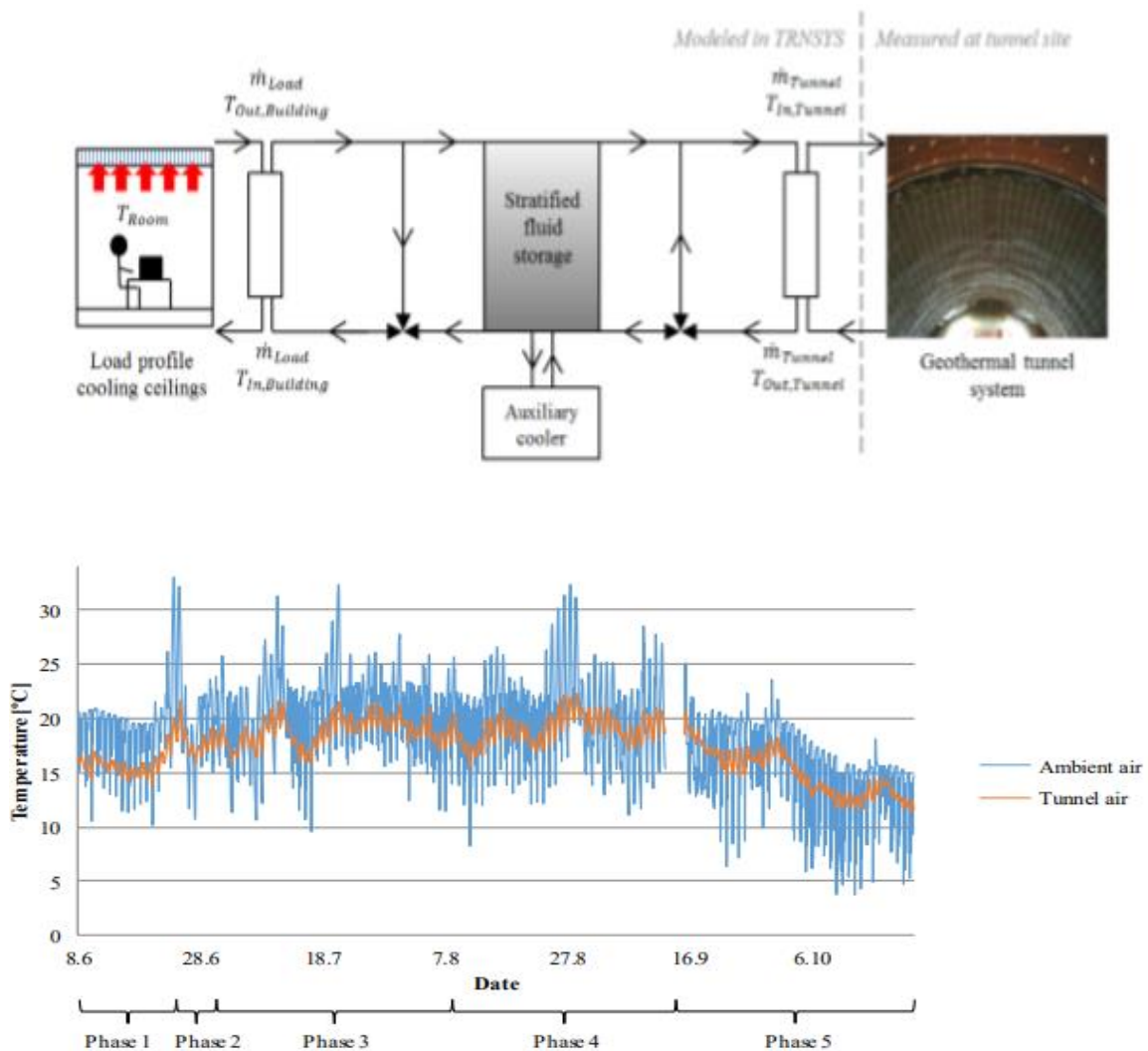




En 2017( Anders Berga et al)[43] ,ont fait une étude sur l'utilisation de la géothermie dans les tunnels du centre-ville, précisément Tunnel de métro Fasanenhof à Stuttgart en Allemagne, une grande quantité d'énergie de refroidissement peut être obtenue par le système de tunnel simplement par refroidissement direct. Le système de tunnel géothermique avait une puissance de refroidissement moyenne de 2,1 kW pour toute la période d'été, ce qui est égal à 6 W par mètre carré de surface d'échange thermique de l'absorbeur. Cela montre un accord avec les chiffres qui prédisaient des taux de prélèvement de 3 à 8 W par mètre carré de surface d'échange thermique d'absorbeur à long terme. Cela montre également que les taux d'extraction plus élevés obtenus lors des premières mesures stationnaires ne sont pas à prévoir sur de plus longues périodes. Cela a pu être vu dans la phase 1 à mesure que le taux de prélèvement diminuait rapidement de sa valeur initiale de 30 W / m<sup>2</sup>. 77% de l'énergie de refroidissement a finalement été fournie par un système géothermique dans le tunnel qui est égal à 6718 kWh. Cela montre aussi qu'il existe une méthode pour augmenter son potentiel, partager et s'implanter dans le secteur de l'énergie. Les résultats déduits sont:

La fluctuation de température est nettement inférieure pour l'air du tunnel par rapport à l'air ambiant. L'air du tunnel est généralement plus froid que l'air ambiant avec une température moyenne de 17,3 °C - 18,9 °C pour la période d'été. Ces résultats montrent que même si beaucoup d'énergie est fournie par l'air du tunnel aux absorbeurs, le niveau de température de l'air du tunnel est plus avantageux que le niveau de température de l'air ambiant. Plus la température est basse autour des sections d'absorbeur, plus l'énergie de

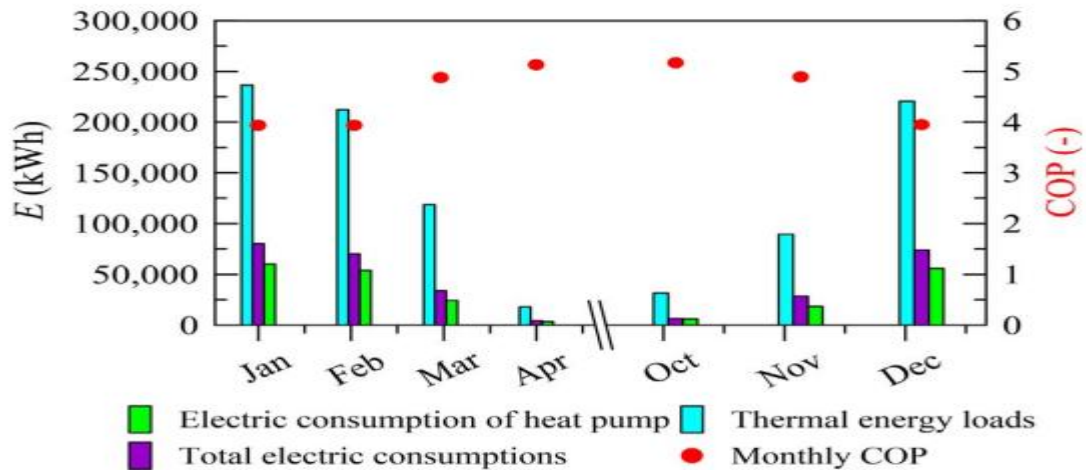
refroidissement peut être utilisée pour le refroidissement direct du stockage thermique et donc du bâtiment.



#### 4.4. Métro de l'Italie

##### ❖ Le tunnel de Brenner

Tinti et al. (2017) [44] ont souligné, que la propagation maximale de la température et la puissance maximale se produisent dans des conditions différentes, car une grande différence de température est obtenue avec un faible débit qui diminue la puissance et vice versa.



### ❖ Un test ENERTUN dans une station de métro Bengasi

En 2018 (Alessandra Insana et al)[45], des chercheurs de Laboratoire Navier paris Tech ont fait leurs modélisation sur deux anneaux énergétiques qui ont été installés pour tester les cycles de chauffage et refroidissement. A partir des deux anneaux, les tuyaux géothermiques rejoignent la station Bengasi en Italie où se situent la pompe à chaleur, le système d'acquisition des données de surveillance et un ventilo-convecteur pour dissiper la chaleur. La partie expérimentale et les études numériques présentées ont essayé de démontrer les opportunités offertes par les tunnels énergétiques et les avantages par rapport à des installations traditionnelles d'une pompe à chaleur.

L'efficacité énergétique doit être étudiée ad hoc pour chaque projet parce qu'elle est étroitement liée aux conditions thermo-hydro-géologiques du site spécifique. Les abaques de calcul peuvent aider dans cette direction dans les phases initiales du projet. Les résultats ont montré que les charges thermiques agissant sur les tunnels dans les sols alluviaux ont des effets mesurables et quantifiables. Cependant, ces effets ne sont pas considérés comme menaçant l'intégrité structurelle ou la fonctionnalité du revêtement. Le défi est de passer vraiment de la théorie à la pratique.



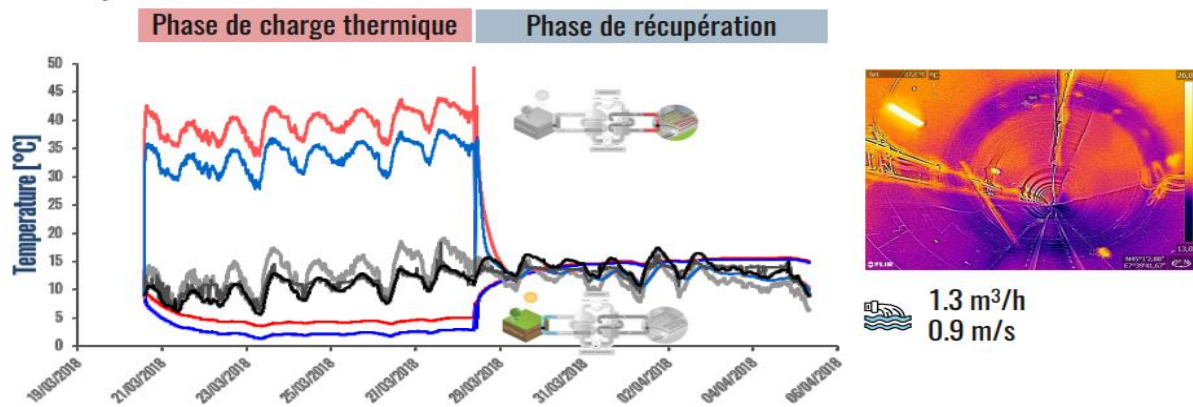


Tableau II. 5: Les performances mesurées (étude expérimentale) [45]

Quantité	Unité de mesure	Valeur
Extraction d'énergie	kWh	601.1
Puissance spécifique par m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	48.3
Puissance spécifique par m	W/m	1135

#### ❖ Etude d'activation thermique d'un tunnel existant

L'utilisation de la géothermie des tunnels (un système géothermique fermé), ou les tuyaux absorbants sont intégrés dans la structure du tunnel, la faible énergie enthalpie est transférée vers ou depuis le sol en faisant circuler un fluide caloporteur à travers les tuyaux (Nicholson, et al., 2013)[46]. (Alex Q Chen et al,2022) [47] Leur rapport porte sur le système géothermique fermé de revêtement de tunnel d'absorption, ci - après dénommé " thermique , l'étude est basé sur la comparaison des tunnel chaud et froid durant la saison hivernal et estival , la variation de la température en fonction de la profondeur ,estimation des taux d'extraction et de rejet de chaleur dans les tunnels , Comparaison avec un forage en boucle fermée et ils parles sur des designs thermiques et le cout considéré.

L'étude a conclu que le tunnel peut être activé thermiquement en utilisant la conception de tunnel thermique existante avec quelques modifications. Des échangeurs de chaleur ou similaires sont nécessaires pour former une rupture hydraulique entre la surface et circuits de tunnels. Sans sources de chaleur dans le tunnel et en ignorant le flux de chaleur naturel de l'air du tunnel vers le sol, le tunnel est un "tunnel froid". Pour qu'un système fermé soit durable, il faut de l'énergie équilibrée, c'est-à-dire que la chaleur extraite par le système doit être équilibrée par rejet de chaleur, le système peut être soit couvrez par intermittence à un faible taux de récupération de chaleur et laissez-le récupérer avec le flux de chaleur de la géothermie et l'air soufflé dans le tunnel ou rejetez active la chaleur dans le système pendant l'été.

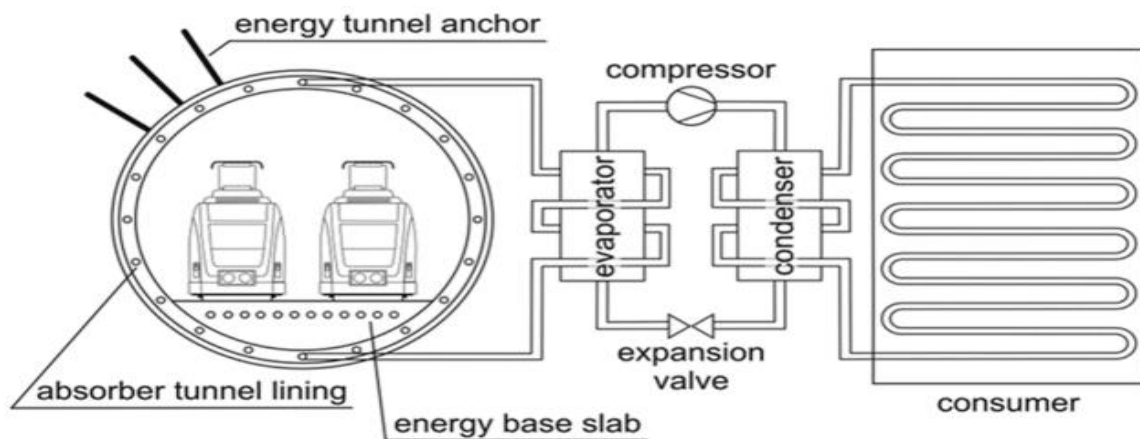


La limite inférieure de la production d'énergie du tunnel thermique est de  $10W / m^2$  , il s'agit probablement d'une sous-estimation car l'éjection d'air ou de chaleur dans le tunnel n'est pas prise en compte. Un tunnel activé thermiquement de 600 m est similaire à celui du 35<sup>nr</sup> forage de 100m en termes de taux d'échange de chaleur au sol. Pour une comparaison similaire, c'est-à-dire que le tunnel doit s'exécuter avec une charge équilibrée, le tunnel peut produire  $20-30W / m^2$ , qui est similaire aux forages GSHP de 70<sup>nr</sup> ou plus.

Les travaux suivants sont recommandés pour approfondir la conception :

Pour effectuer une analyse structurelle à l'aide d'un modèle couplé thermomécanique : le revêtement est dans un champ de contrainte plus important par rapport au tunnel de métro peu profond, effet thermique sur le béton, la doublure doit être évaluée de près. L'analyse couplée thermomécanique (structure du sol) est recommandée.

Raffermir la méthode pour atteindre l'équilibre thermique du système. Il est important d'utiliser le thermique tunnel pour alimenter à la fois le chauffage et le refroidissement du bâtiment. La conception du tunnel thermique est techniquement réalisable. Cependant, CAPEX, OPEX et coût-bénéfice à vie, des analyses sont nécessaires pour fournir la base d'une décision éclairée.

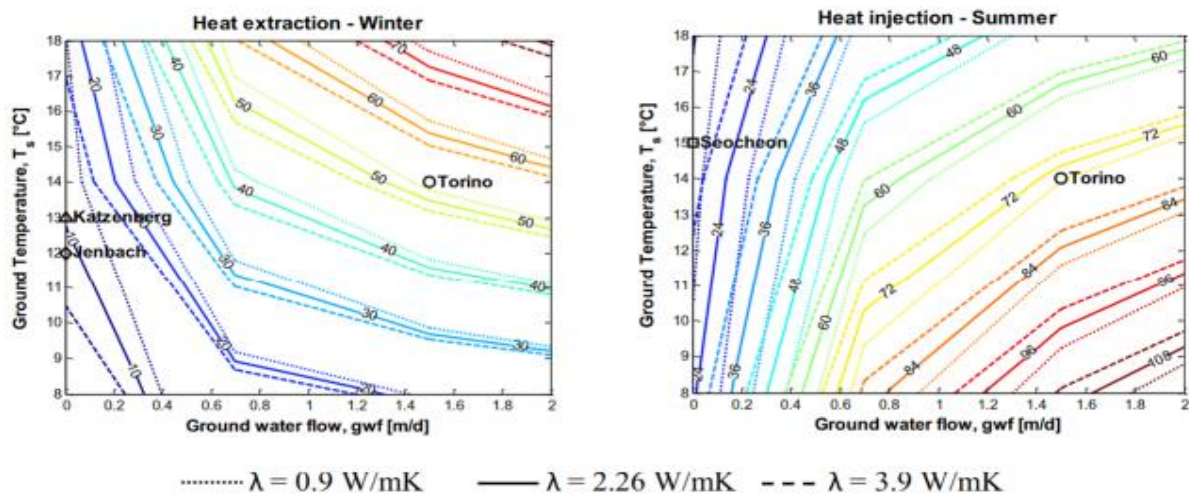


**Figure II. 34:** Le Concept de tunnel thermique (Stemmler, et al., 2022) [47]

**Figure II. 35:** Un diagramme de conception pour estimer le taux d'extraction et de rejet de chaleur pour le tunnel thermique [47]  
**Figure II. 36:** Le Concept de tunnel thermique (Stemmler, et al., 2022) [47]

**Figure II. 37:** Un diagramme de conception pour estimer le taux d'extraction et de rejet de chaleur pour le tunnel thermique [47]

**Figure II. 38:** Essai en mode chauffage réalisé au tunnel de Jenbach [20]  
**Figure II. 39:** Un diagramme de conception pour estimer le taux d'extraction et de rejet de chaleur pour le tunnel thermique [47]  
**Figure II. 40:** Le Concept de tunnel thermique (Stemmler, et al., 2022) [47]



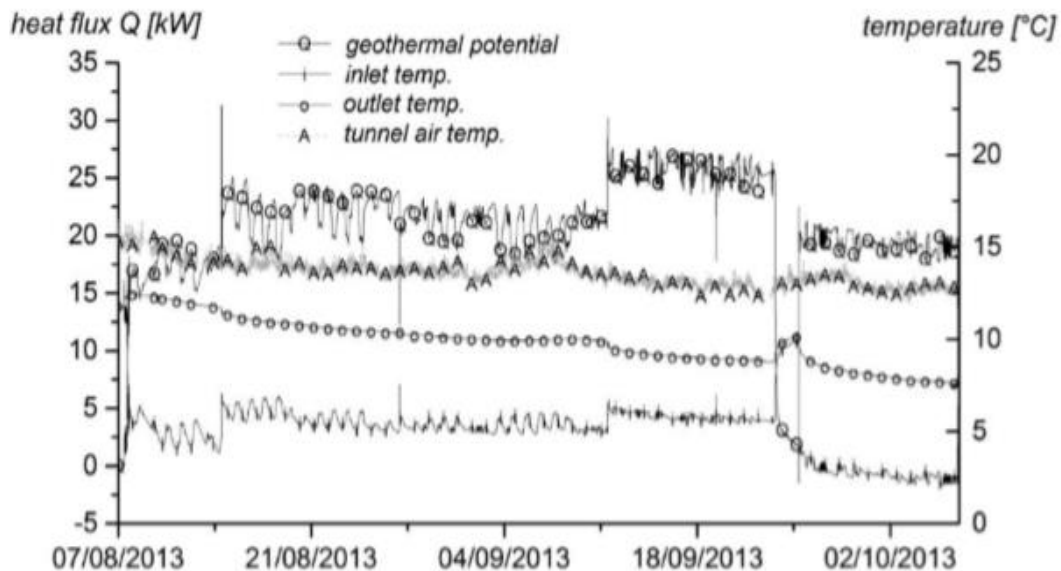
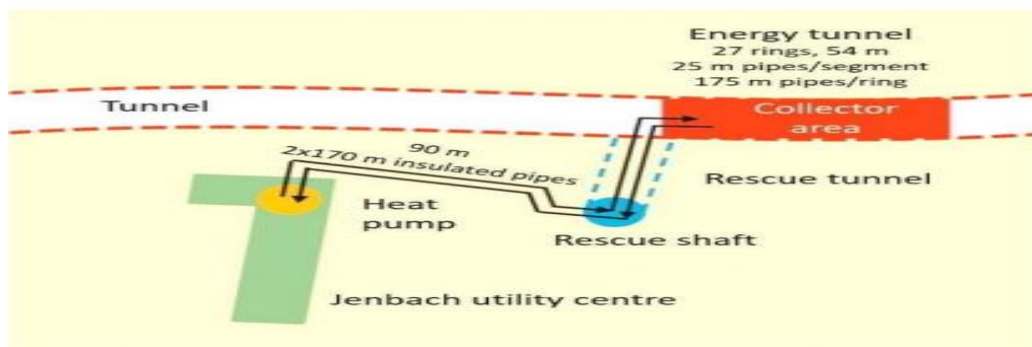
#### 4.5. Tunnel de l'Autriche

##### ❖ Projet de Tunnel de Jenbach en Autriche

La durée totale de ce projet de démonstration a été déduite des résultats de l'essai sur le terrain au tunnel de Katzenberg, produisant 10-20 W/m<sup>2</sup>. Pour un tunnel de 12 m de diamètre intérieur, environ 55 m ont été nécessaires pour fournir 40 kW en supposant COP = 4. Le schéma du projet de démonstration est illustré à la figure 2.16. Huit capteurs de température ont été installés dans la ligne et deux étaient dédiés à l'enregistrement de la température de l'air du tunnel. Entrée et sortie les températures, ainsi que le débit ont également été mesurées. Les principaux résultats de la surveillance sont rapportés dans (Moormann et al) en 2016, qui précisent que par rapport au tunnel Stuttgart-Fasanenhof, ici, le principal mécanisme de transport de chaleur est la convection.

Un exemple de test de mode de chauffage effectué entre août et octobre 2013 indique un flux de chaleur de 20-25 kW correspondant à environ 12,5 W/m<sup>2</sup>, pour des entrées de températures comprises entre 2,5 et 5,5°C. Ils ont également fait varier le débit de fluide entre le laminaire et la gamme turbulente et a observé une augmentation de 60% des performances, de 10 à 16 W/m<sup>2</sup> à températures d'entrée de 6°C. Des taux plus élevés sont attendus à des températures

d'alimentation plus basses ( $18-40 \text{ W/m}^2$ ) ont été calculés pour un tunnel chaud avec  $25^\circ\text{C}$  comme température de l'air du tunnel,  $10^\circ\text{C}$  pour le sous-sol et  $5^\circ\text{C}$  pour l'entrée). Les indicateurs de taux plus élevés en régime turbulent étaient les plus prononcés refroidissement des segments (moins de  $8^\circ\text{C}$  par rapport au cas laminaire de  $10^\circ\text{C}$ ) et la réduction écart entrée-sortie ( $3^\circ\text{C}$  contre  $6^\circ\text{C}$ ) puisque le temps de séjour du fluide diminue. La demande de chauffage de 100 à 150 maisons pourrait être satisfaite en activant thermiquement un 500 m de long pour la section [20].



## 4.6. Tunnel de métro de la Pologne

### ❖ Projet de Varsovie

En 2020 le but de (Barallis et al) [48] est d'évaluer le potentiel géothermique de la ligne de métro comme celui de Varsovie qui ont estimé la puissance thermique livrable de l'énergie provenant de l'activation de ce dernier . Les résultats démontrent que l'activation thermique des deux tunnels de 1,6 km de long pourrait échanger jusqu'à 5,3 GWh et 5,8 GWh en saison de chauffage et de refroidissement, respectivement. De plus, l'influence des conditions géologiques locales sur le taux de chaleur échangeable a été étudiée. . La particularité de l'étude réside dans la définition d'un certain nombre de sections représentatives le long de la ligne, homogènes en termes des paramètres géothermiques, puis en étendant les résultats obtenus à la durée d'occurrence de ces rubriques. Il en est résulté que plus de 11 bâtiments pouvaient être

Desservis par l'activation thermique de la ligne longue de 1651 m.

**Tableau II. 9:** échange de chaleur prévu à partir de l'activation thermique du prolongement nord-est de la ligne 2 du métro de varsovie [48]

Section	Model kind	Heating exchange rate: W/m <sup>2</sup>	Cooling exchange rate: W/m <sup>2</sup>	Length: m	Average heating power: kW	Average cooling power: kW
1	3	13-617	36-550	288	170	456
2	1	13-169	29-491	288	164	368
3	2	15-191	42-111	161	106	293
4	2	15-191	42-111	322	212	587
5	2	15-191	42-111	161	106	293
6	3	13-617	36-550	108	64	171
7	2	15-191	42-111	216	142	394
8	2	15-191	42-111	108	71	197
Total: kW					1035	2761
Seasonal heat exchanged: MWh					2161	5765
Deliverable thermal energy by heat pump: <sup>a</sup> MWh					2882	7687
Serviceable surface to be heated/cooled: <sup>a</sup> m <sup>2</sup>					38 319	—
Serviceable buildings <sup>a</sup>					11	—

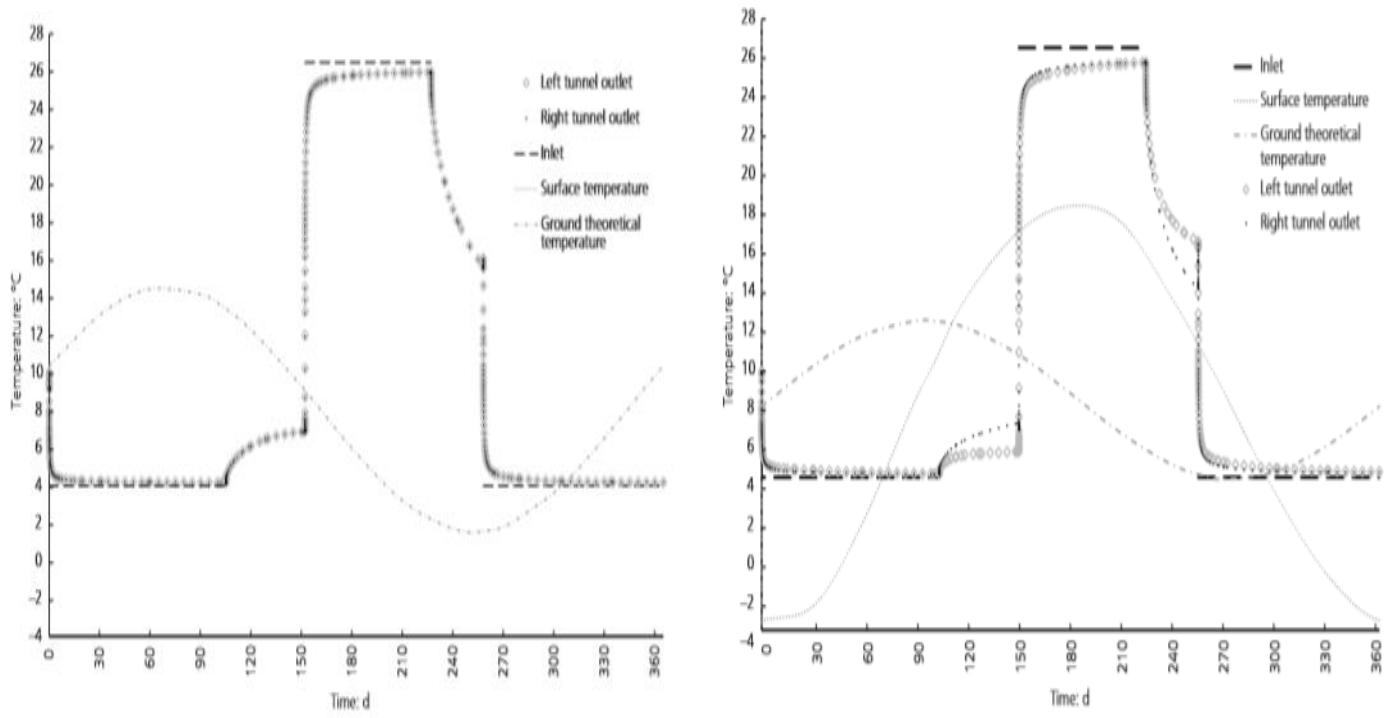


Figure II. 47: les températures d'entrée et de sortie résultantes du model (A) clayey ,model (B) sandy [48]

Figure III. 2: situation de la ville dans la Wilaya d'Alger  
 Figure II. 48: les températures d'entrée et de sortie résultantes du model (A) clayey ,model (B) sandy [48]

## 5. Conclusion

La récupération de la chaleur du métro peut être réalisée en utilisant différentes technologies et modèles. Le captage géothermique en parois moulées de stations de métro est un modèle de récupération de chaleur. Il consiste à utiliser les structures des tunnels et des ouvrages du métro, tels que les pieux, les radiers et les parois moulées, pour capturer la chaleur géothermique. Cette chaleur est ensuite utilisée en conjonction avec une pompe à chaleur.

Certains projets de métro envisagent également l'utilisation de différents types et technologies des échangeurs de chaleur pour exploiter l'énergie géothermique du sous-sol. Ces échangeurs permettent de récupérer la chaleur emmagasinée naturellement par le sol et de l'utiliser pour le chauffage ou le refroidissement des bâtiments.

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

### 1. Introduction

Le calcul des besoins de chauffage d'un bâtiment est une étape cruciale dans la conception d'un système de chauffage efficace. Une fois que la puissance de chauffage a été calculée, il est possible d'accorder le système de chauffage à un système de récupération de chaleur de mètres selon une technologie et un modèle précis. Dans ce chapitre nous allons explorer les différentes méthodes de calcul pour les besoins de chauffage d'un bâtiment, dimensionnement des différents éléments d'un système de récupération de chaleur selon le modèle de MICAH, un ventilateur, un échangeur thermique et une pompe à chaleur, pour la dernière partie on propose un autre type d'échangeur grâce à différentes corrélations on détermine le coefficient d'échange global et la surface d'échange et les paramètres qui influent sur la température de sortie de l'eau froide.

### 2. Etude thermique du Bâtiment

#### 2.1. Présentation du cas d'étude

Notre projet s'est porté sur la ville d'Hussein Dey à Alger

##### 2.1.1. Présentation de la ville

Hussein Dey doit son nom au dernier dey le (28e) d'Alger : le dey Hussein. Il avait installé sa maison de campagne à proximité des plages de la banlieue d'Alger, cette ville est située à 10Km du centre de la ville dans la demi-couronne de la baie d'Alger.

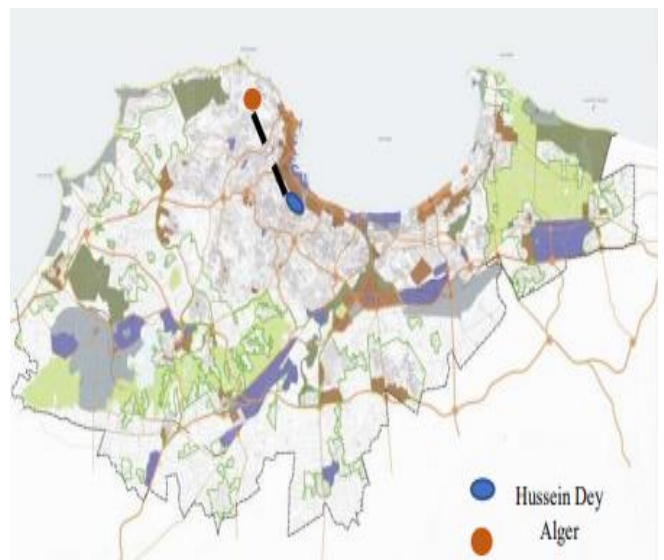
Les communes qui limitent la ville :

**Au nord** par la mer.

**Au Sud** par El Magharia et Kouba.

**A l'est** par la commune d'El Harrach.

**A l'ouest** par la commune d'El Hamma.



**Figure III. 3:** situation de la ville dans la Wilaya d'Alger

**Figure III. 4:** Classification de la ville d'Hussein Dey (Alger) selon la classification thermique du DTR  
**Figure III. 5:** situation de la ville dans la Wilaya d'Alger

Hussein Dey se trouve à l'intérieur de la plaine côtière qui est caractérisée par de très faibles pentes ,elle s'animent en allant vers l'Est sans dépasser les 5%, elle s'élève de la cote 0 au niveau de la mer , elle est desservie par 3 stations du Métro d'Alger : Les Fusillés, Cité Amirouche et cité Mer et Soleil.

### 2.1.1.1. Données climatiques de la ville d'Alger

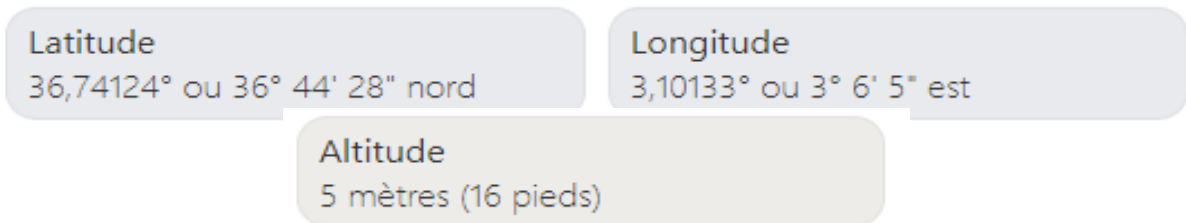


Figure III. 6: Classification de la ville d'Hussein Dey (Alger) selon la classification thermique du DTR

Tableau III. 1: classification de la ville de Hussein Dey

<b>16 Alger</b>	<b>Toutes les communes</b>	<b>Zone A</b>
---------------------	----------------------------	-------------------

### 2.1.1.2. Caractéristiques météorologiques de la ville en période hivernale

Tableau III. 2: caractéristiques climatiques de la région d'Alger

Caractéristiques climatiques moyennes par zone	Caractéristiques climatiques du mois le plus froid (janvier)	
	Tmin °C	Tmoy °C
	10	11
Zone A	Température de base °C	
< 300m	6	
300 à 500m	3	
500 à 1000m	1	
>1000m	-1	



### 2.1.2. Présentation du site



Figure III. 9: OPGI cité Amirouche Hussein Dey

- La vérification de conformité des logements et l'étude de calcul des besoins de chauffage ont été faites sur un bâtiment de 16 logements au niveau de l'OPGI de Hussein Dey.
- Le site est délimité par :
  - \*Au nord : habitation individuelle et une crèche. \*Au sud : station de métro
  - \* A l'est habitation individuelle. \* A l'ouest : passage routier.

### 2.1.3. Description du bâtiment

Notre étude s'est portée sur un bâtiment R+8 de 16 logements F+4, situé à Hussein Dey à environ 60 m de la station de métro Amirouche.

Le Bâtiment de plusieurs étages identiques contient deux appartements par palier :

Chaque niveau comprend : un séjour, 3 chambres, cuisine, hall, Sdb, WC.

La toiture est une terrasse inaccessible.



### 2.1.3.1. Présentation des plans

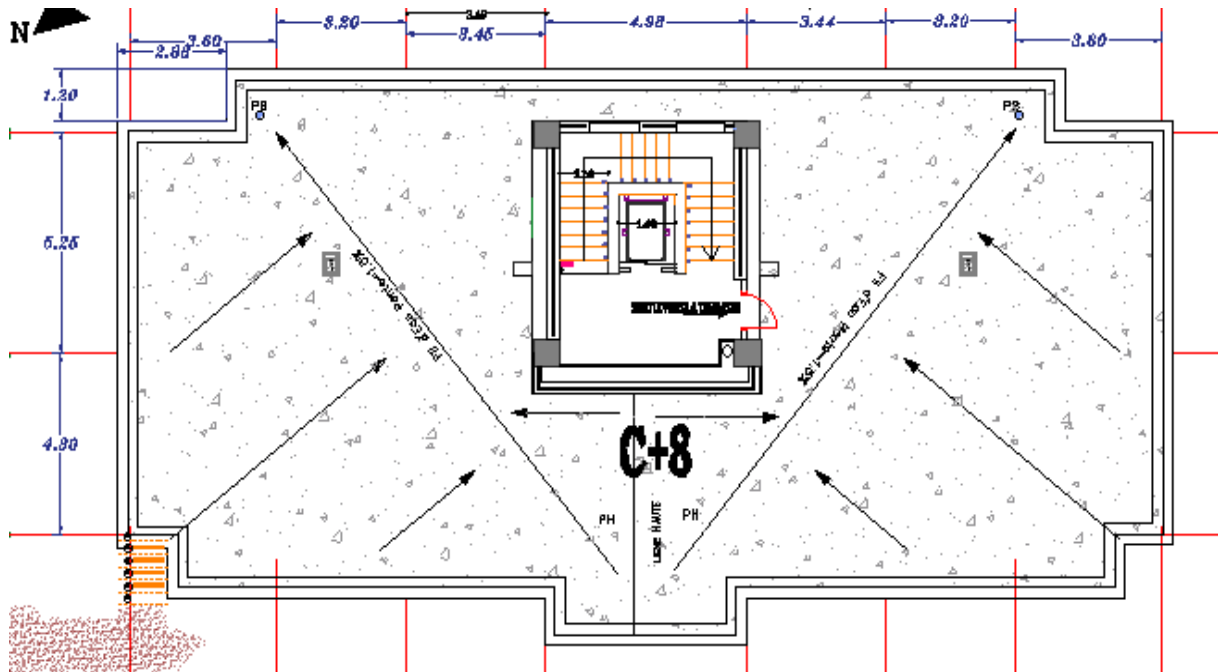


Figure III. 10: plan de la toiture

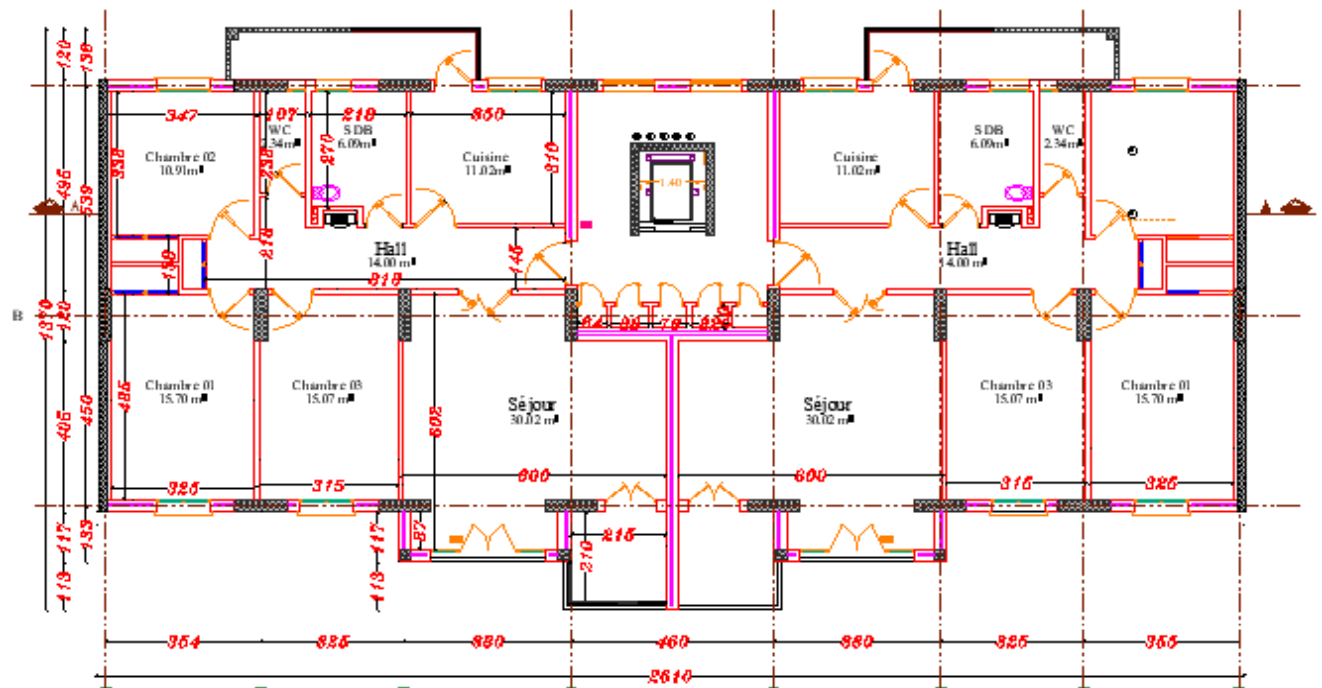


Figure III. 13: plan de tous les étages

Figure III. 14: plan du rez- de- chaussée Figure III. 15: plan de tous les étages

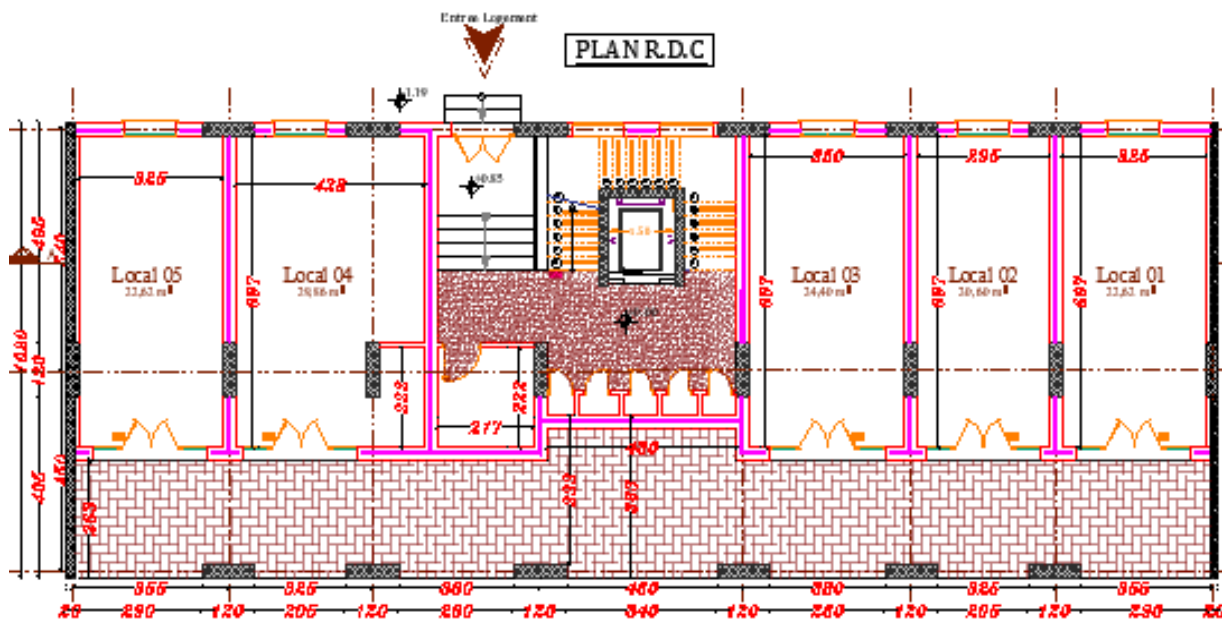


Figure III. 16: plan du rez- de- chaussée

Figure III. 17: scénario d'occupation Figure III. 18: plan du rez- de- chaussée

### 2.1.3.2. Constitution des parois Horizontales et verticale

Tableau III. 3: les résistances thermiques des parois

#### Paroi verticale extérieure en Brique

Désignation	Epaisseur (m)	$\Lambda w/mK$	Résistance $m^2.K/W$
Mortier extérieur	0.02	0.35	0.06
Brique creuse	0.1	0.47	0.22
Lame d'air	0.08	0.062	0.13
Brique creuse	0.1	0.47	0.22
Enduit intérieur	0.02	0.35	0.06
total			0.69

#### Paroi verticale en Béton

Désignation	Epaisseur(m)	$\Lambda w/mK$	Résistance
-------------	--------------	----------------	------------

			$m^2.K/W$
Enduit extérieur	0.02	1.15	0.017
Béton	0.26	1.75	0.15
Enduit intérieur	0.02	0.35	0.05
total			0.22

**Paroi horizontale plancher courant**

Désignation	Epaisseur(m)	$\Lambda w/mK$	Résistance $m^2.K/W$
Hourdi	0.16	1.23	0.13
Béton	0.04	1.75	0.023
Mortier	0.04	1.15	0.035
Carrelage	0.02	1.7	0.012
total			0.20

**Paroi horizontale terrasse inaccessible**

Désignation	Epaisseur(m)	$\Lambda w/mK$	Résistance $m^2.K/W$
Hourdi	0.16	1.23	0.13
Béton	0.04	1.75	0.023
Mortier	0.04	1.15	0.035
Lave vapeur	0.001		
total			0.188

**2.2. La vérification thermique réglementaire**

La vérification thermique réglementaire se fait par rapport au DTR (Document Technique Réglementaire) Algérien. Cette vérification est faite pour la période de chauffage (Hiver)

La vérification se fait pour le logement qui se trouve au niveau du dernier étage.

La température de consigne est de 20°C en hiver

### 2.2.1. Période Hivernale

Le DTR préconise la vérification suivante  $DT < 1.05 \text{ Dréf}$

Les déperditions de référence sont calculées

$$D_{ref} = a.S1 + b.S2 + c.S3 + d.S4 + e.S5$$

Les coefficients a, b, c, d, e sont donnés dans le tableau 1 ils sont en fonction de la Zone climatique A (Alger) et du type de logement (logement collectif)

$S_i$  = surface en contact avec l'extérieur

**Tableau III. 4:** les coefficients en fonction de la zone A et les surfaces des différentes parois du logement [9]

a	b	c	d	e
1.10	2.20	1.20	3.5	4.5
S1	S2	S3	S4	S5
148	148	87.17	2.8	13.74

### 2.3. Le calcul des déperditions thermiques

Le calcul se fait pour les logements du dernier et premier étage.

Selon le DTR Algérien :

- Déperditions surfaciques par transmission à travers les parois

$$D_s = K \times A \text{ [W/°C]} ,$$

- K (en W/m<sup>2</sup>. °C) est le coefficient de transmission surfacique (appelé aussi conductance) ;

- A (en m<sup>2</sup>) est la surface intérieure de la paroi.

- Déperditions à travers les ponts thermiques

$$D_I = 0.20 \times \sum (K \times A) \text{ [W/°C]}$$

- Déperdition par renouvellement d'air

$$D_R = 0.34 \times (Q_v + Q_s)$$

$$D_R = 0.34 \times (Q_v + Q_s)$$

$$Q_v = \text{Max} [0,6 \times V_h ; Q_{v\text{réf}}]$$

$$\text{Volume habitable} > Q_{\text{réf}}, V_h = 280,72 \times 3.2 \times 8 = 7186,43 \text{ m}^3$$

$$Q_v = 4311,85 \text{ [W /°C]}$$

$Q_s$  (Débit supplémentaire du a l'effet de vent)

$$Q_s = 310,4 \times 8 = 2483,2 \text{ [W /°C]}$$

$$D_R = 2310,31 \text{ [W /°C]}$$

## 2.4. Puissance de chauffage à installer

### 2.4.1. Puissances de chauffage calculé avec le DTR

La puissance totale de chauffage installée pour un logement ne doit pas être inférieure aux déperditions de base (du même logement). Théoriquement, il suffirait d'une puissance utile installée égale aux déperditions de base (DB) pour être en mesure d'assurer à l'ambiance intérieure la température désirée. Dans la pratique, compte tenu de l'inertie du bâtiment (air et parois), et compte tenu des pertes calorifiques dues au réseau de tuyauteries, la puissance fournie par une chaufferie doit être supérieure à DB [9].

Calcul de la puissance de chauffage :

La puissance de chauffage Q nécessaire pour un logement est donnée par :

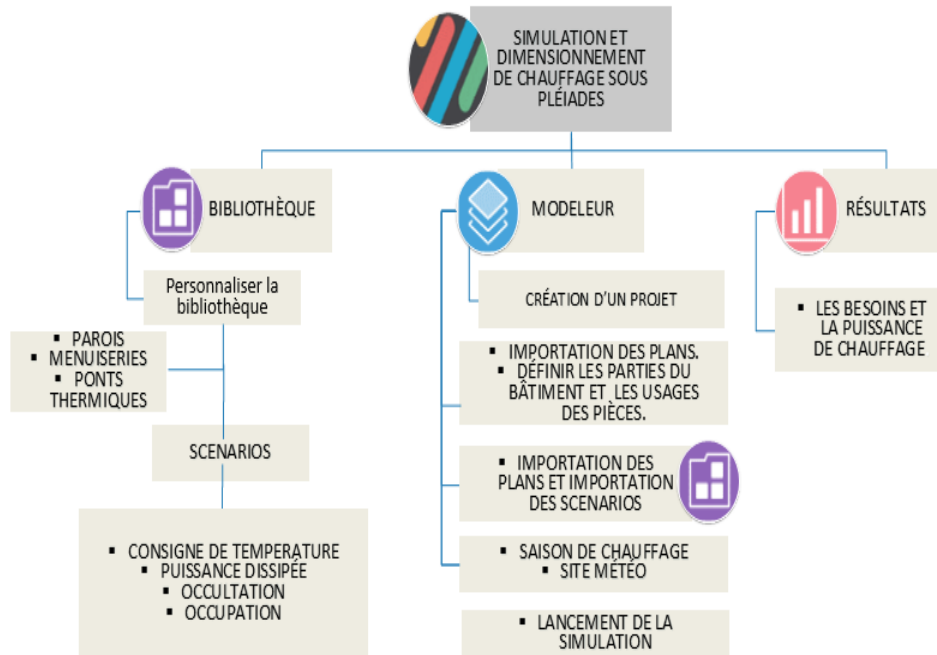
$$Q = [t_{bi} - t_{be}] \times [(1 + \text{Max}(cr ; cin)) DT] + [(1 + cr) \times DR] \text{ [W]} \quad (5,2.9) \text{ du DTR [9] où :}$$

- $t_{bi}$  (en °C) représente la température intérieure de base,
- $t_{be}$  (en °C) représente la température extérieure de base,
- DT (en W/°C) représente les déperditions par transmission du logement,
- DR (en W/°C) représente les déperditions par renouvellement d'air du logement,
- Cr (sans dimension) est un ratio estimé des pertes calorifiques dues au réseau de tuyauteries éventuel, **0,005**
- cin (sans dimension) représente un coefficient de surpuissance. **0,15**

### 2.4.2. La puissance de chauffage calculé avec pléiades

Pléiades est un logiciel polyvalent qui permet de réaliser des simulations et des conceptions, des calculs réglementaires et de dimensionner les équipements. Il dispose d'une bibliothèque complète et s'intègre dans un processus BIM de niveau 2a. Il permet également d'anticiper la consommation énergétique et les risques d'inconfort en toutes saisons et dans notre cas précisément il sert à identifier les besoins de chauffage et la puissance de chauffage.

La



simulation est faite pour la saison hivernale pour 6 mois de chauffages.

### ➤ Scénario d'occupation

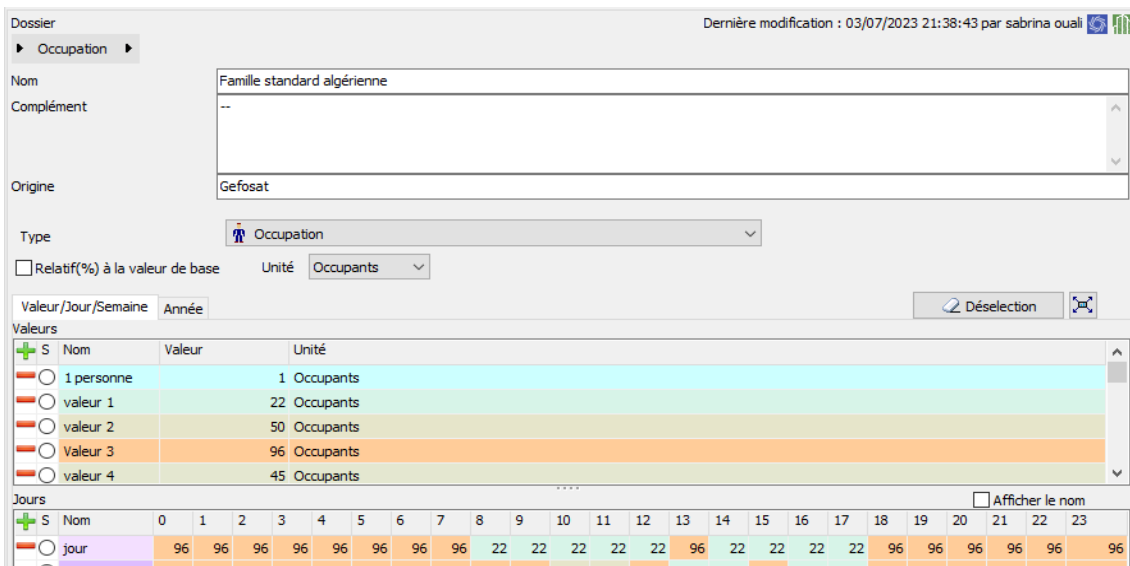


Figure III. 19: Organigramme de méthodologie de simulation sous pléiades

Figure III. 20: Organigramme de méthodologie de simulation sous pléiades

Figure III. 21: scénario d'occupation

➤ **Scénario d'occultation**

Dossier Dernière modification : 26/05/2023 12:31:34 par sabrina ouali

► Occultation ► volets b hiver ►

Nom Volets ba hiver

Complément

Origine NRT2000

Type  Occultation

Relatif(%) à la valeur de base Unité %

Résistance thermique additionnelle 0.25 m<sup>2</sup>.K/W  Appliquer également à la partie opaque de la paroi

Valeur/Jour/Semaine Année [Désélection]

Valeurs

+ S	Nom	Valeur	Unité
<input type="radio"/>	Fermé	50	%
<input type="radio"/>	fermé	100	%

Jours  Afficher le nom

+ S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<input type="radio"/>	Jour	100	100	100	100	100	100	100	100	50	50	50	50	50	100	100	100	50	50	100	100	100	100	100	100

Figure III. 24: scénario d'occupation

➤ **Consigne de température**

Dossier Dernière modification : 03/07/2023 15:36:21 par sabrina ouali

► Consigne de température ►

Nom CONSIGNE hiver th

Complément

Origine

Type  Température

Relatif(%) à la valeur de base Unité °C

Valeur/Jour/Semaine Année [Désélection]

Valeurs

+ S	Nom	Valeur	Unité
<input type="radio"/>	Valeur	20	°C

Jours  Afficher le nom

+ S	Nom	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<input type="radio"/>	weekend	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<input type="radio"/>	Jour 1	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
<input type="radio"/>	Jour férié	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20

Semaines

+ S	Nom	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
<input type="radio"/>	Semaine	Jour 1	Jour 1	Jour 1	weekend	weekend	Jour 1	Jour 1

Figure III. 25: température de chauffage à 20°C

Figure III. 26: schéma du modèle à étudié en boucle fermé Figure III. 27: température de chauffage à 20°C

➤ **Puissance dissipée**

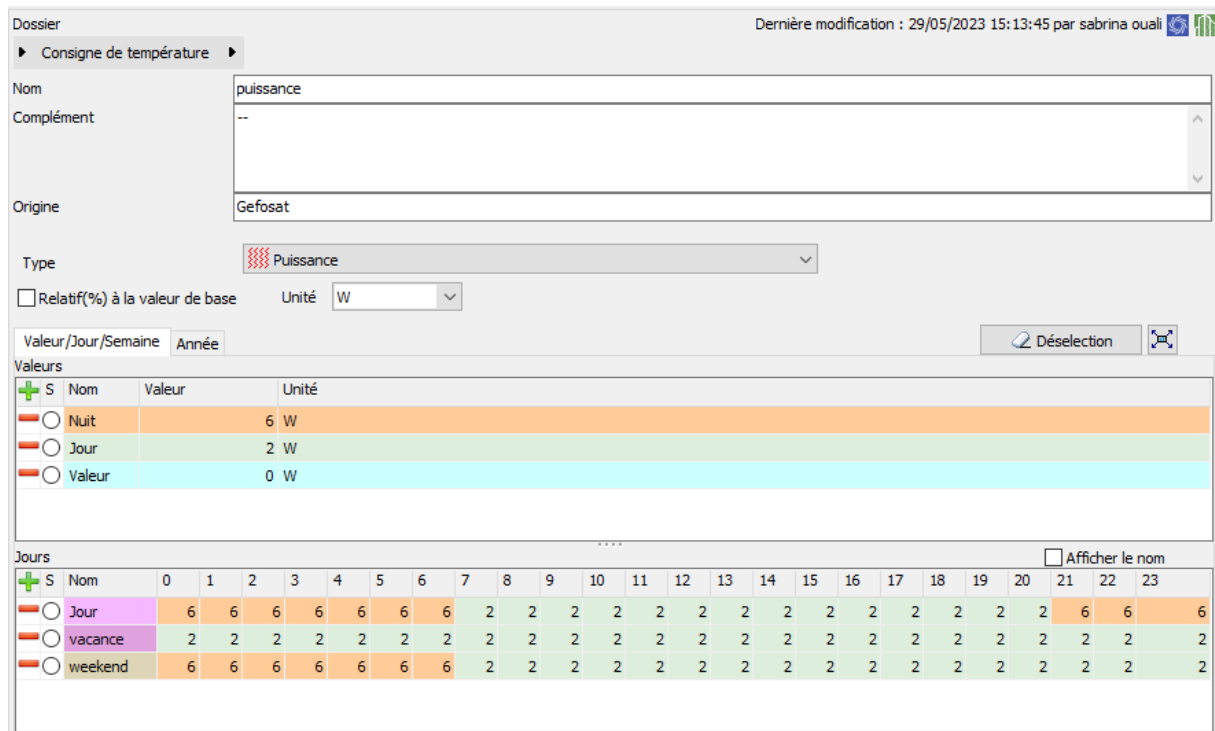


Figure III. 28: la puissance dissipée

## 2.5. Amélioration thermique du bâtiment

L'amélioration des performances thermiques du bâtiment est nécessaire afin de diminuer la consommation énergétique et les besoins de chauffages, pour cela nous proposons de remplacer le matériau de construction béton lourd par le béton cellulaire et faire une autre simulation sur pléiades pour quantifier les besoins de chauffages.

Le béton cellulaire est un matériau de construction qui est un mélange de chaux, de sable, de ciment, d'eau et d'un agent d'expansion. C'est un bon isolant sa conductivité thermique est de 0,22.



### 3. Dimensionnement

Notre dimensionnement se porte sur le modèle de NICAH, un projet Anglais [33].

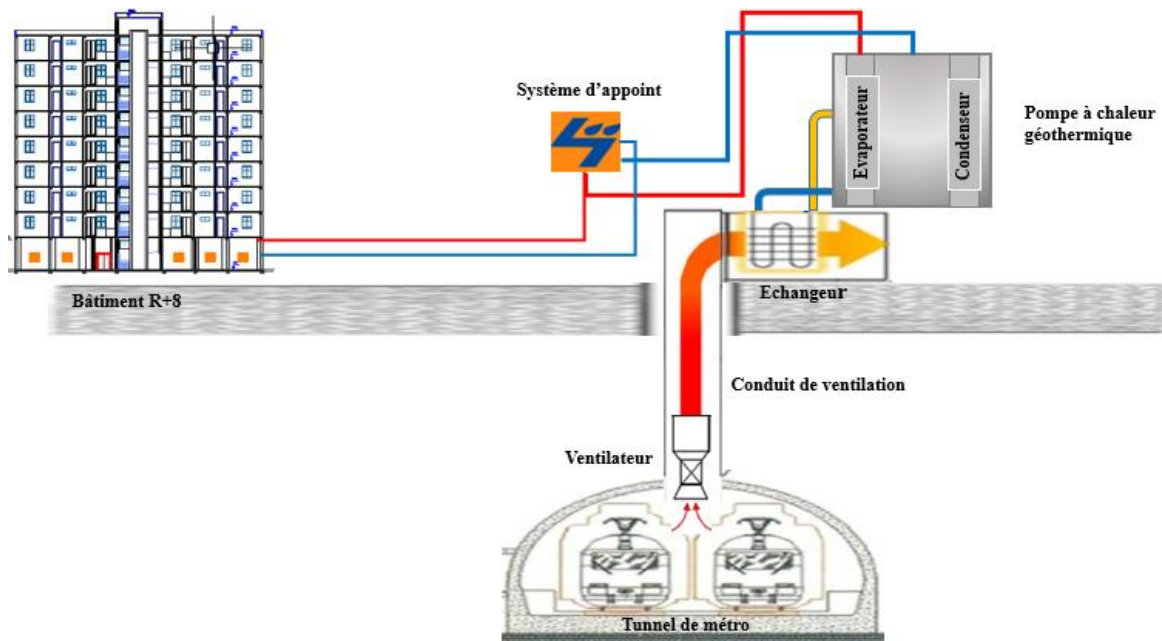


Figure III. 29: schéma du modèle à étudié en boucle fermée

#### 3.1. Description du modèle étudié

Figure III. 30: échangeur tube à ailettes Figure III. 31: schéma du modèle à étudié en boucle fermée

Suite à plusieurs études de cas, différentes technologies et modèles de récupération de chaleur, notre étude est portée sur le modèle de MICAH modifié selon notre cas d'étude (figure 6). L'objectif est 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 ; ceci permet de minimiser la consommation électrique (ou le gaz) de ces dernières, un échangeur eau-air (figure7) 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. Cette solution peut être utilisée partout dans le monde et en particulier on voulait l'adapter au tunnel de métro d'Alger.

#### 3.2. Le dimensionnement de chaque élément du système

##### 3.2.1. Puissance de chauffage du bâtiment

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%.

$$P = Q + 0,2Q$$

1-III

P : puissance de chauffage 165 933,96 W

### 3.2.2. Ventilateur

Pour aspirer l'air chaud des tunnels, il est important d'utiliser des pieux de ventilation spécialement conçus pour les tunnels comme le model de MICAH. Ces ventilateurs sont conçus pour fonctionner dans des environnements difficiles et pour fournir une circulation d'air efficace et en but de concevoir un flux de chaleur plus élevé.

P : puissance de ventilation **15,63 KW**

### 3.2.3. Echangeur

#### 3.2.3.1. Echangeur tube à ailettes



**Figure III. 32:** échangeur tube à ailettes

Le modèle de MICAH a proposé un échangeur tube à ailettes air-eau, fonctionnant à contre-courant (Figure 2), placé au-dessus de la station de metro à la sortie des conduits de ventilation. **Figure III. 33:** Appareil pour déterminer l'efficacité de l'échangeur  $E = \frac{Q}{Q_{max}}$  (Nut, Configuration de l'écoulement). [50] **Figure III. 34:** échangeur tube à ailettes

**Les données Techniques :**

Données géométriques Matériau : **Cuivre**

Diamètre intérieur : **0,254m**

Diamètre intérieur : **0,273m**

**Données thermiques**

Le fluide chaud : air sec

Le fluide froid : 30% propylène glycolé mélangé avec de l'eau

Température d'entrée de l'air est : **25°C**

Température de sortie de l'air est : **15°C**

Température d'entrée de l'eau : **10°C**

Température de sortie de l'eau : **15°C**

Débit massique de l'air :  **$\dot{m}=87,61$  kg/s**

**Les propriétés thermo-physiques**

Conductivité thermique du tube :  **$\lambda_t$  (cuivre =380 w/m. °C)**

Conductivité thermique de l'air :  **$\lambda_a = 0.0255$  w/m. °C**

Conductivité thermique de liquide :  **$\lambda_e = 0.4364$  w/m.°C**

Masse volumique de l'air :  **$\rho_{air}= 1.225$  kg/m<sup>3</sup>**

Masse volumique de l'eau (propylène glycol water) :  **$\rho_{air}= 1028$  kg/m<sup>3</sup>**

Chaleur spécifique de l'air :  **$C_{pair} = 1006$  J/kg.K**

Vitesse du liquide : **0,84 m/s**

Le coefficient d'échange globale K : **45 W/m<sup>2</sup>-K**

Le calcul de la surface d'échange :

$$S = \frac{P}{K \times \Delta T_{lm}}$$

2-III

**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  $T_c$  et  $T_f$  sont les températures des deux fluides au droit de l'élément S de la surface d'échange. La puissance thermique Q échangé entre les deux fluides à travers S peut s'écrire.

$$T_{ce}=25^{\circ}\text{C} , T_{cs}=15^{\circ}\text{C}, T_{fe}=10^{\circ}\text{C}, T_{fs}= 15^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\delta - \Delta}{\ln\left(\frac{\delta}{\Delta}\right)} \quad 3-III$$

$$\delta = T_{ce} - T_{fs} = 10^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta = T_{cs} - T_{fe} = 5^{\circ}\text{C}$$

Calcul de l'efficacité de l'échangeur avec la méthode de NUT :

Dans certains cas, la méthode du DTLM requiert un calcul itératif. La méthode des NUT permet par contre le plus souvent un calcul direct. Elle repose sur la notion d'efficacité, notée E et définie de la manière suivante :

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad 4-III$$

UA : conductance thermique **125,5 KW/°C**

$$C_{min} = \min (qm_c Cp_c ; qm_f Cp_f )$$

$qm_c$  : Débit massique du fluide chaud **87,67 kg/s**

$Cp_c$  : Capacité thermique massique du fluide chaud **1006 J /kg. °C**

$qm_f$  : Débit massique du fluide froid **44,2 kg/s**

$Cp_f$  : Capacité thermique massique du fluide froid **3830 J /kg. °C**

$$C_{min} : 88196,02 \text{ J /s } ^{\circ}\text{C}$$

$C_r$  : Rapport de débit des capacités thermiques **0,52**

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad 5-III$$

En ayant calculé NUT et  $C_r$ , on pourra déterminer l'efficacité de l'échangeur E à l'aide de l'abaque.

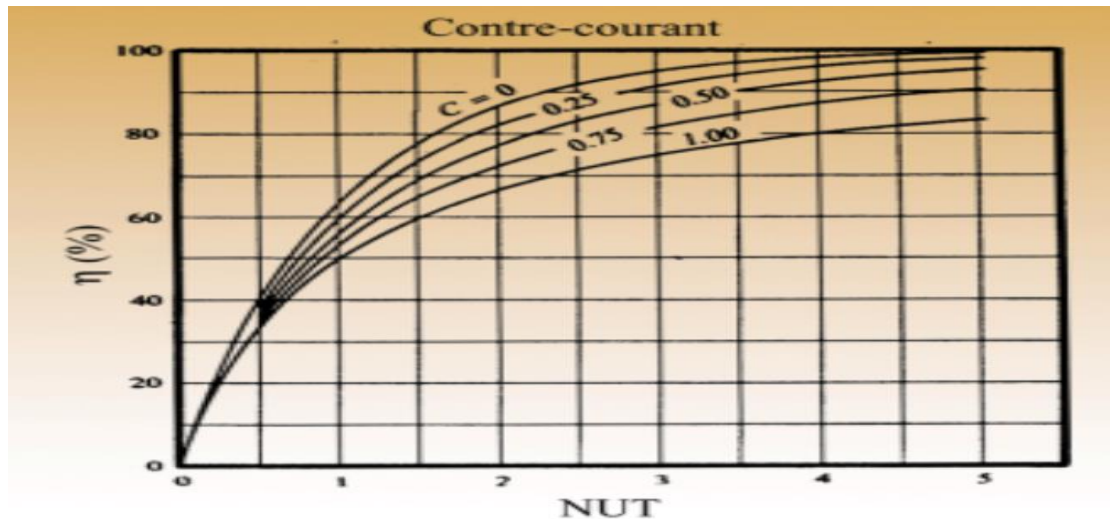


Figure III. 35: Abaques pour déterminer l'efficacité de l'échangeur  $E=f(Nut, Configuration de l'écoulement)$ . [50]

### 3.2.4. Echangeur à plaques

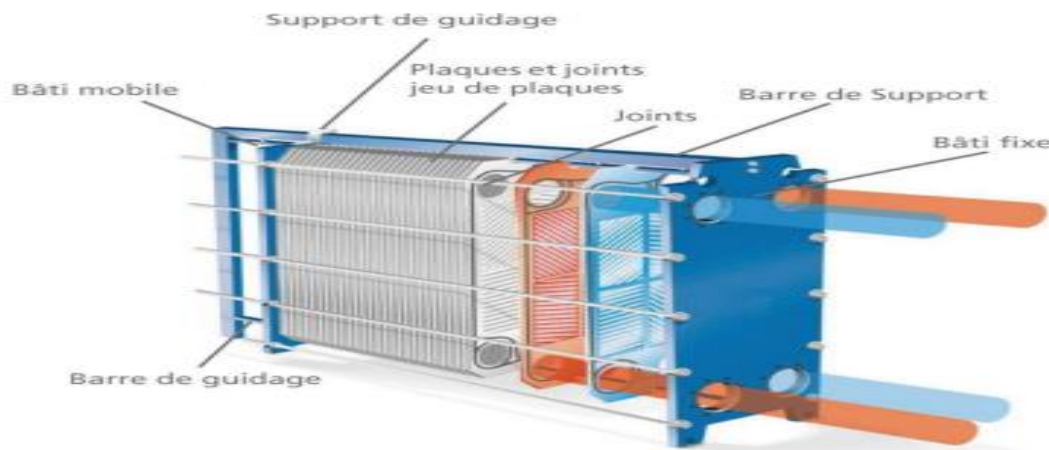


Figure III. 38: échangeur à plaques

**Tableau III. 5:** La première fenêtre pour les données d'entrée sur le logiciel Echtherm. Nous proposons dans cette partie l'utilisation d'un échangeur à plaques pour la récupération de chaleur de métro (figure 9), avec les mêmes paramètres précédents sauf que le matériau utilisé est l'acier inoxydable.

$\lambda$  : 13.4 W/m.k

- **Principe de fonctionnement :**

Cet échangeur est constitué par un ensemble de plaques embouties équipées de joints et maintenues serrées entre 2 plateaux reliés par des tirants du serrage. Les plaques sont en général en forme de chevron pour augmenter la turbulence et ménager des points d'appuis pour résister à la pression. Leur faible épaisseur permet d'utiliser des matériaux de bonne qualité ayant une bonne tenue à la corrosion (acier inox, titane, etc.). Les joints en polymères assurent un double rôle : - étanchéité, - répartition des fluides dans l'échangeur [51].

- **Formules utilisées :**

$$S = \frac{Q}{K \times \Delta T_{lm}} \quad 6-III$$

$$K = \left[ \frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{e}{\lambda} \right]^{-1} \quad 7-III$$

e : épaisseur des tubes **0,009m**

$\lambda$  : Conductivité thermique de la nature de l'échangeur **13.4 W/m.k**

$h_2$  Coefficient régit les transferts thermiques par convection à proximité d'une surface d'échange. Ce coefficient dépend de la nature du fluide, de la température de celui-ci ainsi que du type d'écoulement [51].

$$h_2 = \frac{\lambda Nu}{D_h} \quad 8-III$$

$H_2$  : coefficient d'échange convectif de liquide (30% propylène glycol eau)

$\lambda$  : conductivités thermique de la matière du liquide **0,4364 w/m**

$D_h$  : Diamètre hydraulique (Diamètre interne)

$Nu$  : Nombre de Nusselt [51].

$$Nu = 0.023 Pr^{0.4} Re^{0.8} \quad 9-III$$

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 a dimensionnant les équations de Navier-Stokes [51].

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \quad 10-III$$

$\rho$  : la masse volumique **1028 kg/m<sup>3</sup>**

$V$  : vitesse du fluide

$\mu$  : viscosité dynamique **1,47. 10<sup>3</sup> Kg/m.s**

La viscosité dynamique d'un mélange de 30% propylène glycol /eau se calcul en Kg à l'aide de

- **Loi de mélange d'Arrhenius**

$$\ln(\mu) = x_1 \ln(\mu_1) + x_2 \ln(\mu_2) \quad 11-III$$

$\mu_1$  :la viscosité dynamique propylène glycolé **0,0581 kg /m .s**

$\mu_2$  :la viscosité dynamique de l'eau **1,005×10<sup>-3</sup> kg /m .s**

$x_1$ :Fraction molaire **0,092**

$x_2$ :Fraction molaire **0,907**

$$x_1 = \frac{\frac{\bar{x}_1}{M1}}{\frac{\bar{x}_1}{M1} + \frac{\bar{x}_2}{M2}} \quad 12-III$$

$\bar{x}_1$  : Fraction massique propylène glycolé **0,3**

$\bar{x}_2$  :Fraction massique eau **0,7**

$M1$  : masse molaire propylène glycol **76(g/mol)**

$M2$  : masse molaire eau **18 (g /mol)**

$Pr$  :nombre de prandtl **12,90**

$$p = \frac{\mu \times Cp}{\lambda} \quad 13-III$$

$\mu$ : la viscosité dynamique **1,47×10<sup>-3</sup> kg/m.s**

$\lambda$  : la conductivité thermique du liquide **0,4364W/m.K**

$Cp$  : la capacité thermique massique a pression constante **3830 J/kg.K**

$h1$  : coefficient d'échange convectif de l'air 50

Ce mode d'échange peut être classé selon qu'il est :

- en mouvement entretenu : on parle de régime de convection forcé.





Ce type d'échange est caractérisé par un coefficient d'échange convectif  $h_1$  :

- air : convection forcée

$\Delta T_{lm}$ : Température Logarithmique Moyenne **7,31°C**

K : Le coefficient d'échange global

P : puissance de chauffage

### **3.3. Logiciel Echtherm :**

Echtherm est considéré comme une véritable « boîte à outils » du dimensionnement d'échangeurs. De par son interface conviviale, il est simple à utiliser, didactique et répond aux besoins de nombreux ingénieurs, aussi bien experts que débutants.

Il sera utile pour notre étude pour calculer l'efficacité thermique de l'échangeur et aussi étudié les paramètres qui influent sur la température de sortie de notre fluide froid.

#### **3.3.1. L'effet de la température**

On va changer la température d'entrée et de sortie du fluide chaud en fixant la température d'entrée du fluide froid toujours à 10°C et voir son effet sur la température de sortie du fluide froid.

On prend :

- ✓ (T<sub>ec</sub> =26°C- T<sub>sc</sub>16°C)
- ✓ (T<sub>ec</sub> =27°C- T<sub>sc</sub>17°C)

#### **3.3.2. L'effet du fluide frigorigène**

Le fluid froid est un mélange de 30% propylène glycolé et l'eau en avantage d'être plus efficace pour transférer la chaleur et peut être utilisé comme antigel dans les systèmes de chauffage et de refroidissement.

La saumure a un point de congélation inférieur à celui de l'eau, ce qui la rend adaptée à une utilisation dans des applications à basse température. En plus La saumure est souvent préférée au glycol comme réfrigérant dans les applications à très basse température où un contrôle précis de la température est important [52], et son coût est relativement faible par rapport à d'autres fluides frigorigènes.

On va ajouter 23% de la saumure au fluide froid (propylène glycolé /eau) et voir son influence sur sa température de sortie.

### **3.3.3. L'effet du débit massique du fluide froid**

Le débit massique à une relation avec la section des tubes et la vitesse des fluides, selon les études de (Di Donna et al) [26], (Alessandra Insana et al) [45] et dans d'autres études la vitesse de l'écoulement du fluide froid et choisi entre [0,39 ; 1] m/s pour favoriser la convection.

On va diminuer le débit massique à une limite de 36kg/s pour ne pas augmenter les pertes de charges, en minimisant le diamètre des tubes et en fixant la vitesse à 0,84 m/s et voir son influence sur la température de sortie du fluide froid.

Tableau III. 6: La première fenêtre pour les données d'entrée sur le logiciel Echtherm

PROCESS INPUT				
Choose your Unknow	Cold Side Outlet Temperature ▾			
Choose the Flow Configuration	<input type="radio"/> Co-current <input checked="" type="radio"/> Counter-current			
Side	HOT SIDE		COLD SIDE	
Fluid Type	<input type="radio"/> Fluid (Not Air) <input type="radio"/> Humid Air <input checked="" type="radio"/> Dry Air <input type="radio"/> Personal (Full Version Only)		<input checked="" type="radio"/> Fluid (Not Air) <input type="radio"/> Humid Air <input type="radio"/> Dry Air <input type="radio"/> Personal (Full Version Only)	
Fluid	Dry Air		Propylene Glycol - Water ▾	
Concentration (Brine Only)	0 [%]		0 [%]	
Mass Flow	87,67 [kg/s]		44,2 [kg/s]	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Temperature	25 [°C]	15 [°C]	10 [°C]	14,71 [°C]
Pressure	1 [bara]	0,6 [bara]	1 [bara]	0,57 [bara]
Allowable Pressure Drop	40000 [Pa]		43000 [Pa]	

**Choose your Heat Exchanger Technology and Fluid Phase**

Plate HE - Flat Channel - Gas / Water ▾

---

**Choice of Overall Heat Transfer Coefficient Value**

Personal Value of Overall Heat Transfer Coefficient  
 Lower Value Of Typical Overall Heat Transfer Coefficient  
 Average Value Of Typical Overall Heat Transfer Coefficient  
 Higher Value Of Typical Overall Heat Transfer Coefficient

Heat Transfer Coefficient Value : 26,7 [W/m<sup>2</sup>-K]

Figure III. 40: la deuxième fenêtre pour les données d'entrée sur le logiciel Echtherm

Figure III. 41: la composition de la pompe à chaleur Weishaupt W 180 ID [53]. Figure III. 42: la deuxième fenêtre pour les données d'entrée sur le logiciel Echtherm

## 4. la pompe à chaleur

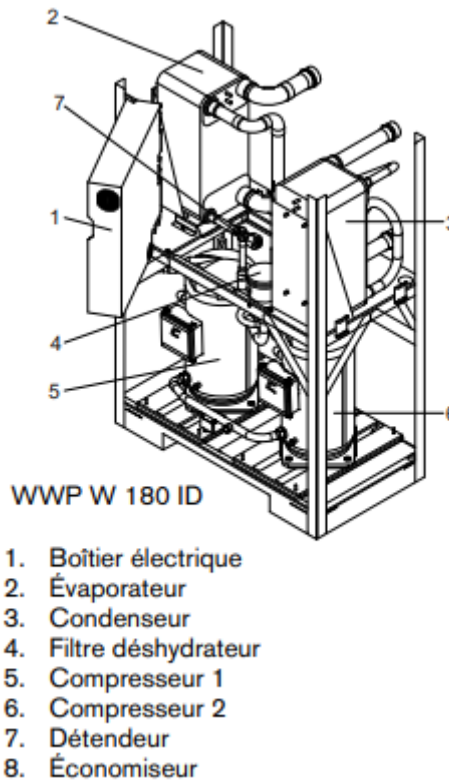
### 4.1. Le choix de la pompe à chaleur

Pour notre cas il a été décidé directement d'acheter une pompe à chaleur eau /eau qui couvre les besoins de chauffage, car il existe des marques et modèles de différentes puissances sur le marché qui peuvent couvrir les besoins en chauffage et en refroidissement d'un bâtiment.

On a choisi la pompe à chaleur modèle Weishaupt W 180 ID, d'une puissance de 180KW.

### 4.2. Description du model

Cette pompe à chaleur est conçue pour une utilisation dans un environnement domestique selon la directive CE 2006/42/CE (directive relative aux machines) et ainsi soumise aux exigences de la directive CE 2006/95/CE (directive Basse Tension). Elle est donc également prévue pour l'utilisation par des personnes non initiées à des fins de chauffage de boutiques, bureaux et autres environnements de travail équivalents, ainsi que pour les entreprises agricoles, hôtels, pensions et autres lieux résidentiels [53].



*Figure III. 44: la composition de la pompe à chaleur Weishaupt W 180 ID [53].*

*Tableau IV. 1: les déperditions totales et les déperditions de référence d'un appartement du dernier étage*  
*Figure III. 45: la composition de la pompe à chaleur Weishaupt W 180 ID [53].*

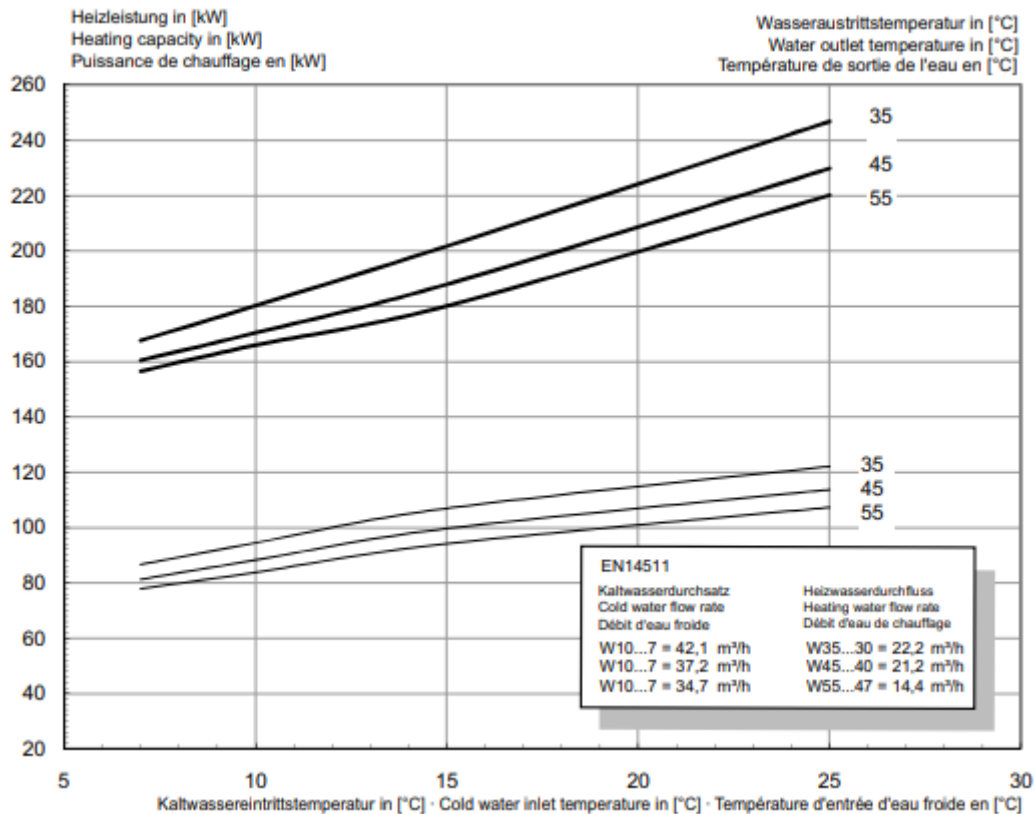


Figure III. 46: Courbes caractéristiques WWP W 180 ID [53].

## 5. Métro d'Alger en Algérie

### 5.1. Description de la ligne et station de métro d'Alger

Actuellement, le métro d'Alger, n'a qu'une ligne, un autre est en construction. La ligne en service a 14 stations sur 13,5 km qui desservent le centre-ville jusqu'à El Harrach en longeant la côte. Des 10 stations qui furent ouvertes au début, 9 sont entièrement souterraines, une seule, le terminus Hai El Badr est une station en hauteur.

La station Hai El Badr se différencie car elle a 3 quais sur lesquels les trains peuvent arriver. La plupart des stations ont été conçues aux normes standards de l'accessibilité pour que les usagers soient autonomes. Les stations sont : Tafourah – Grande Poste et Khelifa Boukhalfa du centre-ville d'Alger ; 1er mai et Aissat Idir de la commune de Sidi M'Hamed, Hamma et Jardin d'Essai de la commune de Belouizdad, Le Fusilles, Cité Amirouche, Cité Mer et Soleil à Hussein Dey, Hai El Badr à El Magharia, Bachdjarah – Tennis et Bachdjarah de la commune de Bachdjarah, El Harrach Gare à Bourouba et enfin, la station Harrach Centre située à El Harrach.[49].

Toutes les stations sont environ de 115 mètres de long (les rames font 108 mètres), larges d'en moyenne 23 mètres (dont 2 x 4 mètres de quais) et leur profondeur, suivant la topologie tourmentée de la ville, varie entre 15 et 20 mètres. Le nombre d'accès par station varie de 2 à 7, équipés d'escaliers mécaniques. Les deux stations terminus bénéficient d'un traitement architectural spécifique, tandis que les autres adoptent la tôle émaillée ou la faïence.

L'exploitation a été confiée, pour une durée de huit ans, à RATP El Djazaïr, filiale algérienne de la régie. Les trains circuleront sept jours sur sept, de 5 heures du matin à 23 heures le soir, avec des intervalles de 3 minutes et demi aux heures de pointe (5 minutes aux heures creuses). Le débit devrait atteindre 21.000 voyageurs/heure. A l'horizon 2020, le réseau de métro local devrait compter trois lignes et une quarantaine de kilomètres de voies. Sans compter le tout nouveau tramway desservant l'est de la ville, réalisé par Alstom [49].

## **6. Conclusion**

Le dimensionnement d'un système de récupération de chaleur est une étape importante pour assurer son efficacité énergétique et sa rentabilité, il est composé d'un ventilateur, échangeur et une pompe à chaleur pour satisfaire aux besoins d'un bâtiment.

Pour le dimensionnement on commence par la définition des besoins de chauffage, car c'est important de prendre en compte les besoins actuels et futurs pour déterminer la puissance nécessaire du système et enfin, la puissance de la pompe à chaleur doit être adaptée à la taille de l'échangeur de chaleur et aux besoins de chauffage. Le dimensionnement doit être réalisé par un professionnel qualifié pour garantir l'efficacité énergétique et la rentabilité du système ou s'en servir par des logiciels qui peuvent nous aider à faire des simulations et des études de calculs comme pléiades pour les besoins de chauffages et Echterm pour les études paramétriques pour un échangeur de chaleur.

**Chapitre IV Résultats et discussion**

**1. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus après les calculs, la simulation sur Pléiades et Echtherm ainsi que les discussions.

**2. Partie 01**

**2.1. Etude thermique du bâtiment**

**2.1.1. La vérification de la conformité thermique du bâtiment selon la réglementation Algérienne**

*Tableau IV. 2: les déperditions totales et les déperditions de référence d'un appartement du dernier étage*

Déperditions de référence×1,05 W/°C	Déperditions de référence W/°C
357	456

*Tableau IV. 4: les déperditions totales et les déperditions de référence d'un appartement du premier étage.*

Déperditions de référence×1,05 W/°C	Déperditions de référence W/°C
357	442

D'après les résultats obtenus pour les cas les plus défavorables, nous avons constaté que les appartements du dernier étage ne sont pas conformes à la réglementation thermique. Les déperditions thermiques totales sont supérieures aux déperditions de référence.

**2.1.2. La puissance de chauffage :**

*Tableau IV. 5: les déperditions et la puissance de chauffage totale du bâtiment R+8*

Désignation	K [W /m <sup>2</sup> .°C]	S (m <sup>2</sup> )	DS [W /°C]
Murs extérieurs en brique	1,16	829,44	962,15
Murs intérieurs en béton	2,56	761,92	1950,51
Toiture Terrasse inaccessible	3,04	280,72	853,38
Plancher bas	2,38	280,72	609,16
Les fenêtres /portes Fenêtres	2,60	210,4	547,07
Déperditions surfaciques		4922,27	
Déperdition linéiques		984,45	
DT [W /°C]		5906,72	
DR [W /°C]		2310,31	
Q [W]		138 278,30	

**Tableau IV. 6:** les besoins de chauffage et la puissance de chauffage totale du bâtiment R+8 sur pléiades en utilisant le béton lourd

Zones	Besoins Ch. kWh	Besoins Ch. kWh/m <sup>2</sup>	Puiss. Chauff. W
Zone 1	166 496,00	127,00	103 450,00

Le tableau (Tableau III.3) représente les déperditions totales les plus défavorables d'un bâtiment R+8 et sa puissance de chauffage de 138 278,30 W en considérant que le bâtiment est un seul volume et une seule zone. Les déperditions totales sont élevées car le bâtiment dispose d'une grande surface ainsi qu'il n'est pas isolé et orienté vers le nord où y a peu de rapports solaires.

Le tableau (Tableau III.4) représente les résultats de la simulation sur pléiades pour la puissance de chauffage de 103 450W.

En comparant les résultats statiques et dynamiques on trouve un écart de 34828,3 W, il se justifie par le fait que le DTR ne prend pas en considération les apports internes des occupants, les déperditions linéiques surdimensionnées avec 20% des déperditions surfaciques et aussi pléiades utilise la température ambiante à 10°C ainsi que le DTR utilise la température de base à 6°C.

**Tableau IV. 7:** les besoins de chauffage et la puissance de chauffage totale du bâtiment R+8 sur pléiades après l'amélioration en utilisant le béton cellulaire

Zones	Besoins Ch. kWh	Besoins Ch. kWh/m <sup>2</sup>	Puiss. Chauff. W
Zone 1	26 286	25	32 657

D'après les résultats trouvés sur le (Tableau III.4) une puissance de chauffage de 32 657 W est obtenue par la simulation sur pléiades pour le cas amélioré en utilisant le béton cellulaire, on remarque que les besoins de chauffage ont baissé et la puissance de chauffage a diminué de 31,56% par rapport à la première simulation avec le béton lourd. Cela nous permet de constater que le béton cellulaire est un bon isolant.



### 3. Partie 02

#### 3.1. Dimensionnement de l'échangeur de chaleur

*Tableau IV. 8: les résultats de dimensionnement d'un échangeur tube ailettes*

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

*Tableau IV. 9: les résultats de dimensionnement d'un échangeur à plaques*

Echangeur tubes à ailettes	
NUT	<b>1,368</b>
$C_r$	<b>0,52</b>
Efficacité thermique %	<b>66,67</b>
Conductance (K S) W /K	<b>22699,58</b>
Coefficient d'échange global $W/m^2-K$	<b>26,7</b>
Puissance W	<b>165 933,96</b>
Surface d'échange $m^2$	<b>850,17</b>
Longueur des tubes m	<b>154</b>

Les résultats dans le (TableauIII.4) sont obtenus à l'aide des abaques pour l'efficacité thermique, et un calcul pour la surface d'échange selon la puissance de chauffage calculée avec le DTR. La conductance thermique est une donnée d'après le model de MICAH.

Pour le (TableauIII.5), le coefficient d'échange global est calculé à l'aide des corrélations et l'efficacité thermique a été calculée à l'aide d'un logiciel Echtherm.

En comparant les deux résultats, les deux échangeurs ont presque la même efficacité thermique de 66% sauf que l'échangeur tube à ailettes à un coefficient d'échange plus grand et une surface d'échange plus petite de 385,87m.

L'échangeur à plaques en acier à un coefficient de  $26,7 \text{ W/m}^2\text{-K}$ , car il a une conductivité thermique plus faible, il prend un avantage qu'il est moins couteux que l'échangeur tube à ailette en cuivre, facile à installer et à maintenir.

### 3.2. Etude paramétriques

#### 3.2.1. L'effet de la température

- ✓ Cas initial, température d'entrée et de sortie du fluide froid  $25^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$  respectivement pour le fluide chaud.

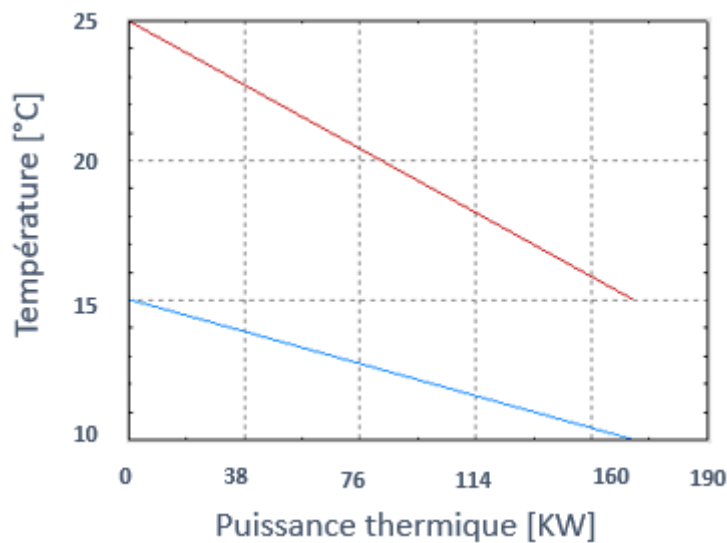


Figure IV. 1: graphe de température en fonction de la puissance thermique pour le cas initial

- ✓ Cas 1 d'entrée et fluide froid respectivement pour le fluide chaud.

Figure IV. 2: graphe de température en fonction de la puissance thermique pour le cas initial

température de sortie du  $26^\circ\text{C}$ ,  $15^\circ\text{C}$

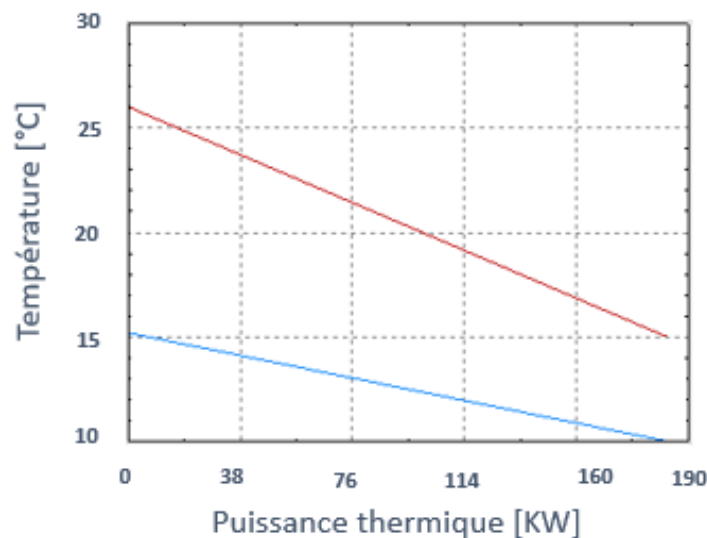
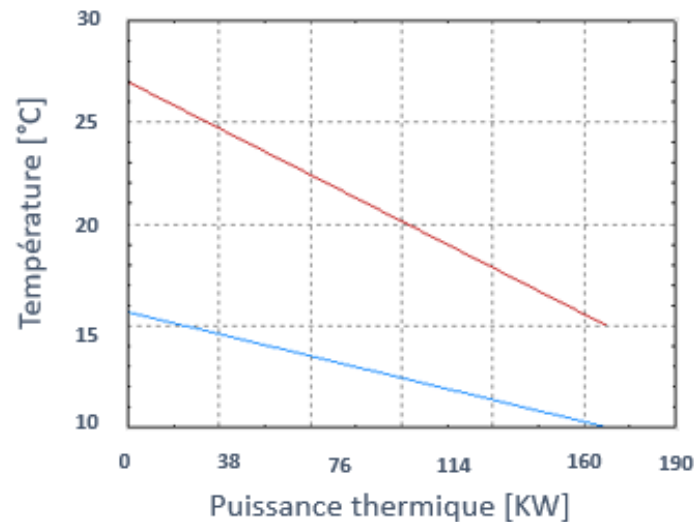


Figure IV. 4: Variation de température pour le cas 1

- ✓ Cas 2 température d'entrée et de sortie du fluide froid 27°C ,15°C respectivement pour le fluide chaud.

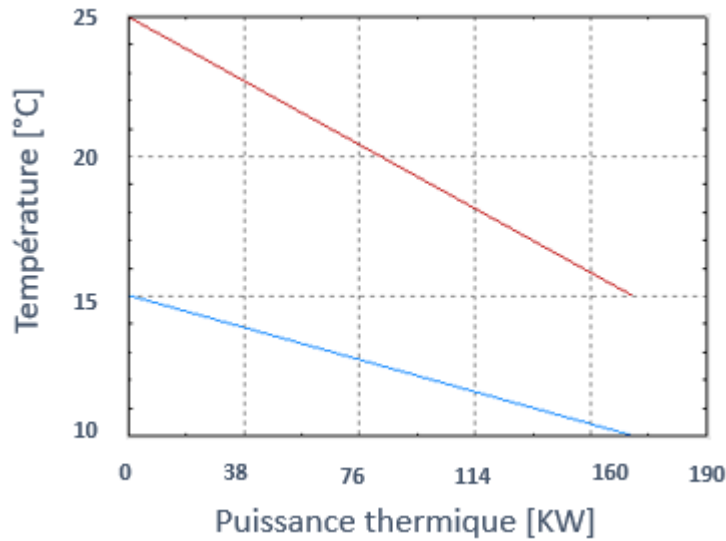


*Figure IV. 5: Variation de température pour le cas 2.*

La température de sortie pour le cas initial est de 14,71°C (Figure IV.1) en fonction de la puissance thermique nécessaire pour le chauffage. En augmentant les températures d'entrée et de sortie du fluide froid pour les cas 1 et 2 (Figure IV.2) ((Figure IV.3), on remarque une augmentation de la température de sortie du fluide froid, avec des valeurs de 15,19°C et 15,66°C respectivement. Il est également important de noter que la puissance thermique est toujours fixe, car c'est la puissance thermique désirée pour satisfaire les besoins de chauffage. Ces résultats sont bénéfiques car ils vont améliorer l'efficacité thermique.

### 3.2.2. L'effet du fluide caloporteur

- ✓ L'ajout de 23% de saumure au fluide frigorigène 30% propylène glycolé /eau.

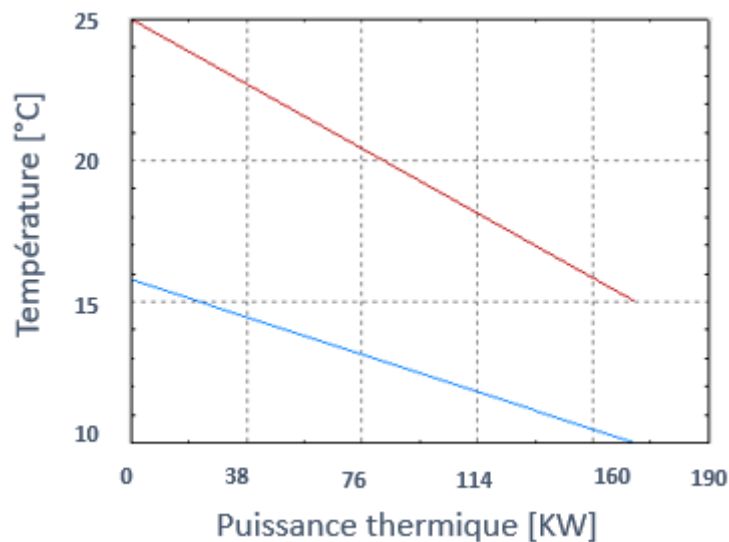


En **Figure IV. 7: Variation de température après avoir ajouté de la saumure** tant 23% de saumure au f... e de sortie a

augmenté de **Figure IV. 8: Variation de température après avoir ajouté de la saumure** transport de chaleur et répond à son avantage de contrôler précisément la température. La saumure est souvent préférée au glycol comme réfrigérant dans les applications à très basse température où un contrôle précis de la température est important, en raison de son point de congélation inférieur à celui de l'eau et de son efficacité de transport de chaleur.

### 3.2.3. L'effet du débit massique

- ✓ Un débit massique de 36kg/s, diminuer la section à



**Figure IV. 9: Variation de température à un débit de 36kg/s**

La **Figure IV. 10: Variation de température à un débit de 36kg/s** diminution du

diamètre de la section des tubes de fluide froid de 0,254 m/s à 0,231m/s en fixant toujours la même vitesse à 0,84 m/s pour un débit équivalent à 36 kg/s a permis d'améliorer la température de sortie à 15,79°C. Cette amélioration de la température de sortie est due à plusieurs facteurs, notamment : la diminution du diamètre des tubes de fluide froid a entraîné une réduction de la perte de pression, et d'améliorer le transfert de chaleur. Optimisation d'un débit équivalent de 36 kg/s a été maintenue, ce qui a permis d'optimiser le transfert de chaleur tout en évitant les pertes de charges excessives en prolongeant la longueur des tubes.

### 3.2.4. Le cas idéal

- ✓ Température du fluide chaud ( $T_e = 27^\circ\text{C}$ ,  $T_s = 15^\circ\text{C}$ ).
- ✓ Fluide 30% propylène glycolé avec 23% saumure et l'eau.
- ✓ Débit massique 36 Kg.

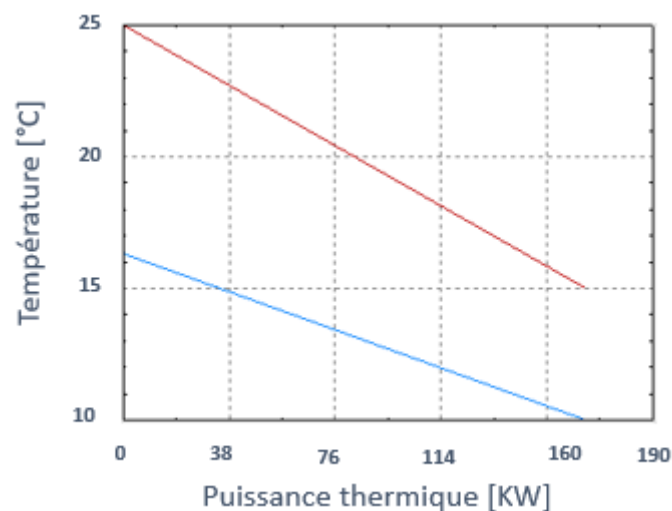


Figure IV. 11: Variation de température pour le cas idéal

Après plusieurs paramètres influent sur la

Figure IV. 12: Variation de température pour le cas idéal

avoir étudié paramètres qui température de

sortie désirée pour ce type d'échangeur, le cas idéal a permis d'obtenir une température de sortie de 17,42°C, ce qui représente une amélioration de 2,71°C par rapport à la température de sortie précédente. Cette amélioration est considérée comme une bonne amélioration pour la récupération de chaleur à basse température.

## 4. Conclusion

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, selon le DTR et sous le logiciel Pléiades, 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 la diminution du diamètre de la section des tubes de fluide froid à 0,231m pour un débit équivalent de 36 kg/s, des températures d'entrée et de sortie du fluide chaud de (27°C, 15°C)

respectivement et en ajoutant 23% de la saumure au fluide froid nous a permis d'avoir une température de sortie du fluide froide (17,42°C). Cette amélioration est considérée comme une bonne amélioration pour la récupération de chaleur à basse température. Les paramètres étudiés peuvent inclure les propriétés thermo physiques des fluides, l'écart de température que subissent les fluides, la surface d'échange de l'échangeur, l'efficacité de l'échangeur.

## Conclusion Générale

Le monde a pris des mesures strictes pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et l'Algérie fait partie. La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui ne produit pas de gaz à effet de serre lors de sa production. Les sources de chaleur résiduelle à basse température sont un sujet d'actualité, et elles sont exploitées dans les réseaux de chaleur où il y a un gisement important, comme les stations de métro, où un système de récupération de chaleur est nécessaire pour bénéficier de cette chaleur enfouie à des faibles profondeurs. Les chapitres 1 et 2 ont montré l'importance de la géothermie comme source d'énergie renouvelable et comment l'activation thermique des tunnels de métro prend en valeur l'énergie géothermique. Un système de récupération de chaleur est essentiel dans les stations de métro pour répondre aux besoins de chauffage ou de rafraîchissement. En second lieu de la partie 2 de chapitre 2, une présentation des travaux expérimentaux et théoriques menés sur les systèmes de récupération de chaleur pour certains pays qui nous a permis à la fin de choisir un modèle qui convient le plus à notre étude si on veut l'adapter au métro d'Alger. Le chapitre 3 a expliqué comment dimensionner un système de récupération de chaleur en quantifiant les besoins de chauffage, en dimensionnant l'échangeur et en choisissant la pompe à chaleur. Enfin, le chapitre 4 a présenté les résultats et les discussions. En somme, la géothermie est une alternative écologique et prometteuse pour répondre aux besoins de chauffage à l'aide d'un système de récupération de chaleur mise en place dans les stations de métro. C'est une opportunité pour l'économie énergétique Algérienne.

## Références

- [1] A. Manificat - Greth et O. Megret - Setec novae : Procédés de récupération/valorisation des énergies à bas niveau de température . RECORD 10-0234/1A, septembre 2012.
- [2] Z. Varga et B.Palotai : Comparison of low temperature waste heat recovery methods. Energy Volume 137, 15 October 2017, Pages 1286-1292.
- [3] Ministère de l'énergie et des mines –Ministère de l'énergie  
<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.
- [4] S. Raquel et al : Le système énergétique de l'Algérie, Mai 2021.
- [5] Cerefe (2020) : Transition Energétique en Algérie : Leçons, Etat des Lieux et Perspectives Pour un développement accéléré des energies renouvelables, (Edition 2020)
- [6] Hervé Chenailler, thèse de doctorat : L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant l'usager dans les bâtiments. Autre. Université de Grenoble, 2012. Français. ffNNT : 2012GRENT037.
- [7] R.Kharchi : L'efficacité énergétique dans le bâtiment, N° 28 2013.
- [8] DTR C3.2. 'Réglementation Thermique des Bâtiments d'Habitation, Règles de Calcul des Déperditions Calorifiques'. CNERIB 1997 .
- [9] 7DTR C3.2/4 'Document Technique Réglementaire, Réglementation Thermique Algérienne du Bâtiment', CNERIB, 2016.
- [10] GIZ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit - GmbH Coopération internationale allemande 20B, rue Mohammed Khoudi, EL-Biar- 16606 Alger, Algérie
- [11] Pierre Tittlein : Environnements de simulation adaptés à l'étude du comportement énergétique des bâtiments basse consommation, chambery 2008.
- [12] B.Beauchamp et al : A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems. Geothermics Volume 39, Issue 2, Juin 2010, Pages187-200
- [13] Xavier Moch : Etude théorique et expérimentale d'échangeurs géothermiques hélicoïdaux. LOCIE – UMR 5271,fevrier 2013 .
- [14] 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.
- [15] A. Fekraoui et A. Abouriche : Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie. Centre de Développement des Energies Renouvelables. BP 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger
- [16] Cordier, Corentin : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée 2017-2018 <http://hdl.handle.net/2268.2/5110>.
- [17] A. Fekraoui et F. Kedaid, «Geothermal resources and uses in Algeria,» 2005.
- [18] Fabienne Collard : Les énergies renouvelables, Courrier hebdomadaire du CRISP 2015/7-8 (N° 2252-2253).
- [19] site : [www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html](http://www.ef4.be/fr/pompes-a-chaleur/technique-generalites/cycle.html)



- [20] Alessandra Insana: Thermal and structural performance energy tunnels Alessandra Insana, Submitted on 23 Jan 2020.
- [21] P. Nicholson et al: The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK Engineering Sustainability Volume 167 Issue ES3
- [22] A. Bouazza1 et D. Adam :Turning geostructures into sources of renewable energy, Department of Civil Engineering, Monash University, Building 60, Vic. 3800, Australia
- [23] MOGHNIE Joseph MOURET Laura : LA RECUPERATION DES ENERGIES GASPILLEES, ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 2006
- [24] 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.
- [25] G. Zhang et al : Energy and Buildings, 77 (2014) 149–157.
- [26] Di Donna, A., Barla, M Energy tunnels: concept and design aspects Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy
- [27] Marco Barla1 and Alessandra Insana :Energy Tunnel Segmental Lining: an Experimental Site in Turin Metro World Tunnel Congress 201
- [28] Margaux Peltier et al : Numerical investigation of the convection heat transfer driven by airflows in underground tunnels , Applied Thermal Engineering Volume 159, August 2019, 113844.
- [29] P. Perazzelli et G. Anagnostou : Les aspects de la faisabilité de tunnels et de puits revêtus pour le stockage d'énergie par air comprimé dans des roches tendres , ETH Zurich, Switzerland
- [30] 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 .
- [31] Handbook :Experiences from other urban waste heat recovery investments page 38 ,Ares(2018)88213 - 08/01/2018 .
- [32] Jamie Burn (2014) Cooling the Tube & Bunhill, Presentation given at the Celsius Conference, 11 November 2015.
- [33] G. Davies et al Combining cooling of underground railways with heat recovery and reuse Sustainable Cities and Society 45 (2019) 543–552
- [34] 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.
- [35] H. Lagoeiro et al : Investigating the opportunity for cooling the London underground through waste heat recovery, Building Services Engineering Research and Technology · March 2022
- [36] H. Lagoeiro et al :heat from underground Energy London , CIBSE Technical Symposium, Sheffield, UK 25-26 April 2019
- [37] Y. Chaia, T.Sunb, H.Hanb, F.Caob, Y. Liu: Modularly Design for Waste Heat Recovery System in Subway Based on Air Source Heat Pump, ISHVAC2017, 1922 October 2017.

- [38] L.Tong, S. Hu, S. Lu, Y. Wang :Study on heat transfer performance of metro tunnel capillary heat exchanger , February 2019
- [39] Guodan Liu et al : Study on heat transfer model of capillary exchanger in subway source heat pump system , May 2020
- [40] Zhu Mao et al :Performance analysis of a hybrid subway source heat pump system using capillary heat exchanger , Applied Thermal Engineering , Volume 197, October 2021, 117367
- [41] Y. Ji, Z. Yin, J. Jiao, S. Hu: Long-term performance of a subway source heat pump system with two types of front-end heat exchanger, Renewable Energy Volume 210, July 2023, Pages 640-655.
- [42] P. Buhmann , C. Moormann , B. Westrich , N.Pralle ,W. Friedemann :Tunnel geothermics—A German experience with renewable energy concepts in tunnel projects ,Geomechanics for Energy and the Environment Volume 8, December 2016, Pages 1-7.
- [43] A.Berga, M. Grimma, K.Stergiaropoulou : Geothermal usage in inner city tunnels - A study of the Fasanenhof subway tunnel in Stuttgart Germany , Conf Proceedings Paper 18 May 2017.
- [44] Francesco Tinti et al :Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel – BBT , Tunnelling and Underground Space Technology Volume 70, November 2017, Pages 182-203
- [45] Alessandra Insana Department of Structural, Geotechnical and Building Engineering | Politecnico di Torino Laboratoire Navier | ENPC/UGE/CNRS, 2018présentation Ppt
- [46] Nicholson, D. P., Chen, Q., Pillai, A. & Chendorain, M., 2013. Developments in thermal piles and thermal tunnel lining for city scale GSHP systems. Stanford University, Thirty-Eight Workshop on Geothermal Reservoir Engineering.
- [47] Geothermal use of tunnels Technical Report Reference: ARUP\_202204\_CERN | 05 May 2022
- [48] M.Barlis , M.Barla ,W Bogusz , M zerun : Geothermal Potential of the NE Extension Warsaw Metro Tunnels , August 2018 Journal of Environmental Geotechnics 7(4):1-37
- [49] <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/algerien/18344-20211004.pdf>
- [50] tonepi.com – Espace en ligne Pour Ingénieurs
- [51] Abderrafik Maanani : mémoire Master -Etude d'un échangeur eau-air ; utilisation de la géothermie à haute température dans la région de Biskra.
- [52] Christophe Marvillet : Fluides frigoporteurs – Propriétés, l'expertise technique et scientifique, fluides-controle-et-isolation-thermiques-42595210.
- [53] weishaupt manual instructions d'installation et d'utilisation.