



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des sciences et technologies



## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat LMD

Filière : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par

**BELHAMIDECHE Kheira**

## Performance des géopieux dans le chauffage et le refroidissement à l'aide de l'énergie géothermique

Soutenue le 1 juillet 2025 devant le jury composé de

Pr. BELAS Nadia	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem	Présidente
Pr. MOKHTARI Abderrahmen Medjdoub	Université des Sciences et de la Technologie - Mohamed Boudiaf Oran	Examineur
Pr. DELLA Nouredine	Université Hassiba Benbouali - Chlef	Examineur
Dr. BAHAR Sadek	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem	Examineur
Pr. MISSOUM Hanifi	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem	Directeur de thèse
Pr. LAREDJ Nadia	Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem	Co-directrice de thèse

Année universitaire 2024/2025

## Remerciements

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude la plus profonde à M. le professeur MISSOUM Hanifi qui m'a accompagné tout au long de ce travail scientifique exceptionnel en tant que directeur de thèse. Je tiens à le remercier chaleureusement pour ses conseils, ses encouragements, ses avis scientifiques inestimables et sa disponibilité indéfectible. C'est grâce à son expertise dans le domaine et à son parcours scientifique que ce projet a pu être mené à bien dans de bonnes conditions.*

*Je souhaite exprimer ma sincère reconnaissance à Pr. LARREDJ Nadia qui, depuis l'entamé de ce travail, prend en charge et suit mon travail avec attention en tant que co-directrice de thèse. Son implication a grandement contribué à la réalisation de ce travail. Je tiens également à exprimer ma gratitude pour son soutien indéfectible, aussi bien sur les plans scientifiques que moraux, ainsi que pour ses encouragements au cours des moments cruciaux durant le déroulement de mes investigations.*

*Je souhaite aussi exprimer ma gratitude envers le professeur MALIKI Mustapha pour ses précieux conseils et son soutien ainsi que son aide dans la modélisation numérique, qui ont considérablement étoffé mon travail.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers Pr. BELAS Nadia, la présidente du jury, ainsi qu'à Pr MOKHTARI Abderrahmen Medjdoub, Pr DELLAL Nouredine et Dr BAHAR Sadek, qui ont accepté d'examiner cette thèse.*

*Je remercie sincèrement mes collègues de ce parcours doctoral : BENNACEUR Djihad et BRAHIMI Mahi Eddine, avec qui je partage des souvenirs tant heureux que difficiles,*

*Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à mes parents, Ibrahim et Fatima, qui ont constamment été présents pour moi et m'ont inspiré pour entreprendre des études supérieures. Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à mes frères Ali, Amine, Yasser et Sif eldine, ainsi qu'à mon oncle Khatab pour leurs soutiens.*

*Enfin, je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à mon cher mari, Mawloud, qui m'a apporté un soutien et un accompagnement inestimables tout au long de ce parcours. Ses encouragements constants m'ont permis de convertir toutes les périodes de frustration en réussites.*

*Ce travail modeste est consacré à ma chère fille Asil.*

## الملخص

الطاقة الحرارية الأرضية السطحية هي مصدر طاقة متجدد، نظيف، غير مكلف ومحلي. لقد ثبت أن الطاقة الحرارية الأرضية السطحية تمثل بديلاً جذاباً للوقود الأحفوري لتدفئة وتبريد المباني. المبادلات الحرارية الأرضية الأفقية هي أحد الأنواع المختلفة لمضخات الحرارة الأرضية. إن تركيب مبادل حراري أفقي تحت الأرض أقل تكلفة من تركيب مبادل حراري عمودي تحت الأرض. في هذه الدراسة، تم فحص الأداء الحراري لنوعين من المبادلات الحرارية الجوفية الأفقية (الخطية واللولبية) لمنطقة تقع في شمال غرب الجزائر. تم إنشاء نموذج عددي عابر ثلاثي الأبعاد يعتمد على طريقة العناصر المحدودة لحل المعادلات التفاضلية التي تحكم المشكلة باستخدام برنامج كومسول متعدد الفيزياء.

يتضمن نموذج التطوير ربط ثلاث عمليات مستقلة: نقل الرطوبة في التربة، ونقل الحرارة في التربة، ونقل الحرارة داخل المبادلات الحرارية. أولاً، يأخذ النموذج المتطور في الاعتبار ظاهرة التفاعل بين الغلاف الجوي والتربة، مع إدخال توازن الطاقة والتوازن الهيدرولوجي كشرط حدودي على سطح التربة، مع الأخذ في الاعتبار جميع الظروف المناخية والجيولوجية للمنطقة. ثم يقوم النموذج أيضاً بتقييم اقتران النقل الهيدروليكي والحراري في التربة غير المشبعة. وأخيراً، يتم فحص التفاعل بين التربة والمبادل الحراري لتقييم أداء مضخات الحرارة الجوفية الأفقية.

يسمح النموذج المتطور بالتنبؤ بالتقلبات في درجة حرارة التربة على السطح وعلى أعماق مختلفة، وكذلك درجات حرارة سائل نقل الحرارة عند مدخل ومخرج المبادلات الحرارية. وهذا يسمح بتقييم أداء المبادلات الحرارية من خلال تحديد معامل الأداء ومعدل التبادل الحراري لكلا وضعي التشغيل والتبريد. علاوة على ذلك، تم إجراء دراسة لمختلف العناصر التي يمكن أن تؤثر على كفاءة الطاقة للمبادل الحراري، مثل الطول المحوري، ونصف قطر المبادل، وعمق التركيب، وكذلك سرعة ل تدفق سائل نقل الحرارة. تُظهر النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها أنه في الأعماق السطحية تتأثر درجة حرارة التربة بشدة بدورات الطقس اليومية والموسمية. ولكن من عمق معين، تصبح مستقرة نسبياً على مدار العام. ويمكن استغلال هذا الاستقرار الحراري بشكل فعال لتوفير التدفئة والتبريد المستدام للمباني. علاوة على ذلك، إذا لم يؤخذ التفاعل بين التربة والغلاف الجوي في الاعتبار، فإن درجة حرارة التربة وسائل نقل الحرارة ستكون مبالغاً فيها في الصيف وأقل من قيمتها في الشتاء. يوفر المبادل الحراري الحلزوني الأداء الحراري الأمثل. يوفر هذا التكوين أيضاً حجم تبادل أكبر، مع تأثيرات بيئية وآليات نقل الحرارة في الأرض. أخيراً، من الضروري إجراء دراسة معيارية للمبادلات الحرارية تحت الأرض لتحسين أدائها. من خلال تعديل الهندسة والعمق وسرعة التدفق، يمكن تكييف النظام مع الظروف المحلية وتحسين كفاءة الطاقة الإجمالية.

**الكلمات المفتاحية:** التربة غير المشبعة، الطاقة المتجددة، الطاقة الحرارية الأرضية السطحية، المبادل الحراري، المضخة الحرارية، تفاعل المبادل الحراري بين الغلاف الجوي والتربة.

## Résumé

L'énergie géothermique peu profonde est une source d'énergie renouvelable, propre, peu coûteuse et locale. Elle s'est avérée être une alternative intéressante aux combustibles fossiles pour le chauffage et la climatisation des bâtiments. Les échangeurs de chaleur géothermiques horizontaux font partie des différents types de pompes à chaleur géothermiques. L'installation d'un échangeur de chaleur souterrain horizontal est également moins coûteuse que celle d'un échangeur de chaleur souterrain vertical. Dans cette étude, la performance thermique de deux types d'échangeurs de chaleur souterrains horizontaux (linéaire et en spirale) est examinée pour une région située au nord-ouest de l'Algérie. Un modèle numérique transitoire en 3D basé sur la méthode des éléments finis est établi à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics afin de résoudre les équations différentielles régissant le problème. Le modèle de développement comprend le couplage de trois processus indépendants : le transfert d'humidité dans le sol, le transfert de chaleur dans le sol et le transfert de chaleur à l'intérieur des échangeurs de chaleur. Dans un premier temps, le modèle développé prend en compte le phénomène d'interaction entre l'atmosphère et le sol, en introduisant le bilan énergétique et le bilan hydrique comme condition limite à la surface du sol, en tenant compte de toutes les conditions climatiques et géologiques de la région. Ensuite, le modèle évalue également le couplage du transfert hydraulique et thermique dans le sol non saturé. Enfin, l'interaction entre le sol et l'échangeur de chaleur est examinée pour évaluer les performances des pompes à chaleur géothermiques horizontales.

Le modèle développé permet de prédire les fluctuations de la température du sol en surface et à différentes profondeurs, ainsi que les températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des échangeurs de chaleur. Cela permet d'évaluer les performances des échangeurs de chaleur en déterminant leur coefficient de performance et leur taux d'échange de chaleur pour les deux modes de fonctionnement, le chauffage et le rafraîchissement. En outre, une étude paramétrique de différents éléments pouvant influencer l'efficacité énergétique de l'échangeur de chaleur a été menée, tels que la longueur axiale, le rayon de l'échangeur, la profondeur d'installation ainsi que la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur. Les principaux résultats obtenus montrent que à faible profondeur, la température du sol est fortement influencée par les cycles météorologiques quotidiens et saisonniers. En revanche, à partir d'une certaine profondeur, elle devient relativement stable tout au long de l'année. Cette stabilité thermique peut être exploitée efficacement pour assurer le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments de manière durable. De plus la non prise en compte de l'interaction sol-atmosphère entraîne

une surestimation de la température du sol et du fluide caloporteur en été, et une sous-estimation en hiver. L'échangeur de chaleur de forme spirale offre des performances thermiques optimales. Cette configuration offre également un volume d'échange plus important, avec des impacts environnementaux et des mécanismes de transfert thermique dans le sol. Enfin une étude paramétrique des échangeurs souterrains est essentielle pour optimiser leur performance. En ajustant la géométrie, la profondeur et la vitesse d'écoulement, le système peut être adapté aux conditions locales et améliorer son efficacité énergétique globale.

**Mots-clés :** sol non saturé, énergie renouvelable, géothermie superficielle, échangeur de chaleur, pompe à chaleur, interaction atmosphère-sol-échangeur de chaleur.

## Abstract

Shallow geothermal energy is a renewable, clean, inexpensive and local source of energy. It has proven an attractive alternative to fossil fuels for heating and cooling buildings. Horizontal geothermal heat exchangers are one of several types of geothermal heat pump. The installation of a horizontal ground heat exchanger is also less expensive than that of a vertical ground heat exchanger. This study examines the thermal performance of two different types of horizontal ground heat exchangers (linear and spiral) for a region in northwest Algeria. A 3D transient numerical model based on the finite element method is established using Comsol Multiphysics software to solve the differential equations governing the problem. The development model involves the coupling of three independent processes: moisture transfer in the soil, heat transfer in the soil and heat transfer inside the heat exchangers.

Firstly, the model developed takes into account the phenomenon of interaction between the atmosphere and the soil, introducing the energy balance and the hybrid balance as boundary conditions at the soil surface, taking into account all the climatic and geological conditions of the region. Next, the model also evaluates the coupling of hydraulic and thermal transfer in unsaturated soil. Finally, the interaction between the ground and the heat exchanger is examined to assess the performance of horizontal ground-source heat pumps.

The model developed can predict fluctuations in ground temperature at the surface and at various depths, as well as heat transfer fluid temperatures at inlet and outlet of the heat exchanger. This allows for the assessment of heat exchanger performance, as determined by their coefficient of performance and heat exchange ratio, for both heating and cooling modes of operation. In addition, a parametric study of various elements that can influence heat exchanger energy efficiency was carried out, such as axial length, exchanger radius, installation depth and heat transfer fluid flow velocity. The main results obtained show that at shallow depths, soil temperature is strongly influenced by daily and seasonal weather cycles. From a certain depth, however, it becomes relatively stable throughout the year. This thermal stability can be effectively exploited to ensure the sustainable heating and cooling of buildings. Moreover, failure to take account of soil-atmosphere interaction leads to an overestimation of soil and heat transfer fluid temperatures in summer, and an underestimation in winter. The spiral heat exchanger offers optimum thermal performance. This configuration also offers a larger exchange volume, with environmental impacts and heat transfer mechanisms in the ground. Finally, a parametric study of underground heat exchangers is

essential to optimize their performance. By adjusting geometry, depth and flow velocity, the system can be adapted to local conditions and improve overall energy efficiency.

**Keywords:** unsaturated soil, renewable energy, surface geothermal energy, heat exchanger, heat pump, atmosphere-soil-heat exchanger interaction.

<b>Remerciements</b> .....	<b>II</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VI</b>
<b>SYMBOLES et ABREVIATIONS</b> .....	<b>XVII</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique</b> .....	<b>6</b>
1.1 Introduction .....	8
1.2 Contexte énergétique à l'échelle mondiale.....	9
1.2.1 Consommation globale d'énergie primaire par type d'énergie .....	9
1.2.2 Compteur de consommation énergétique .....	10
1.2.3 La consommation énergétique selon les continents.....	10
1.3 Contexte énergétique à l'échelle nationale.....	11
1.3.1 La production d'énergie primaire à titre commercial.....	11
1.3.2 Consommation énergétique en Algérie.....	13
1.3.2.1 Consommation finale d'énergie par produit.....	13
1.3.2.2 Consommation finale d'énergie par secteur .....	14
1.4 Réduction de la consommation d'énergie (exigence et obligation).....	15
1.4.1 Réduction de la consommation d'énergie dans le secteur tertiaire.....	15
1.4.2 Technologies visant à diminuer la consommation d'énergie .....	16
1.4.3 Les enjeux de la réduction de la consommation énergétique .....	16
1.4.4 L'économie verte .....	17
1.5 Changement climatique.....	18
1.5.1 Les écarts de température à la surface des terres et des mers à travers le globe.....	19
1.5.2 Les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale .....	19
Cette mesure permet d'évaluer les émissions globales de gaz à effet de serre, mais aussi les émissions par personne[20]. .....	19
1.5.3 Émissions de gaz à effet de serre dues à la combustion d'énergie par secteur en 2021.	20
1.5.4 Les émissions de gaz à effet de serre au niveau national.....	21
Pour l'année 2020, on estime que les émissions totales de gaz à effet de serre ont atteint 220 5es hausses notables dans les domaines de l'énergie, de la fabrication et de la construction, mais aussi dans le domaine des transports. ....	22
1.5.5 Évolution nationale des émissions totales par secteur d'activité .....	22
1.5.6 Les émissions de gaz liées au secteur énergétique .....	22
1.6 Lutter contre le changement climatique .....	23
1.6.1 La nécessité de lutter contre le changement climatique .....	23

1.6.2	L'importance des énergies renouvelables pour réduire le changement climatique.....	23
1.6.3	Les énergies renouvelables en Algérie .....	24
1.6.4	La nécessité de l'efficacité énergétique pour lutter contre le changement climatique ...	25
1.6.5	Les approches NZE « Net Zero Energy » pour réduire le changement climatique .....	25
1.6.5.1	Les stratégies de NZE.....	26
1.6.5.2	Avantages des bâtiments à énergie nette zéro.....	26
1.7	Conclusion.....	27
<b>Chapitre 2 Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique.....</b>		<b>30</b>
2.1	Introduction .....	32
2.1.1	Historique de la géothermie.....	32
2.1.2	Contexte général de la géothermie .....	33
2.2	Le principe de la géothermie .....	34
2.2.1	Le fonctionnement de la géothermie .....	34
2.2.1.1	La géothermie à haute énergie (températures supérieures à 90 °C) .....	34
2.2.1.2	La géothermie à basse énergie (températures inférieures à 90 °C).....	35
2.2.2	Les atouts et l'intérêt de l'énergie géothermique.....	36
2.2.3	Limites et points à surveiller .....	37
2.2.4	Les applications de la géothermie .....	38
2.3	L'évolution de la géothermie.....	39
2.3.1	La géothermie à l'échelle mondiale .....	39
2.3.1.1	Production européenne de chaleur à usage direct.....	41
2.3.1.2	Production mondiale de chaleur à usage direct .....	41
2.3.2	La géothermie en Algérie .....	42
2.3.2.1	Potentiel de l'énergie géothermique à l'échelle nationale .....	42
2.3.2.2	La carte de la température en Algérie.....	42
2.3.3	L'utilisation de l'énergie géothermique en Algérie .....	43
2.4	La géothermie superficielle : une source d'énergie verte sous nos bâtiments .....	45
2.4.1	Les Géo structures thermiques .....	46
2.4.1.1	Élaboration d'une structure thermique géo structurale .....	46
2.4.1.2	Le déploiement de la technologie.....	47
2.4.2	Techniques d'exploitation de la géothermie superficielle.....	48
2.4.2.1	Systèmes géothermiques à boucle ouverte .....	49
2.4.2.2	Systèmes géothermiques à circuit fermé .....	49
2.5	Conclusion.....	51
<b>Chapitre 3 Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments.....</b>		<b>54</b>
3.1	Introduction .....	56
3.2	Les systèmes de pompe à chaleur.....	57

3.2.1	Les principaux types de pompes à chaleur .....	57
3.2.2	Avantages d'une pompe à chaleur .....	60
3.2.3	Inconvénients d'une pompe à chaleur .....	61
3.3	Le principe d'une pompe à chaleur .....	62
3.3.1	Descriptif et mécanisme de la pompe à chaleur .....	62
3.3.2	La pompe à chaleur géothermique.....	63
3.3.2.1	Principe de base de pompe à chaleur géothermique.....	63
3.3.2.2	Sous-système de la pompe à chaleur .....	64
3.3.2.3	Le sous-système de distribution de la chaleur intérieure.....	66
3.3.2.4	Sous-système de connexion à la terre.....	67
3.3.2.4.1	Connexion à une boucle unique .....	68
3.3.2.4.2	Connexion en double boucle .....	68
3.4	La Performance d'une pompe à chaleur.....	73
3.4.1	Le coefficient de performance de la pompe à chaleur .....	74
3.4.2	Le coefficient de performance saisonnier de la pompe à chaleur.....	75
3.4.3	L'efficacité énergétique de la pompe à chaleur .....	75
3.5	Conclusion.....	76
<b>Chapitre 4</b>	<b>Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol.....</b>	<b>79</b>
4.1	Introduction .....	81
4.2	Le transfert thermique .....	82
4.2.1	Conduction .....	82
4.2.1.1	Loi de Fourier.....	83
4.2.1.2	L'équation de la chaleur.....	83
4.2.1.3	L'analyse de la conduction dans un régime permanent .....	84
4.2.1.3.1	Cas d'une surface plane simple.....	84
4.2.1.3.2	Cas de surfaces planes en série.....	84
4.2.1.3.3	Surfaces planes en parallèle .....	85
4.2.1.3.4	Cas de Surface cylindrique simple .....	86
4.2.2	Convection.....	87
4.2.2.1	Caractéristique du transfert de chaleur par convection.....	87
4.2.2.2	Les diverses catégories de transferts thermiques.....	88
4.2.2.3	L'équation de la convection thermique.....	88
4.2.2.4	Le coefficient d'échange convectif .....	89
4.2.2.5	Transfert de chaleur par la convection laminaire et la convection turbulent.....	90
4.2.2.5.1	Le transfert de chaleur dans un plan soumis à un régime laminaire.....	91
4.2.2.5.2	Le transfert de chaleur dans un plan soumis à un régime turbulent .....	91
4.2.3	Rayonnement.....	92

4.2.3.1	Éléments caractéristiques du rayonnement thermique .....	93
4.2.3.2	La loi du Corps Noir.....	94
4.2.3.2.1	La loi de Planck.....	94
4.2.3.2.2	Loi de Wien .....	95
4.2.3.2.3	Loi de Stefan .....	96
4.3	Évaluation de bilan énergétique à la surface et de l'évapotranspiration .....	96
4.3.1	Rayonnement net.....	97
4.3.1.1	Rayonnement extraterrestre.....	98
4.3.1.2	Rayonnement de courte longueur d'onde.....	99
4.3.1.2.1	Rayonnement d'une courte longueur d'onde : cas du ciel clair.....	100
4.3.1.2.2	Rayonnement net d'ondes courtes .....	101
4.3.1.3	Le rayonnement à ondes longues .....	101
4.3.1.3.1	Le rayonnement à ondes longues net .....	102
4.3.2	Le flux de chaleur sensible .....	103
4.3.3	Le flux de chaleur latente .....	106
4.4	Le cycle d'eau dans le sol.....	109
4.4.1	L'eau et le sol.....	109
4.4.2	La pression de succion et l'évaporation .....	110
4.4.3	Le bilan hydrique dans le sol.....	110
4.5	Conclusion.....	111
<b>Chapitre 5 Modélisation et simulation numérique.....</b>		<b>113</b>
5.1	Introduction .....	115
5.2	Le modèle mathématique .....	115
5.2.1	Description du modèle proposé .....	115
5.2.2	Équations fondamentales du modèle mathématique : .....	116
5.2.2.1	Transfert d'humidité dans les sols non saturés.....	116
5.2.2.2	Transfert de chaleur dans le sol .....	118
5.2.2.2.1	Propriétés thermiques du sol .....	118
5.2.2.3	Transfert de chaleur dans les conduites.....	119
5.3	Vérification et validation du modèle numérique .....	120
5.3.1	Validation du modèle numérique.....	120
5.3.2	Vérification du modèle numérique.....	123
5.4	Description de la région de l'étude .....	126
5.4.1	Situation géographique.....	126
5.4.2	Conditions climatiques .....	126
5.5	La modélisation numérique .....	131
5.5.1	Description du logiciel solveur.....	131

5.5.1.1	Présentation du logiciel Comsol Multiphysics .....	131
5.5.1.2	Les phases de la création d'un calcul : .....	131
5.5.2	Description du modèle numérique.....	132
5.5.3	Le maillage par élément finis .....	135
5.5.4	Les conditions initiales et limites du modèle numérique.....	135
5.5.4.1	Les conditions aux limites du sol .....	135
5.5.4.2	Les conditions limites des tuyaux (échangeurs de chaleur).....	136
5.6	Conclusion : .....	136
<b>Chapitre 6</b>	<b>Analyse et interprétation des résultats .....</b>	<b>138</b>
6.1	Introduction .....	140
6.2	Le bilan énergétique et hydrologique de la surface du sol .....	140
6.2.1	Evaluation du bilan hydrologique à Mostaganem .....	140
6.2.1.1	Evapotranspiration.....	141
6.2.1.1.1	L'évapotranspiration potentielle (ETP) .....	141
6.2.1.1.2	L'évapotranspiration réelle .....	142
6.2.1.2	Ruissellement d'eau.....	145
6.2.1.3	La lame d'eau a infiltré.....	145
6.2.2	Bilan énergétique.....	146
6.2.2.1	L'équation de la température ambiante et le rayonnement à courte longueur d'onde dans la région d'étude (Mostaganem) .....	146
6.2.2.2	Evaluation du bilan énergétique à la surface du sol .....	148
6.3	Le profil de la température du sol.....	150
6.3.1	Les propriétés hygrothermiques du sol.....	150
6.3.2	Température du sol .....	152
6.4	La performance thermique des échangeurs de chaleur.....	154
6.4.1	L'effet de la négligence de l'interaction atmosphérique.....	154
6.4.2	L'effet de la profondeur d'installation .....	155
6.4.3	L'effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur.....	156
6.4.4	L'effet de la vitesse d'écoulement du fluide de travail .....	161
6.4.5	L'effet du rayon interne du tuyau .....	162
6.4.6	L'effet de la longueur axiale .....	163
6.5	Conclusion.....	164
	<b>Conclusion Générale et perspectives de recherche futures .....</b>	<b>166</b>
	<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>171</b>

## Table des figures

<b>Figure 1. 1 : Demande globale d'énergie primaire .....</b>	<b>9</b>
<b>Figure 1. 2 : Consommation d'énergie finale par pays .....</b>	<b>10</b>
<b>Figure 1. 3 : Energie finale consommée par continent .....</b>	<b>11</b>
<b>Figure 1. 4 : Répartition de la production commerciale en Algérie pour l'année 2022 .....</b>	<b>13</b>
<b>Figure 1. 5 : La consommation finale d'énergie par secteur d'activité .....</b>	<b>15</b>
<b>Figure 1. 6 : L'évolution des températures à la surface des terres et des mers dans le monde de 1900 à 2020 .....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 1. 7 : l'évolution des émissions de gaz à effet de serre dans le monde .....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 1. 8 : Les émissions de gaz à effet de serre causées par la combustion d'énergie varient selon les secteurs .....</b>	<b>21</b>
<b>Figure 1. 9 : Impact des secteurs sur les émissions nationales brutes de gaz à effet de serre .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure 1. 10 : Répartition des émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'énergie pour chaque gaz .....</b>	<b>23</b>
<b>Figure 2. 1 : Les différents types d'énergie géothermique .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 2. 2 : l'énergie géothermique dépend de la température des différentes couches géologiques. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 2. 3 : la répartition de l'utilisation de la géothermie pour générer de l'électricité ou exploiter directement la chaleur à l'échelle mondiale. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 2. 4 : Répartition de la production d'électricité géothermique .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 2. 5 : Répartition mondiale des utilisations de la chaleur .....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 2. 6 : La carte de la température en Algérie.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 2. 7 : Analyse de la répartition de la capacité d'énergie géothermique à usage direct par pays en Afrique .....</b>	<b>44</b>
<b>Figure 2. 8 : Répartition de la capacité totale de production d'énergie géothermique (MWt) en Algérie .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 2. 9 : Le nombre d'installations et la diminution du CO<sub>2</sub> évoluent au fil du temps[44] ....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 2. 10 : La répartition des structures énergétiques dans divers pays.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 2. 11 : Systèmes de chauffage et de refroidissement à circuits ouverts .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 2. 12 : un système géothermique horizontale à boucle fermée .....</b>	<b>50</b>
<b>Figure 2. 13 : Exemple d'un système géothermique verticale à boucle fermée pour une maison</b>	<b>51</b>
<b>Figure 3. 1 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur air-eau.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure 3. 2 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur air-air.....</b>	<b>58</b>
<b>Figure 3. 3 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur géothermique .....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 3. 4 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur hydrothermique.....</b>	<b>60</b>
<b>Figure 3. 5 : Fonctionnement du HP en mode chauffage (horaire/rouge) ou refroidissement (antihoraire/bleu).....</b>	<b>63</b>
<b>Figure 3. 6 : Schéma de la pompe à chaleur géothermique (en mode chauffage) .....</b>	<b>64</b>
<b>Figure 3. 7 : Modèle d'un système de pompe à chaleur géothermique, incluant le désurchauffeur .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure 3. 8 : Évolution de la température du sol par rapport à la profondeur à Ottawa, au Canada.....</b>	<b>67</b>

<b>Figure 3. 9 : Une boucle horizontale équipée de tuyaux : a) de base, b) en série et c) parallèles pour une pompe à chaleur géothermique.....</b>	<b>70</b>
<b>Figure 3. 10 : Un système en boucle fermée vertical pour une pompe à chaleur géothermique ..</b>	<b>71</b>
<b>Figure 3. 11 : Un système en boucle fermée d'étang pour une pompe à chaleur géothermique...</b>	<b>72</b>
<b>Figure 3. 12 : Classement de l'efficacité énergétique du système de chauffage .....</b>	<b>74</b>
<b>Figure 4. 1 : Le transfert thermique par conduction.....</b>	<b>83</b>
<b>Figure 4. 2 : Exemple de répartition de la température dans un mur .....</b>	<b>84</b>
<b>Figure 4. 3 : Exemple de surfaces planes en série .....</b>	<b>85</b>
<b>Figure 4. 4 : Exemple de surfaces planes en parallèle .....</b>	<b>86</b>
<b>Figure 4. 5 : Exemple de Surface cylindrique simple .....</b>	<b>86</b>
<b>Figure 4. 6 : Le transfert thermique par convection .....</b>	<b>87</b>
<b>Figure 4. 7 : Le transfert thermique par rayonnement.....</b>	<b>93</b>
<b>Figure 4. 8 : Le cheminement des différents flux à la surface d'un corps opaque.....</b>	<b>94</b>
<b>Figure 4. 9 : La courbe de Planck correspond à la température du Soleil (T = 6 000 K) et celle de la Terre (T = 300 K) .....</b>	<b>95</b>
<b>Figure 4. 10 : L'orientation supposée du jour et de la nuit pour chaque flux du bilan énergétique d'une surface terrestre humide pendant l'été .....</b>	<b>96</b>
<b>Figure 4. 11 : Les moyennes quotidiennes de rayonnement extraterrestre pour diverses latitudes pendant une année.....</b>	<b>98</b>
<b>Figure 4. 12 : Bilan radiatif entre la surface de la Terre et l'atmosphère.....</b>	<b>102</b>
<b>Figure 4. 13 : Illustration graphique du bilan de l'évaporation et de la transpiration[94].....</b>	<b>107</b>
<b>Figure 4. 14 : Exemple des profils de la teneur en eau dans le sol et le sous-sol durant la période estivale et hivernale .....</b>	<b>109</b>
<b>Figure 5. 1 : les différents processus de transfert de chaleur et de masse qui se produisent au niveau de la surface, à l'intérieur du sol et autour de l'échangeur de chaleur.....</b>	<b>116</b>
<b>Figure 5. 2 : l'essai expérimental de Yoon pour un échangeur de chaleur horizontal en forme de U .....</b>	<b>121</b>
<b>Figure 5. 3 : La température du fluide de sortie, calculée par le modèle numérique proposé et rapportée par l'expérience de Yoon. ....</b>	<b>123</b>
<b>Figure 5. 4 : La température du fluide de sortie pour différents types d'échangeurs de chaleur calculée par le modèle numérique proposé et rapportée par Hang Zou. ....</b>	<b>125</b>
<b>Figure 5. 5 : Le coefficient de performance pour les différents types d'échangeurs de chaleur obtenus à l'aide du modèle numérique proposé et rapporté par Hang Zou. ....</b>	<b>125</b>
<b>Figure 5. 6 : Localisation de la Mostaganem en Algérie .....</b>	<b>126</b>
<b>Figure 5. 7 : La température moyenne enregistrée à Mostaganem.....</b>	<b>127</b>
<b>Figure 5. 8 : Pluviométrie mensuelle moyenne enregistrée à Mostaganem.....</b>	<b>128</b>
<b>Figure 5. 9 : Représentation du pourcentage d'humidité en fonction du point de rosée, classé par niveaux de confort .....</b>	<b>129</b>
<b>Figure 5. 10 : Les vitesses horaires moyennes du vent à Mostaganem .....</b>	<b>130</b>
<b>Figure 5. 11 : La répartition de la couverture nuageuse en fonction du pourcentage de ciel nuageux .....</b>	<b>130</b>
<b>Figure 5. 12 : Diagramme d'organisation de tous les processus et opérations simulés dans cette étude.....</b>	<b>134</b>
<b>Figure 5. 13 : Domaine géométrie et maillage par élément finit.....</b>	<b>135</b>

<b>Figure 6. 1 : L'évaporation et l'évapotranspiration obtenus par la méthode de Thornthwaite .</b>	<b>144</b>
<b>Figure 6. 2 : Température ambiante dans la région de Mostaganem (2019-2023).....</b>	<b>147</b>
<b>Figure 6. 3 : Le rayonnement à courte longueur d'onde à Mostaganem en 2023 .....</b>	<b>147</b>
<b>Figure 6. 4 : Le flux de chaleur sensible et latente à Mostaganem en 2023 .....</b>	<b>149</b>
<b>Figure 6. 5 : Le rayonnement net et le flux de chaleur du sol à Mostaganem en 2023 .....</b>	<b>149</b>
<b>Figure 6. 6 : Courbes caractéristiques reliant la teneur en eau à la pression pour un sol argileux</b> .....	<b>151</b>
<b>Figure 6. 7 : Le profil vertical de la conductivité hydraulique .....</b>	<b>151</b>
<b>Figure 6. 8 : les profils verticaux des propriétés thermiques .....</b>	<b>152</b>
<b>Figure 6. 9 : l'évolution de la température du sol pour différents jours de la saison hivernale .</b>	<b>153</b>
<b>Figure 6. 10 : l'évolution de la température du sol pour différents jours de la saison estivale...</b>	<b>153</b>
<b>Figure 6. 11 : la température du fluide pour les deux scénarios avec et sans interaction</b> <b>atmosphérique. ....</b>	<b>155</b>
<b>Figure 6. 12 : Les températures du fluide à différentes profondeurs d'installation : 1 m, 2 m, 3 m</b> <b>et 8 m .....</b>	<b>156</b>
<b>Figure 6. 13 : le contour de la température du sol et environnant des échangeurs de chaleur, en</b> <b>hiver .....</b>	<b>157</b>
<b>Figure 6. 14 : le contour de la température du sol et environnant des échangeurs de chaleur, en</b> <b>été .....</b>	<b>158</b>
<b>Figure 6. 15 : les températures d'entrée et de sortie du fluide pour les deux conceptions</b> <b>d'échangeurs de chaleur horizontaux (spirale et linéaire) .....</b>	<b>159</b>
<b>Figure 6. 16 : Le coefficient de performance des deux types d'échangeur de chaleur : spirale et</b> <b>linéaire, a) en mode de chauffage, b) en mode de refroidissement.....</b>	<b>159</b>
<b>Figure 6. 17 : Le taux d'échange de chaleur des deux types d'échangeur de chaleur : spirale et</b> <b>linéaire, en mode de chauffage et en mode de refroidissement. ....</b>	<b>160</b>
<b>Figure 6. 18 : Variation de la température de sortie du fluide à différentes vitesses d'écoulement</b> <b>en hiver et en été .....</b>	<b>161</b>
<b>Figure 6. 19 : Variation de la température de sortie du fluide sous différents diamètres de tuyaux</b> <b>en hiver et en été .....</b>	<b>163</b>
<b>Figure 6. 20 : Variation de la température de sortie du fluide pour différentes longueurs de</b> <b>tuyaux en hiver et en été .....</b>	<b>164</b>

## Table des tableaux

<b>Tableau 1. 1 : La production d'énergie primaire à titre commercial.....</b>	<b>12</b>
<b>Tableau 1. 2 : Consommation définitive selon le produit.....</b>	<b>14</b>
<b>Tableau 1. 3 : Analyse des émissions de gaz à effet de serre de l'Algérie en 2020.....</b>	<b>21</b>
<b>Tableau 1. 4 : Le programme national d'énergie renouvelable .....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau 2. 1 : Production de chaleur à usage direct à échelle européenne.....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 2. 2 : La capacité géothermique installée destinée à une utilisation directe en Afrique. 43</b>	
<b>Tableau 5. 1 : Les différentes propriétés physiques et thermiques du sol utilisé dans l'étude expérimental de Yoon .....</b>	<b>121</b>
<b>Tableau 5. 2 : les paramètres du modèle de vérification de Hang Zou .....</b>	<b>123</b>
<b>Tableau 5. 3 : Les caractéristiques hydraulique du sol du modèle de vérification de Hang Zou.....</b>	<b>124</b>
<b>Tableau 6. 1 : les températures moyennes mensuelles à Mostaganem de 1987 à 2023 .....</b>	<b>140</b>
<b>Tableau 6. 2 : les précipitations moyennes mensuelles à Mostaganem de 1987 à 2023 .....</b>	<b>140</b>
<b>Tableau 6. 3 : L'évapotranspiration potentielle corrigée calculée par la méthode de Thornthwaite .....</b>	<b>141</b>
<b>Tableau 6. 4 : Le bilan hydrologique moyenne de la ville de Mostaganem établi selon la méthode de Thornthwaite (1987-2023).....</b>	<b>143</b>
<b>Tableau 6. 5 : L'évaporation réelle moyenne à Mostaganem.....</b>	<b>145</b>
<b>Tableau 6. 6 : Récapitulatif des résultats du bilan hydrologique établi pour la ville de Mostaganem .....</b>	<b>146</b>
<b>Tableau 6. 7 : Paramètres utilisés pour évaluer le bilan énergétique de la surface du sol. ....</b>	<b>148</b>
<b>Tableau 6. 8 : Les caractéristiques hydrothermiques du sol étudié. ....</b>	<b>150</b>
<b>Tableau 6. 9 : Les paramètres thermiques et géométriques de HGHE employées pour examiner les conséquences négligées de l'interaction atmosphérique .....</b>	<b>154</b>
<b>Tableau 6. 10 : Les conditions limites pour les deux scénarios d'étude, en présence et en l'absence d'interaction atmosphérique .....</b>	<b>154</b>
<b>Tableau 6. 11 : Les paramètres géométriques et thermiques des deux types d'échangeurs de chaleur .....</b>	<b>157</b>

## SYMBOLES et ABREVIATIONS

### Lettres Majuscules

G	Transfert de chaleur dans le sol, $W/m^2$
H	Flux de chaleur sensible, $W/m^2$
$R_n$	Rayonnement net, $W/m^2$
$R_s$	Rayonnement à ondes courtes, $W/m^2$
L. E	Taux d'évapotranspiration
$RL_{down}$	Rayonnement à ondes longues entrant, $W/m^2$
$RL_{up}$	Rayonnement à ondes longues sortant, $W/m^2$
$R_a$	Rayonnement extraterrestre, $W/m^2$
$G_{sc}$	Constante solaire, $W/m^2$
$C_p$	Capacité thermique spécifique de l'air, $J/kg/K$
$U_z$	Vitesse du vent à la hauteur z, m/s
$T_a$	Température de l'air en surface, K
$T_s$	Température du sol, K
P	Précipitations
ETR	L'évapotranspiration réelle
I	Infiltration de l'eau
R	Ruissellement d'eau
C(h)	Capacité d'humidité spécifique
K(h)	Conductivité hydraulique non saturée
$C_s$	Chaleur spécifique des particules sèches du sol, $J/(kg \cdot K)$
$C_{pw}$	Capacité thermique spécifique de l'eau
$Q_s$	Source de chaleur
A	Section transversale interne du tuyau, $m^2$
$C_{pf}$	La capacité thermique
$\rho_w$	Masse volumique de l'eau, $kg/m^3$
$\rho_f$	Masse volumique du fluide, $kg/m^3$
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide, $N.s.m^{-2}$

A	Section transversale interne du tuyau, $m^2$
$C_{pf}$	La capacité thermique spécifique du fluide, $J/kg/K$
$T_f$	Température du fluide, K
$Q_{wall}$	L'énergie du milieu environnant, W/m
Z	Périmètre intérieur du tuyau, m
$T_{ext}$	La température extérieure, K
$Pr$	Nombre de Prandtl

### Lettres grecques

$\lambda$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau, $J/kg$
$\alpha$	Albedo de la surface du sol
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman, $W/m^2 / K^4$
$\epsilon_0$	Emissivité de la surface
$\epsilon_a$	Emissivité de l'air
$\omega_s$	Angle de l'heure du coucher du soleil
$\varphi$	Latitude, rad
$\delta$	Déclinaison solaire, rad
$\rho$	Densité, $kg/m^3$
$\Delta S$	Variation du stockage de l'eau,
$\psi_g$	Potentiel de gravité
$\psi_0$	Potentiel capillaire
$\theta$	Teneur en eau volumétrique
$\theta_r$	Rétention d'eau
$\theta_s$	Teneur en eau saturée
$\rho_s$	Masse volumique, sol
$d_r$	La distance relative inverse Terre-Soleil
$r_{ah}$	Résistance aérodynamique, s/m
$z_m$	Hauteur de la mesure de vent, m

## Lettres grecques

$\rho$	Masse volumique, kg/m <sup>3</sup>	$z_h$	Hauteur de la mesure de l'humidité, m
$\Delta S$	Variation du stockage de l'eau,	$d$	Hauteur du déplacement zéro, m
$\varphi$	Latitude, rad	$f_D$	Facteur de frottement de Darcy
$\delta$	Déclinaison solaire, rad	$d_h$	Diamètre hydraulique (m)
$\rho$	Densité, kg/m <sup>3</sup>	$k_p$	Conductivité thermique du tuyau, W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
$\Delta S$	Variation du stockage de l'eau,	$h_i$	Coefficient de convection, W.m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup>
$\psi_0$	Potentiel capillaire	$d_h$	Diamètre hydraulique (m)
$\theta$	Teneur en eau volumétrique	$h_{eff}$	Coefficient équivalent de transfert de chaleur par convection du film (W/m <sup>2</sup> /K)
$\theta_r$	Rétention d'eau	$r_o$	Rayon extérieur du tube, m
$\theta_s$	Teneur en eau saturée	$r_i$	Rayon intérieur du tube, m
$\rho_s$	Masse volumique du sol, kg/m <sup>3</sup>	$k_p$	Conductivité thermique du tuyau, W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
$\rho_w$	Masse volumique de l'eau, kg/m <sup>3</sup>	$k_p$	Conductivité thermique du tuyau, W.m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup>
$\rho_f$	Masse volumique du fluide, kg/m <sup>3</sup>	$h_i$	Coefficient de convection, W.m <sup>-2</sup> . K <sup>-1</sup>
$\mu$	Viscosité dynamique du fluide, N.s.m <sup>-2</sup>	$f_D$	Facteur de frottement de Darcy
$\rho$	Densité, kg/m <sup>3</sup>	$d_h$	Diamètre hydraulique (m)
$\Delta S$	Variation du stockage de l'eau	$h_{eff}$	Coefficient équivalent de transfert de chaleur par convection du film (W/m <sup>2</sup> /K)

## Abréviations

HGHEs	Échangeurs de chaleur géothermiques horizontaux	GSHP	Pompe à chaleur géothermique
-------	---	------	------------------------------

**Introduction générale**

## Introduction générale

---

L'énergie primaire consommée à l'échelle mondiale atteint 162 400 TWh en 2020, soit près de deux fois plus qu'en 1980 (83 600 TWh). En 2020, les énergies fossiles occupent une place prépondérante dans le mix énergétique primaire mondial à hauteur de 80 % [1].

À la fin de l'année 2021, la production commerciale d'énergie primaire en Algérie a atteint 164,4 M Tep, contre 144,4 M Tep pendant la même période de l'année 2020, ce qui témoigne d'une augmentation significative (13,9%). Cette production est toujours dominée par le gaz naturel (60 %), suivi du pétrole (29 %). Il convient de noter que même si son expansion a été observée ces dernières années, la production d'énergie renouvelable (en particulier la géothermie) reste encore marginale dans la production d'énergie primaire commerciale[2].

Les combustibles fossiles, en particulier le charbon, le pétrole et le gaz naturel, sont de loin les plus grands contributeurs au changement climatique mondial ; ils représentent plus de 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et près de 90 % de toutes les émissions de dioxyde de carbone. Afin d'éviter les pires impacts du changement climatique, nous devons réduire les émissions de près de moitié d'ici 2030 et atteindre zéro émission d'ici 2050[3].

Afin d'atteindre cet objectif, il est essentiel de mettre un terme à notre dépendance aux combustibles fossiles et d'investir dans des sources d'énergie alternatives propres, accessibles, abordables, durables et fiables.

Le terme "énergie renouvelable dans les bâtiments" désigne l'incorporation de sources d'énergie durables, comme l'énergie solaire, géothermique, éolienne et biomasse, dans tout le cycle de vie du bâtiment, depuis sa conception jusqu'à sa construction, son exploitation et sa maintenance, dans le but de diminuer la dépendance à l'égard des combustibles fossiles et aux sources d'énergie traditionnelles, de favoriser la durabilité environnementale et de réduire le changement climatique[4].

Plusieurs études se concentrent actuellement sur l'évolution des énergies décarbonées. À titre d'exemple, l'énergie géothermique est qualifiée de renouvelable car sa source est considérée comme inépuisable. Le développement rapide des techniques d'utilisation de ces énergies a été confronté au défi du stockage de l'énergie entre les périodes de forte production d'énergie en été et les périodes de forte demande d'énergie en hiver. Il est possible de mettre en œuvre des techniques de stockage de chaleur dans le sol, impliquant l'installation de circuits géothermiques dans le sol ou intégrés dans les géostructures. Cependant, de ces installations nécessitent une connaissance approfondie des caractéristiques thermo-hydro-mécaniques des matériaux utilisés afin d'assurer la stabilité mécanique et la durabilité de ces systèmes[5].

## Introduction générale

---

La température du sol en dessous d'une certaine profondeur est assez stable tout au long de l'année. Cela s'explique par la diminution des variations de température à la surface du sol à mesure que la profondeur du sol augmente, en raison de l'inertie thermique élevée du sol. En outre, il y a une différence de temps entre les variations de température à la surface et dans le sol. La température du sol est donc toujours plus élevée que celle de l'air extérieur en hiver et plus basse en été, à une profondeur adéquate[6]. Les systèmes de pompe à chaleur géothermique GSHP utilisent cette zone où la température du sol reste constante tout au long de l'année, ce qui permet d'avoir une production de chaleur en hiver et une production de refroidissement en été[7].

Plusieurs recherches numériques et expérimentales ont été réalisées afin d'évaluer l'efficacité des systèmes d'énergie géothermique de surface en Algérie. A titre d'exemple, on peut citer [8], [9], [10], [11], [12] La majorité de ces recherches mettent en place des échangeurs de chaleur géothermiques à une profondeur inférieure à 4 mètres sous la surface du sol. Les sols à faible profondeur sont plus vulnérables aux variations de l'atmosphère, y compris le rayonnement solaire, le flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latente et le flux de chaleur du sol. D'autre part, la dynamique du transfert d'humidité doit être prise en considération lors de l'évaluation des performances des échangeurs de chaleur fixés à faible profondeur dans un sol non saturé. Il convient donc de prendre en considération ces deux hypothèses (interaction entre l'atmosphère-sol-échangeur de chaleur et le transfert d'humidité dans le sol), qui sont totalement négligées dans les travaux mentionnés précédemment.

L'objectif de ce travail de recherche est d'évaluer la performance de l'énergie géothermique à faible profondeur pour produire le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments à l'aide de géopieux par le biais de pompes à chaleur. L'influence de l'interaction entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur de chaleur ainsi que le transfert d'humidité dans le sol sont également pris en compte dans cette étude. Cette recherche tient compte des propriétés thermiques et hydrauliques des sols partiellement saturés. Elle met également en évidence l'impact des paramètres géométriques de l'échangeur de chaleur, tels que le rayon, la longueur et la forme des conduits utilisés, ainsi que la vitesse d'écoulement du fluide, la profondeur de la mise en place et le matériau utilisé pour la construction des pieux.

Ce mémoire est donc articulé en six chapitres séparés.

Le premier chapitre expose une analyse approfondie de la consommation mondiale et nationale d'énergie, du changement climatique et des émissions de gaz à effet de serre liées à

## Introduction générale

---

la consommation d'énergie non renouvelable (gaz et pétrole), ainsi que des approches pour lutter contre le changement climatique, notamment dans le secteur du bâtiment.

Le deuxième chapitre de cette thèse se focalise sur une analyse globale de l'énergie géothermique. Nous examinerons en détail les diverses formes de géothermie, en mettant l'accent sur la géothermie de surface et de son utilisation principale pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Le chapitre suivant s'appuie principalement sur les pompes à chaleur géothermiques (GSHP) et aborde leur fonctionnement, leur conception, les différents types existants, les différentes configurations des échangeurs de chaleur couplés à la pompe à chaleur ainsi que les points positifs et négatifs de chaque configuration dans le but de sélectionner la conception la plus adaptée. Enfin, nous avons examiné les différents indicateurs qui servent à définir l'efficacité énergétique des pompes à chaleur.

Le quatrième chapitre est divisé en deux parties. La première partie fournit une explication approfondie des trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), avec leurs caractéristiques respectives et l'équation de transfert de chaleur correspondante.

La deuxième partie s'appuie sur l'interaction entre l'atmosphère et le sol, et détaille l'équation de bilan hydrique et de bilan énergétique. Les différents éléments composant cette interaction tel que, le rayonnement solaire, le flux de chaleur sensible et latente, et le phénomène d'évapotranspiration sont examinés attentivement.

Le chapitre suivant est consacré à la modélisation et de la simulation numérique. Nous avons examiné numériquement l'énergie exploitée du sous-sol par l'intermédiaire des échangeurs de chaleur géothermiques horizontaux installés à faible profondeur combinés à un système de pompe à chaleur dans un circuit fermé. Dans ce cinquième chapitre, nous établissons un modèle numérique transitoire à trois dimensions basées sur la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Ce modèle numérique prend en compte le transfert d'humidité dans les sols non saturé et l'interaction entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur de chaleur, en incluant l'équation de bilan énergétique et le bilan hybride. Les différentes conditions climatiques et hydrologiques (la température ambiante, précipitation, vitesse du vent, l'ensoleillement, l'absence ou la présence du nuage et l'humidité relative) de la région de Mostaganem seront intégrées à ce modèle. L'approche numérique prend en compte le couplage de trois paramètres indépendants : la succion  $H$  dans un sol non saturé, la température du sol et les températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur.

## **Introduction générale**

---

Le chapitre final expose en détail les principaux résultats issus de la modélisation mathématique et numérique développée. La première section examine tout d'abord le bilan hydrologique et énergétique de la surface du sol, en se concentrant sur la ville de Mostaganem. La seconde partie consiste à mettre en évidence le couplage entre les caractéristiques hydrauliques et thermiques dans un sol non saturé, afin d'estimer la température réelle de la surface du sol et à diverses profondeurs. Enfin, la dernière section examine l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur horizontaux. Plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la performance énergétique du système sont analysés, tel que l'impact de la négligence sur l'interaction atmosphérique, la configuration des conduites (linéaire ou spirale), la profondeur d'installation, le rayon interne et la longueur axiale, ainsi que la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur, afin d'optimiser les performances de système.





## 1.1 Introduction

L'énergie joue un rôle essentiel dans la croissance économique en tant que facteur de production et de consommation. Son utilisation favorise les investissements, les avancées technologiques, la création de nouvelles industries, ainsi que le chauffage et le refroidissement des espaces, ce qui favorise l'emploi et le bien-être économique. Sa consommation augmente généralement en fonction de la croissance des activités économiques. Aujourd'hui, l'avenir de l'énergie est au cœur des débats politiques et économiques à l'échelle internationale. Stimulés par les inquiétudes liées au changement climatique, les transitions énergétiques sont devenues plus politiques que purement économiques, ce qui a fait de l'énergie une question cruciale de politique économique et un sujet de conflit entre différents groupes d'intérêt[13].

Les combustibles fossiles sont étroitement liés à la révolution industrielle qui a débuté au XIXe siècle. Depuis longtemps, le charbon, le pétrole et le gaz jouent un rôle essentiel dans le développement économique et la croissance des pays. L'exploitation de ces énergies fossiles, ainsi que les activités humaines (la destruction des forêts et l'augmentation de l'élevage) ont un impact de plus en plus important sur le climat influençant la température de la Terre. Ces activités entraînent la libération de grandes quantités de gaz à effet de serre, qui se rajoutent à celles qui sont naturellement présentes dans l'atmosphère, renforçant ainsi l'effet de serre et le réchauffement climatique.

Depuis la révolution industrielle, la température moyenne de la planète a augmenté de plus de 1°C en moyenne, avec un écart de 2°C par rapport aux températures de l'ère pré-industrielle, on peut redouter de graves conséquences pour l'environnement naturel, la santé et le bien être humain, engendrant d'un changement climatique grave, voire catastrophique.

En particulier, le secteur de la construction joue un rôle majeur dans le changement climatique, la dégradation de l'environnement et les crises énergétiques. C'est pourquoi il est primordial de faire appel à des sources d'énergie renouvelables comme l'énergie éolienne, solaire, géothermique, hydroélectrique, l'énergie marine, l'énergie de la biomasse et les biocombustibles, qui sont des alternatives plus respectueuses de l'environnement que les combustibles fossiles. Elles favorisent la diminution de la pollution, l'expansion des opportunités énergétiques et la réduction de notre dépendance aux combustibles fossiles, dont les prix fluctuent.

Ce chapitre expose une analyse approfondie de la consommation mondiale et nationale d'énergie, du changement climatique et des émissions de gaz à effet de serre liées à la

# La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

consommation d'énergie non renouvelable (gaz et pétrole), ainsi que des approches pour lutter contre le changement climatique, notamment dans le secteur du bâtiment.

## 1.2 Contexte énergétique à l'échelle mondiale

### 1.2.1 Consommation globale d'énergie primaire par type d'énergie

L'énergie primaire consommée à l'échelle mondiale atteint 162 400 TWh en 2020, soit près de deux fois plus qu'en 1980 (83 600 TWh). Les trois quarts de cette augmentation proviennent de l'Asie. En 2020, les énergies fossiles occupent une place prépondérante dans le mix énergétique primaire mondial (80 %). Cette proportion a légèrement diminué par rapport à 1980 (- 5 points), la diminution se concentrant dans les années 1980, puis la stabilité a été relative depuis. Cette période, les produits pétroliers ont représenté 29 % en 2020, suivis du charbon et du gaz naturel, qui ont représenté 27 % et 24 %, respectivement. Ils demeurent les trois principales sources d'énergie consommées. La proportion des produits pétroliers a baissé de 14 points en 40 ans, tandis que celle du gaz naturel et du charbon a augmenté de 7 points et 2 points respectivement. La contribution de la biomasse et des déchets au mix énergétique reste relativement constante, avec une part d'environ 10 %. En 2020, l'hydroélectricité représente également 2,7 % de la consommation mondiale d'énergie primaire. En 40 ans, la part du nucléaire a augmenté de 1,9 %, atteignant 5,0 % en 2020. Pendant ce temps, la part des autres sources d'énergie (solaire, éolien, géothermie) a augmenté de 0,2 % à 2,6 % en 40 ans[1]

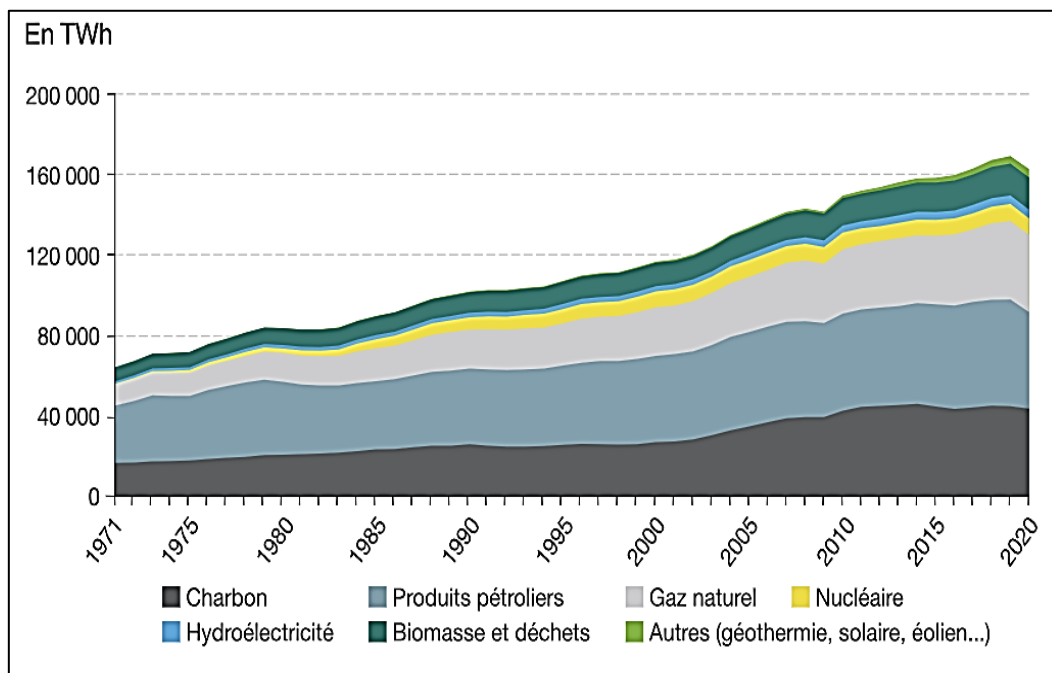


Figure 1. 1 : Demande globale d'énergie primaire [1].

# La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

## 1.2.2 Compteur de consommation énergétique

En 2020, la consommation mondiale d'énergie primaire s'élève à 21 MWh par habitant, avec des disparités plus significatives. A titre d'exemple, la France affiche des niveaux supérieurs avec 37 MWh/hab et l'Union européenne avec 33 MWh/hab, ainsi que la majorité des pays développés. Cette consommation est de 87 MWh/habitant, aux États-Unis de 72 MWh/habitant et au Japon de 36 MWh/habitant. En Afrique et en Inde, les régions moins développées ont des consommations par habitant nettement inférieures à 7 MWh/hab[1]

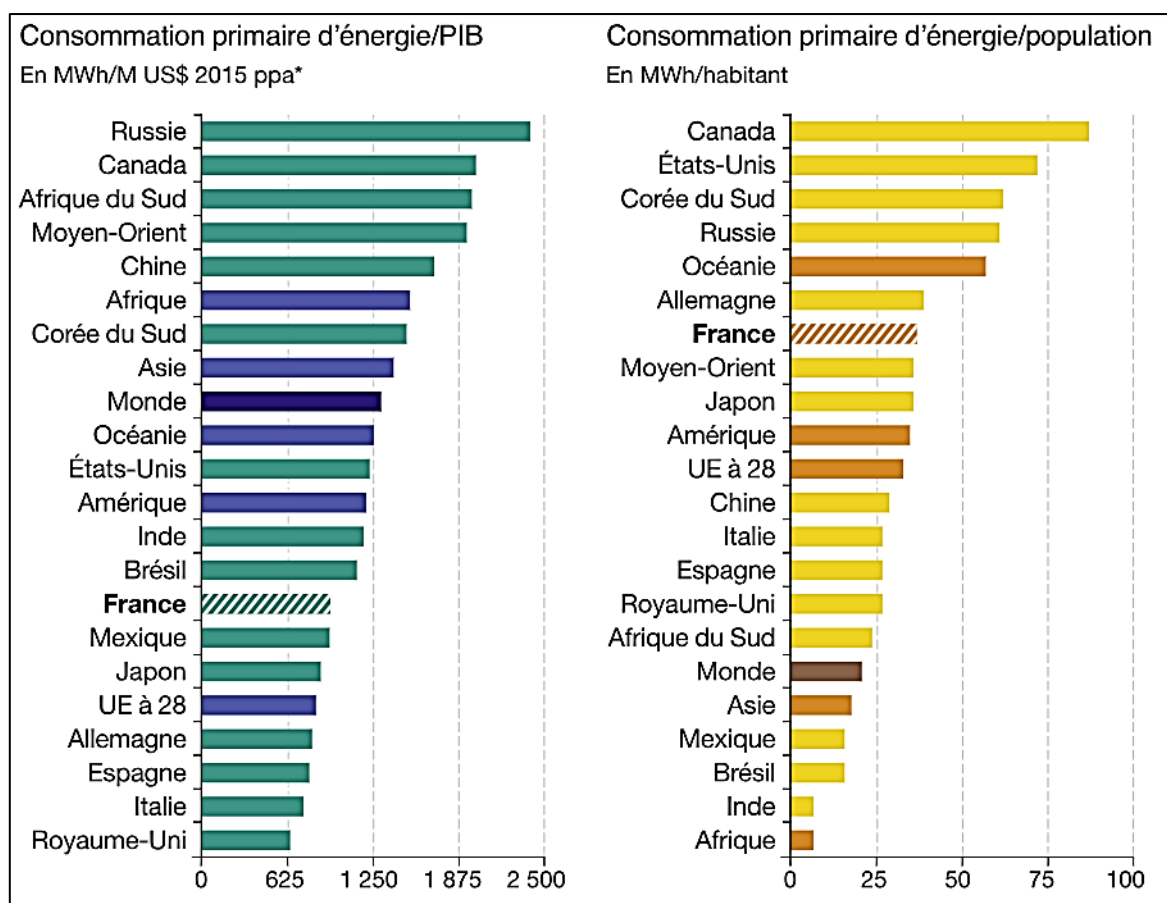


Figure 1. 2 : Consommation d'énergie finale par pays [1].

## 1.2.3 La consommation énergétique selon les continents

En 2020, les pétroliers représentent 39 % de la consommation mondiale, ce qui représente une baisse de 7 points par rapport à 1980. Les ventes de charbon et de biomasse ont également diminué de 3 et 2 points en 40 ans, atteignant respectivement 13 % en 2020. La proportion de gaz naturel est assez stable depuis 1980, atteignant 17 % en 2020. En 40 ans, la consommation finale mondiale a considérablement augmenté en termes de portion de

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

l'électricité générée à base de charbon et de gaz naturel, qui représente 59 % en 2020, passant de 11 % à 21 %.

La consommation finale mondiale a presque doublé entre 1980 et 2020, s'étendant de 84 à 162 milliers de TWh. La répartition géographique de la consommation influence l'évolution du mix mondial, avec une augmentation notable du poids de l'Asie de 21 % à 49 % du total entre 1980 et 2020, de même que des différences entre les mix continentaux. En 2020, la part des énergies fossiles dans la consommation finale sur tous les continents est d'environ deux tiers, sauf en Afrique dans laquelle la biomasse est prédominante avec 54 %. Partout, le pétrole est la principale source d'énergie fossile. Alors que le charbon est largement utilisé en Asie avec 18 %, l'Amérique et l'Europe utilisent plus le gaz naturel avec 21 % et 27 % [1]

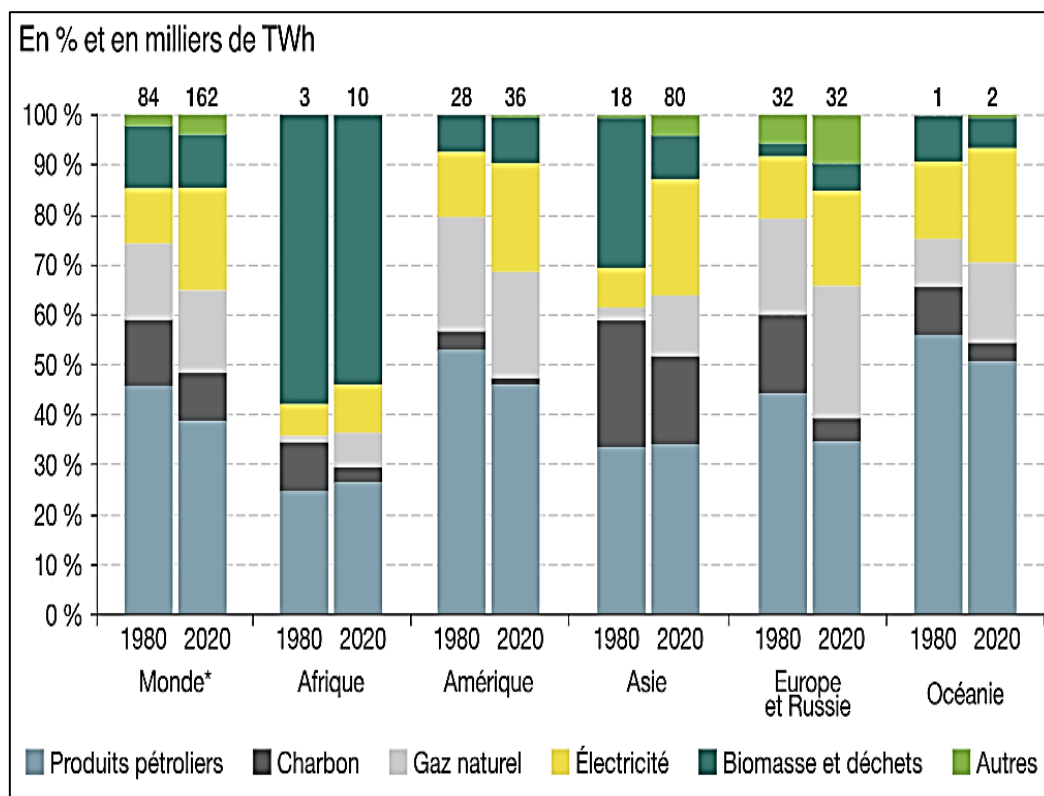


Figure 1. 3 : Energie finale consommée par continent [1].

### 1.3 Contexte énergétique à l'échelle nationale

#### 1.3.1 La production d'énergie primaire à titre commercial

En 2022, la production commerciale d'énergie primaire a augmenté de 0,6 % au regard de la production de 2021, qui a touché 164,4 millions de Tep, conformément au tableau suivant [14].

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

Tableau 1. 1 : La production d'énergie primaire à titre commercial [14].

Produit	Unités	2021	2022	Evolution	
				Quantité	(%)
Gaz naturel	K Tep	99260	95857	-3403	-3.4
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	105037	101436		
Pétrole brut	K Tep	47084	50437	3353	7.1
	K Tonnes	42688	45727		
Condensat	K Tep	8712	9063	350	4
	K Tonnes	7696	8006		
GPL aux champs	K Tep	9222	9833	611	6.6
	K Tonnes	7816	8333		
Electricité primaire	K Tep	160	164	4	2.6
	GWh	662	681		
Combustibles solides Bois	K Tep	2	18	15	625
	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	13	91		
<b>Total</b>	<b>K Tep</b>	<b>16 4442</b>	<b>16 5372</b>	<b>930</b>	<b>0.6</b>

La production a augmenté grâce à une augmentation de la production de tous les produits, sauf à l'exception du gaz naturel dont la production a diminué de 3,4 %. En ce qui concerne le pétrole brut, la croissance de la production est attribuable à l'augmentation des quotas de l'Algérie auprès de l'OPEP, conformément aux décisions de l'OPEP+. Ce taux a augmenté de 911 kb/j en 2021 à plus d'un million b/j en 2022. Elle fait également suite à la mise en service des champs de Hassi Messaoud Sud et à l'efficacité favorable des autres formations. En termes de production d'électricité primaire (ENR), on observe une augmentation légère de 2,9 % par rapport à 2021, en raison de l'augmentation de :

- ✓ Il y a une augmentation de 76 % des centrales hydrauliques, évoluant de 9 GWh en 2021 à 16 GWh en 2022, grâce à une augmentation modérée de la pluviométrie par rapport à l'année précédente ;
- ✓ 51 % des éoliennes, passant de 11 GWh en 2021 à 16 GWh en 2022 ;

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

Bien que cette augmentation se soit produite, la proportion de la production électrique à partir de sources renouvelables reste très faible, ne dépassant pas 1 % de la production nationale d'électricité, qui reste essentiellement constituée de gaz naturel (99 %).

Il est important de souligner que la production d'énergie primaire commerciale est également dominée par le gaz naturel (58 %), suivi par le pétrole (31 %), comme le montre le graphique ci-dessous[14] :

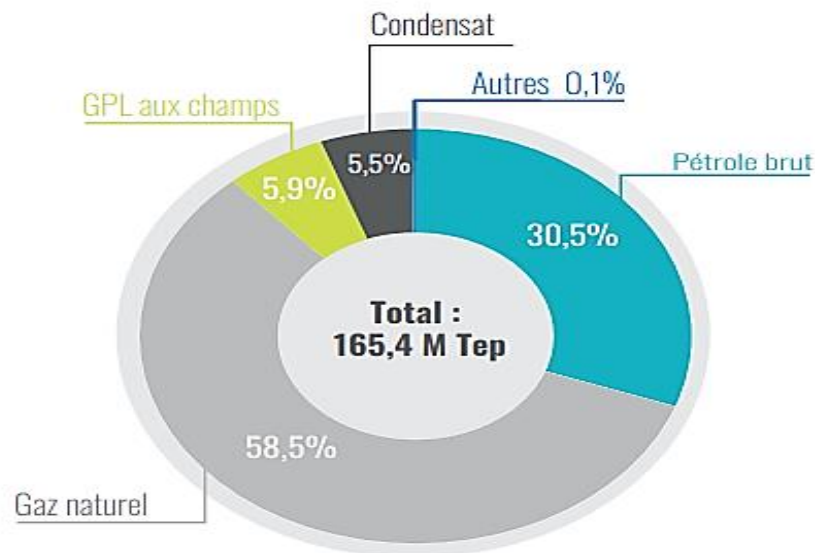


Figure 1. 4 : Répartition de la production commerciale en Algérie pour l'année 2022 [14].

### 1.3.2 Consommation énergétique en Algérie

En 2021, la consommation d'énergie atteint 50,2 M Tep. À la suite d'une baisse de -8,6% en 2020, elle a connu une augmentation de 8,0 % en 2021, pour retrouver celle de 2019. Elle a été motivée par l'augmentation de la consommation de presque tous les produits, principalement l'électricité et le gaz naturel[2].

#### 1.3.2.1 Consommation finale d'énergie par produit

- La consommation finale d'électricité a augmenté de manière significative (12,7%), allant de 13,6 M Tep en 2020 à 15,3 M Tep en 2021, dû à la hausse de 4,7 % du nombre de clients de Sonelgaz, atteignant près de 11,0 millions d'abonnés en 2021, ce qui entraîne une augmentation des besoins en électricité qui en découlent.
- La consommation du gaz naturel a augmenté de 6,5 % à 17,9 M Tep en 2021, en relation avec à l'augmentation de la consommation des clients de Sonelgaz, dont ceux des ménages (5,1 %) et des industriels (10,9 %). Sonelgaz compte désormais 6,9 millions d'abonnés, ce qui représente une augmentation de 6,8% par rapport à 2020.

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

- La consommation de produits pétroliers sur le marché national a augmenté de 4,2 % pour atteindre 13,7 millions de tep en 2021, par rapport à 13,1 millions de tep en 2020. L'augmentation s'est principalement focalisée sur les carburants terrestres (essence, diesel et GPL/C).

La progression de la consommation finale par produit est exposée en détail ci-dessous [2]:

**Tableau 1. 2 : Consommation définitive selon le produit [2].**

Produit	Unités	2020	2021	Evolution	
				Quantité	(%)
Produits pétroliers	K Tep	13 135	13 686	551	4.2
	K Tonnes	12 569	13 099		
Gaz naturel	K Tep	16 843	17 930	1 087	6.5
	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	17 823	18 974		
Electricité	K Tep	13 614	15 348	1 733	12.7
	GWh	58 898	63 442		
GPL	K Tep	2 853	3 157	304	10.6
	K Tonnes	2 418	2 675		
Coke sidérurgique	K Tep	10	47	38	377.9
	K Tec	14	68		
Autre : Bois	K Tep	11	2	-8	-76.6
	K Tec	54	13		
<b>Total</b>	K Tep	46 466	50 171	<b>3 705</b>	<b>8.0</b>

### 1.3.2.2 Consommation finale d'énergie par secteur

En fonction du domaine d'activité, la consommation finale de 2021 a été marquée par les changements suivants[2] :

- La demande dans le secteur « Ménages et autres » a augmenté de 6,2 %, évoluant de 22,1 M tep en 2020 à 23,4 M tep en 2021, marquée notamment par le sous-secteur résidentiel à hauteur de 4,4 % et le sous-secteur Tertiaire et autres à hauteur de 12,3 %.
- Le secteur « transport » connaît une hausse de consommation de 7,6 %, évoluant de 13,5 Mtep en 2020 à 14,5 Mtep en 2021, principalement en raison de la consommation de carburants terrestres et aériens (gazole 5,1 %), GPL/C (35,8 %), essence (1,8 %) et jet (15,1 %).
- La consommation du secteur « Industries et BTP » a connu une augmentation significative (12%) en 2021, en lien avec la relance de l'activité économique, principalement dans les sous-secteurs ISMME, industries agroalimentaires, chimie et matériaux de construction.

Le graphique qui suit illustre la consommation d'énergie finale par secteur pour 2021.

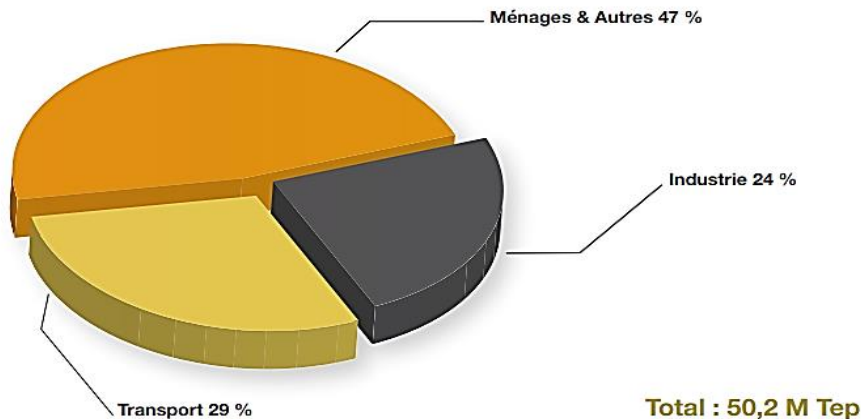


Figure 1. 5 : La consommation finale d'énergie par secteur d'activité [2].

## 1.4 Réduction de la consommation d'énergie (exigence et obligation)

### 1.4.1 Réduction de la consommation d'énergie dans le secteur tertiaire

Outre le secteur résidentiel, le secteur tertiaire (bureaux, restauration, stationnement, hôtellerie, commerces, etc.) joue un rôle essentiel dans la lutte contre le changement climatique par la transition énergétique. Les organisations mondiales [15] visent à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments afin de réaliser de plus grandes économies d'énergie. En pratique, l'objectif est de mettre en place des mesures visant à diminuer la consommation d'énergie finale dans les bâtiments déjà en place, pour atteindre la réduction prévue en 2030, 2040 puis 2050[15].

L'objectif est de diminuer l'énergie finale (par rapport à 2010) pour les bâtiments, les parties de bâtiments ou les complexes de bâtiments à usage tertiaire :

- De 40% au moins d'ici à 2030,
- 50 % d'ici à 2040 ;
- 60 % d'ici à 2050.

Les mesures prises pour réaliser les objectifs de réduction doivent principalement se concentrer sur les aspects suivants :

- ✓ Efficacité énergétique des constructions ;
- ✓ Adapter les locaux à une utilisation économe de l'énergie et à la conduite des résidents ;

## **La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique**

---

- ✓ Mise en place d'équipements de haute performance et de systèmes de supervision et de gestion opérationnelle de ces dispositifs ;
- ✓ Les conditions d'utilisation des installations.

### **1.4.2 Technologies visant à diminuer la consommation d'énergie**

Parmi les mesures pour diminuer la consommation énergétique des sites de production, on peut citer l'optimisation des locaux industriels et des systèmes de conditionnement d'ambiance, la réduction de la consommation des processus de production (pilotage du processus, gestion optimale des flux, etc.), l'amélioration de l'efficacité énergétique des équipements de production (machines-outils, fours, bains de traitement, etc.) et la récupération de l'énergie perdue. Les solutions technologiques et méthodes ci-dessous jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'industrie du futur[16].

Concernant les machines :

- ✓ Récupérer la chaleur des compresseurs d'air comprimé ;
- ✓ Surveiller les consommations énergétiques en temps réel.

Concernant les bâtiments :

- ✓ Gestion de la climatisation des locaux (surface optimisée, hauteur sous plafond, sources d'énergie, régulation, éviter la perte de charge dans les conduites) ;
- ✓ Évacuation de chaleur, isolation thermique.

Concernant les fluides :

- ✓ Analyse et correction des fuites de liquides (eau, air...) ;
- ✓ Effectuer des économies sur les émissions de gaz de la chaudière de production de vapeur ;
- ✓ Gestion de l'eau chaude (omission de chauffage en heures creuses, par exemple).

### **1.4.3 Les enjeux de la réduction de la consommation énergétique**

Les consommateurs ont la possibilité de réduire leur consommation d'énergie en faisant des économies. Elles sont devenues inévitables dans un contexte de diminution du pouvoir d'achat (hausse des prix du pétrole, du gaz et de l'électricité, inflation, hausse des coûts des matières premières, etc.). Les économies d'énergie représentent aujourd'hui un véritable défi, notamment pour faire face au changement climatique. Voici une vue d'ensemble des obstacles associés à la diminution de la consommation d'énergie.

### Du point de vue économique :

- Les réductions des consommations d'énergie entraînent immédiatement des bénéfices économiques ;
- La consommation d'énergie dans un logement est la plus importante (67 %), ce qui en fait le moyen le plus rapide de diminuer sa facture d'énergie ;
- Les factures de services publics ont diminué ;
- L'annonce d'une diminution de l'impact CO<sub>2</sub> des produits fabriqués peut être utilisée comme argument marketing ;
- Une analyse menée par la commission européenne montre que les mesures prises en vue d'optimiser l'efficacité énergétique dans l'industrie auront un effet de deux ans.

### D'un point de vue environnemental et social

- La théorie du réchauffement climatique est désormais une réalité. En dépit des affirmations des négationnistes, la fonte des glaciers, la croissance des cyclones et l'augmentation des températures saisonnières sont en accord avec la théorie liée au réchauffement climatique. Il est devenu essentiel de réduire les gaz à effet de serre, en particulier le CO<sub>2</sub>, car ils sont une source majeure de pollution dans les villes ;
- Un autre enjeu environnemental crucial est la réduction des ressources énergétiques fossiles. Le jour du déficit environnemental mondial a eu lieu en 2021, c'est-à-dire le jour où les ressources potentielles de la Terre ont été épuisées en une année. Cela signifie que les ressources de la Terre, en particulier l'énergie, sont consommées 1,7 fois plus rapidement qu'elles ne sont régénérées. Afin de réduire l'impact écologique de notre chauffage, il est essentiel de réaliser des économies d'énergie.

#### 1.4.4 L'économie verte

Deux types d'activités sont regroupés dans l'économie verte : les activités classiques qui utilisent des approches moins polluantes ou moins énergivores, ainsi que les éco-activités qui visent à préserver l'environnement et à gérer les sources naturelles.

Ces actions s'inscrivent dans une perspective de développement durable : elles visent à promouvoir un développement qui dure sur le long terme. Cette approche implique la responsabilité sociale des entreprises[17].

La croissance verte résulte de diverses observations [18]:

- ✓ La population mondiale continue de croître : selon les estimations de l'ONU, le nombre d'individus a dépassé les 8 milliards en novembre 2022, et on prévoit un

## **La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique**

---

pic de 10,4 milliards d'habitants dans les années 2080, avec une répartition inégale à l'échelle géographique.

- ✓ L'épuisement des ressources naturelles : Le jour de la surconsommation nous met en garde contre la consommation de l'ensemble des ressources naturelles régénérées par la planète en un an. En 1970, cette date se déroulait en décembre ; aujourd'hui, elle se déroule en juillet, ce qui témoigne de l'épuisement plus rapide de nos ressources que précédemment.
- ✓ Selon le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), les activités humaines ont un impact négatif sur l'environnement : les niveaux de dioxyde de carbone ont atteint leur niveau le plus élevé jamais enregistré depuis au moins deux millions d'années.

### **1.5 Changement climatique**

Le terme "changements climatiques" fait référence aux fluctuations à long terme de la température et des conditions climatiques. Il est possible que cela soit causé par des fluctuations naturelles, comme celles du cycle solaire ou des éruptions volcaniques massives. Néanmoins, les activités humaines sont la principale cause des changements climatiques depuis les années 1800, principalement en ce qui concerne de la combustion de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz.

Les émissions de gaz à effet de serre créées par la combustion de combustibles fossiles sont comme une couverture entourant de la Terre, piégeant la chaleur du soleil et provoquant une augmentation des températures.

Le changement climatique est principalement causé par les émissions de dioxyde de carbone et de méthane. Ce dernier résulte par exemple de l'utilisation de carburant pour faire fonctionner les véhicules ou de charbon pour assurer le chauffage des bâtiments. La déforestation des terres et des forêts peut également libérer du CO<sub>2</sub>. La production agricole et les moteurs à combustion sont des sources importantes d'émissions de méthane. Les principaux émetteurs sont l'énergie, l'industrie, les transports et la construction, ainsi que l'agriculture et d'autres utilisations des sols.

Les trois expressions sont employées pour décrire l'évolution des phénomènes climatiques tels que :

- ✓ La fréquence croissante des canicules,
- ✓ L'absence ou l'augmentation des précipitations,
- ✓ La multiplication des tempêtes et des ouragans.

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

### 1.5.1 Les écarts de température à la surface des terres et des mers à travers le globe

Selon les données de la NOAA [19], le graphique ci-dessous illustre les différences de température mondiale, tant sur terre que sur océans, par rapport à la moyenne du 20e siècle. Le réchauffement global semble avoir tendance à s'accélérer depuis une quarantaine d'années. La température moyenne mondiale a augmenté de 1,14 °C par rapport aux niveaux de 1850-1900 entre 2013 et 2022, ce qui entraîne une augmentation rapide du niveau des océans, une fonte record des glaciers ainsi que les conditions météorologiques extrêmes[19].

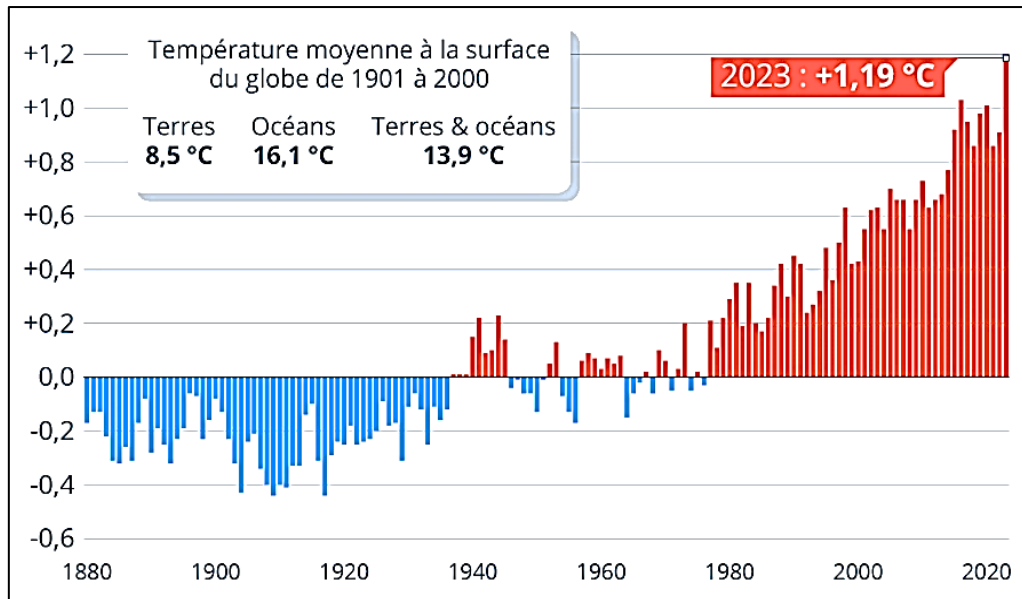


Figure 1. 6 : L'évolution des températures à la surface des terres et des mers dans le monde de 1900 à 2020 [19].

### 1.5.2 Les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale

Cette mesure permet d'évaluer les émissions globales de gaz à effet de serre, mais aussi les émissions par personne[20].

- Les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont connu une augmentation de 24 % entre 2005 et 2021, allant de 39 001 à 48 210 Mt d'éq. CO<sub>2</sub>.
- Les émissions globales par personne ont connu une augmentation de 2,67 % entre 2005 et 2021, allant de 5,99 à 6,15 t d'éq. CO<sub>2</sub>.

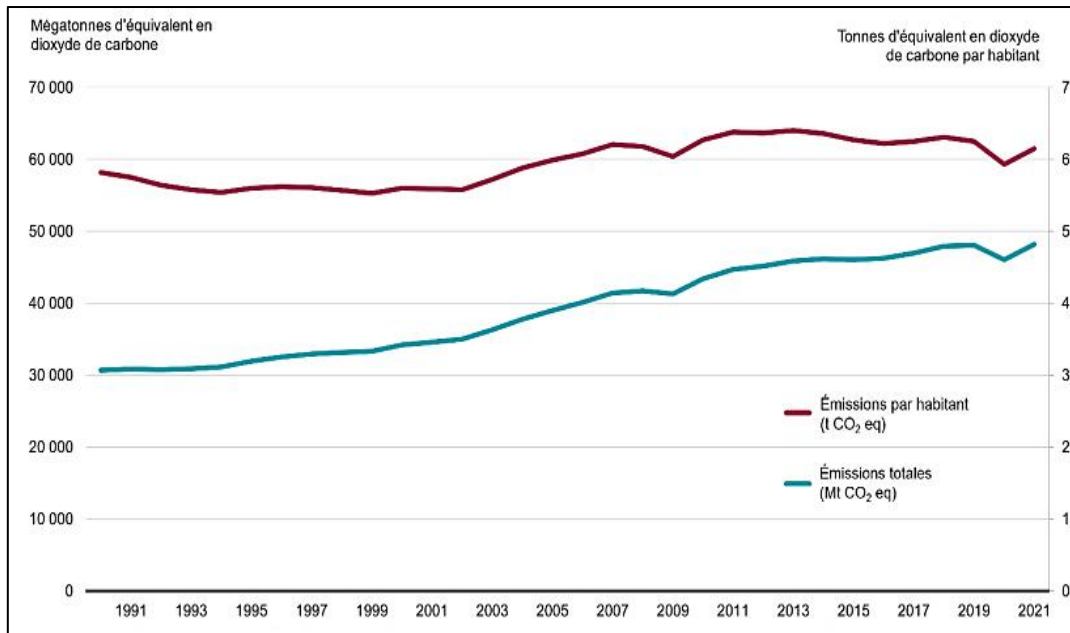


Figure 1. 7 : l'évolution des émissions de gaz à effet de serre dans le monde [20].

### 1.5.3 Émissions de gaz à effet de serre dues à la combustion d'énergie par secteur en 2021

La production d'électricité demeure le principal émetteur de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale en 2021, représentant 39 % des émissions totales liées à la combustion d'énergie. Les transports atteignent 21 % et l'industrie représente 17 % sont les suivants. En Chine, à la fois l'industrie et le secteur de l'énergie (électricité et hors électricité) contribuent à 81 % des émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion d'énergie, par rapport à 61 % en moyenne. Aux États-Unis et dans l'Union européenne, les transports occupent une place plus significative 34% et 29% respectivement, que les secteurs résidentiel et tertiaire. Globalement, les émissions fugitives constituent 9 % des émissions de combustion d'énergie[21].

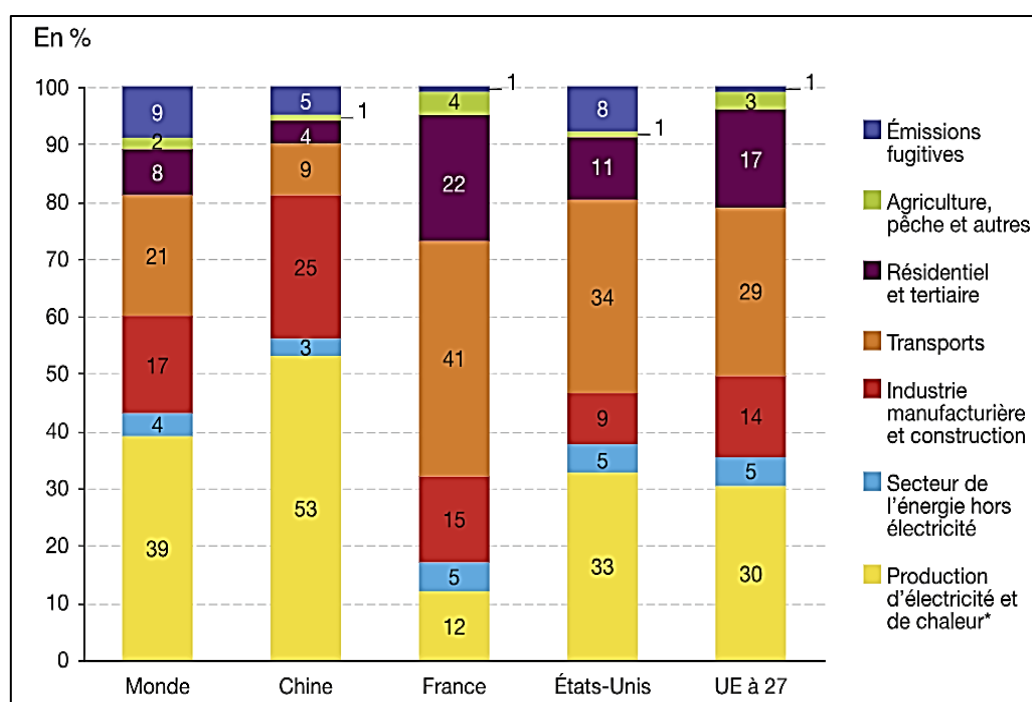


Figure 1. 8 : Les émissions de gaz à effet de serre causées par la combustion d'énergie varient selon les secteurs [21].

### 1.5.4 Les émissions de gaz à effet de serre au niveau national

En 2020, l'Algérie a produit 220 544,85 kt CO<sub>2</sub> eq d'émissions de gaz à effet de serre, qui sont réparties conformément au tableau ci-dessous[22].

Tableau 1. 3 : Analyse des émissions de gaz à effet de serre de l'Algérie en 2020 [22].

Secteur	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HFCs	SF <sub>6</sub>	TOTAL	%
Energie	156.546	22.323	803	NO	NO	179.671	81,5
Combustion	148.183	287	776	NO	NO	149.246	67,7
Fugitives	8.362	22.035	27	NO	NO	30.424	13,8
Procédés industriels et utilisation des produits	10.878	6	39	1.206	36	12.166	5,5
Agriculture, Forêt, et Autres Affectations des Terres	NE	12.434	7.142	NO	NO	19.575	8,9
Déchets	409	7.922	801	NO	NO	9.132	4,1
<b>TOTAL</b>	<b>167.833</b>	<b>42.685</b>	<b>8.785</b>	<b>1.206</b>	<b>36</b>	<b>220.545</b>	<b>100,0</b>
<b>Pourcentage</b>	<b>76.1</b>	<b>19,4</b>	<b>4,0</b>	<b>0,5</b>	<b>0,0</b>		

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

Pour l'année 2020, on estime que les émissions totales de gaz à effet de serre ont atteint 220 544,85 tonnes CO<sub>2</sub>eq. Cela indique une hausse de 129,9 % en comparaison avec 1990 (95 948,77 kt CO<sub>2</sub>eq) et de 50,7 % en comparaison avec 2005 (146 390,81 kt CO<sub>2</sub>eq). Cette augmentation est essentiellement due à des hausses notables dans les domaines de l'énergie, de la fabrication et de la construction, mais aussi dans le domaine des transports.

### 1.5.5 Évolution nationale des émissions totales par secteur d'activité

La figure 1.9, illustre comment chaque secteur a évolué en termes de contribution aux émissions nationales brutes et permet de prévoir les secteurs sur lesquels il est nécessaire d'organiser des mesures visant à diminuer les émissions de GES [22].

En Algérie, le secteur de l'énergie concerne la combustion de combustibles et les émissions fugitives est largement responsable des émissions de GES, représentant 70,3% du total des émissions nationales en 1990 et 81,5% en 2020. En 1990, les procédés industriels ainsi que les usages des produits (PIUP) constituaient 14,4 % du total des émissions de gaz à effet de serre au niveau national, tandis qu'en 2020, ils n'en représentaient plus que 5,5 %.

L'agriculture représentait 11,7 % des émissions de GES en 1990, et en 2020, elle a représenté 8,9 %. En 1990, le secteur des déchets représentait 3,6% du total des émissions de gaz à effet de serre au niveau national et 4,1% en 2020.

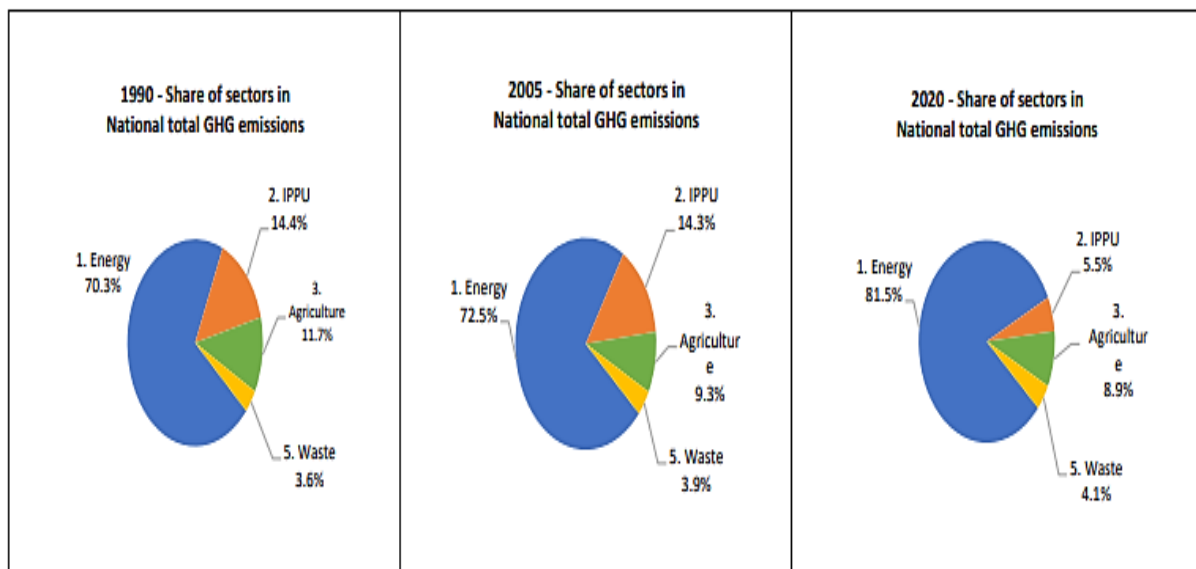


Figure 1.9 : Impact des secteurs sur les émissions nationales brutes de gaz à effet de serre [22].

### 1.5.6 Les émissions de gaz liées au secteur énergétique

La part du CO<sub>2</sub> dans les émissions du secteur de l'énergie est la plus significative, représentant 80,5% des émissions totales du secteur en 1990 et passant à 87,1% en 2020, ce qui entraîne une baisse de la proportion des émissions de CH<sub>4</sub>, qui passe de 19,0 % pour représenter 12,4

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

% de la totalité du secteur. Le restant, qui dépasse 0,4 %, correspond à la proportion de N<sub>2</sub>O., Comme le montre la figure ci-dessous[22].

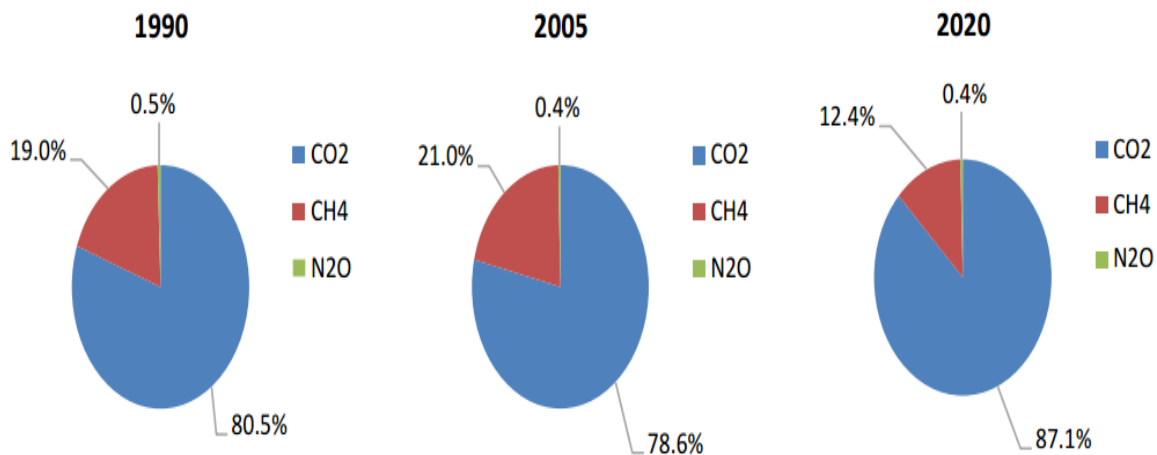


Figure 1. 10 : Répartition des émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'énergie pour chaque gaz [22].

### 1.6 Lutter contre le changement climatique

#### 1.6.1 La nécessité de lutter contre le changement climatique

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est recommandé de limiter le réchauffement de la planète à 1,5 degré Celsius afin de prévenir les conséquences les plus graves du changement climatique[23]. Toutefois, le GIEC indique également que le monde n'est pas en mesure d'atteindre cet objectif, en raison de l'insuffisance des engagements actuels des pays en termes de réduction des émissions. En attendant de prendre des mesures, il sera de plus en plus difficile et coûteux de réduire les conséquences du changement climatique. Il est donc essentiel de prendre des mesures urgentes et immédiates afin de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et de limiter le réchauffement climatique.

#### 1.6.2 L'importance des énergies renouvelables pour réduire le changement climatique

La mise en place de sources d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire, éolienne et hydroélectrique joue un rôle crucial dans la réduction du changement climatique. Ces sources ont un faible ou aucun impact sur l'environnement et offrent une concurrence de plus en plus importante comparées aux énergies fossiles. Par ailleurs, les énergies renouvelables ont la capacité de garantir la sécurité énergétique, générer des emplois et favoriser la croissance économique. Toutefois, la mise en place des énergies renouvelables dans le réseau peut poser des difficultés, comme l'interruption et le stockage. Il est donc essentiel de combiner les

## **La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique**

---

sources d'énergie renouvelables avec des solutions de stockage de l'énergie pour garantir un apport énergétique à la fois fiable et stable [24].

### **1.6.3 Les énergies renouvelables en Algérie**

Le gouvernement algérien s'est engagé vers les énergies renouvelables pour répondre aux enjeux environnementaux et à la nécessité de préserver les ressources énergétiques fossiles, en mettant en place un programme de développement des énergies renouvelables. Ce programme ambitieux a été approuvé en février 2011, soumis en mai 2015 à une révision et placé sous la priorité nationale en février 2016[25].

Le programme actualisé sur les énergies renouvelables (EnR) vise à installer environ 22 000 MW de capacité d'énergie renouvelable pour le marché national, d'ici à 2030, Tout en préservant l'option d'exporter comme but stratégique, si les circonstances du marché permettaient cela.

L'objectif de l'Algérie est de devenir un acteur clé dans la production d'électricité d'origine solaire et éolienne en incorporant la géothermie, la biomasse, la cogénération. Ces domaines de l'énergie seront cruciaux pour favoriser une progression économique durable et générer une nouvelle forme de croissance.

La mise en œuvre des projets de production d'électricité d'origine renouvelable destinés au marché national se fera en deux phases :

- La première étape de 2015 à 2020 : Consistera à construire une puissance de 4010 MW, soit une combinaison de photovoltaïque et d'énergie éolienne, ainsi que 515 MW, soit une combinaison de la géothermie, la biomasse et la cogénération.
- La deuxième étape de 2021 à 2030 : L'amélioration de la liaison électrique le long du nord du Sahara (Adrar) facilitera la mise en place d'importantes centrales d'énergie renouvelable dans les zones d'In Salah, d'Adrar, de Timimoune et de Béchar, tout en les intégrant au système énergétique national. À ce stade, le solaire thermique est susceptible d'être viable sur le plan financier.

Le programme national d'énergie renouvelable à mettre en place pour le marché national s'élève à 22 000 MW, répartis de la manière suivante (Tableau 1.4) :

## La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique

Tableau 1. 4 : Le programme national d'énergie renouvelable [25].

Unité :MW	1 <sup>ère</sup> phase 2015-2020	2 <sup>ème</sup> phase 2021-2030	Total
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
<b>Total</b>	<b>4 525</b>	<b>17 475</b>	<b>22 000</b>

### 1.6.4 La nécessité de l'efficacité énergétique pour lutter contre le changement climatique

La préservation de l'efficacité énergétique joue un rôle crucial dans la réduction du changement climatique. Les émissions de gaz à effet de serre sont principalement causées par les bâtiments, les transports et l'industrie. En améliorant l'efficacité énergétique dans ces domaines, il est possible de diminuer les émissions et de réaliser des économies sur les dépenses énergétiques. Par exemple, les constructions économes en énergie utilisent moins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement, ce qui diminue la nécessité de sources d'énergie fossiles [24].

### 1.6.5 Les approches NZE « Net Zero Energy » pour réduire le changement climatique

Le concept de NZE est devenu de plus en plus populaire ces dernières années, en particulier dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. NZE désigne essentiellement un édifice ou une communauté qui génère autant d'énergie qu'il en consomme au cours d'une année. Il s'agit d'une combinaison de conception énergétique économe, de production d'énergie renouvelable sur place et parfois de stockage d'énergie utilisée. Le NZE vise à diminuer les émissions de gaz à effet de serre et à combattre le changement climatique en diminuant la dépendance aux combustibles fossiles et en favorisant l'utilisation de sources d'énergie propres. Par exemple, les bâtiments NZE produisent autant d'énergie qu'ils en utilisent, en exploitant des sources d'énergie renouvelable comme l'énergie solaire et géothermique. Ceci permet de diminuer les émissions de gaz à effet de serre et les dépenses énergétiques, ce qui rend les bâtiments NZE attractives pour les particuliers comme pour les

## **La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique**

---

entreprises. Il est également possible d'appliquer les stratégies NZE aux secteurs de transports, de l'industrie et de l'agriculture, ce qui permet de diminuer les émissions dans ces derniers[24].

### **1.6.5.1 Les stratégies de NZE**

Il y a plusieurs techniques qui sont susceptibles être employées pour atteindre NZE. Ces éléments comprennent [24]:

- Pour atteindre la NZE, il est essentiel de commencer par concevoir les bâtiments et les communautés en prenant en compte l'efficacité énergétique. Il est possible d'inclure des caractéristiques comme une isolation de qualité supérieure, une étanchéité à l'air, un éclairage et des appareils performants.
- Après avoir mis en place les mesures d'efficacité énergétique, la prochaine étape consiste à générer de l'énergie renouvelable sur place. Cela englobe les systèmes géothermiques, les panneaux solaires, les éoliennes et d'autres sources d'énergie renouvelable.
- Pour assurer la disponibilité de l'énergie lorsqu'elle est requise, il est fréquemment indispensable d'intégrer des systèmes de stockage d'énergie comme le stockage thermique ou les batteries. Cela facilite le stockage de l'énergie lorsqu'elle est produite et son utilisation lorsqu'elle est requise.
- Enfin, il est primordial de superviser et de gérer la consommation d'énergie afin d'assurer un fonctionnement optimal du bâtiment ou de la communauté au maximum. Cela englobe des aspects tels que la surveillance en temps réel de l'énergie, les systèmes de contrôle automatique et les systèmes de réaction à la demande.

### **1.6.5.2 Avantages des bâtiments à énergie nette zéro**

Outre la diminution de la consommation d'énergie et de la production de gaz à effet de serre, un bâtiment NZE présente également les bénéfices suivants [26]:

- Un niveau de confort accru : La position favorable du bâtiment, les fenêtres et les surplombs, tout comme la renforcer de l'étanchéité à l'air du bâtiment, rendent un bâtiment NZE moins exposé aux courants d'air et moins sensible aux variations de température irrégulières.
- Une amélioration de la qualité de l'air intérieur : Au lieu d'utiliser une enveloppe de bâtiment non étanche qui autorise l'infiltration de polluants, d'humidité excessive et d'air non conditionné dans le milieu domestique, Les constructions NZE étanches à

l'air sont équipées de ventilateurs de récupération d'énergie, qui procurent un air frais à l'intérieur en consommant le moins d'énergie possible.

- **Résilience** : Les constructions NZE offrent une résistance accrue aux conditions climatiques extrêmes et peuvent constituer un refuge en cas de perturbations, telles qu'une interruption prolongée du courant ou une autre situation d'urgence. Les édifices de type NZE peuvent conserver une température de vie plus longtemps, garantissant ainsi la protection des résidents. La ventilation équilibrée permet également de se protéger contre les incendies de forêt ou d'autres incidents qui génèrent des polluants externes.
- **Économiser l'énergie** : Grâce à la conception intelligente qui prend en compte l'énergie dès le départ permet de réaliser des économies d'énergie en réduisant l'utilisation d'énergie pour maintenir la chaleur du bâtiment en hiver et la fraîcheur en été. Cela se traduit souvent par des factures d'énergie moins élevées, qui compensent les dépenses supplémentaires liées aux mesures d'efficacité énergétique intégrées.
- **Un apport écologique** : Il est clair que la réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi que de la consommation d'énergie constitue un avantage majeur pour l'environnement. Une approche plus élaborée peut aussi conduire à une réduction des ressources nécessaires à la construction d'un bâtiment.
- **Les bâtiments NZE bénéficient de la prime de marché pas uniquement en raison de l'amélioration du confort ou de la réduction des factures d'énergie, mais également en raison de leur grande durabilité.**

### 1.7 Conclusion

La question de l'énergie et du développement dans les marchés en développement pose des problèmes importants tant au niveau national qu'international. L'incapacité à répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs de milliards de personnes est susceptible d'accroître la demande d'énergie. Les réserves d'énergies fossiles (du pétrole, du charbon et du gaz) sont nombreuses et les technologies pour les exploiter évoluent, cependant, la consommation de ces combustibles engendrera sans aucun doute des problèmes de pollution atmosphérique locale ayant des répercussions à l'échelle mondiale, une augmentation des gaz à effet de serre ainsi qu'un changement climatique. Il est donc recommandé de recourir à des sources d'énergie locales, durables, respectueuses de l'environnement et renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique.

## **La transition énergétique et la lutte contre le changement climatique**

---

La transition énergétique a pour objectifs de protéger le climat, de réduire la consommation d'énergie, de minimiser les conflits géopolitiques liées à l'énergie et sur le long terme, de sortir complètement du nucléaire. Celle-ci vise à répondre à l'urgence de la lutte contre le changement climatique. Par ailleurs, l'efficacité énergétique va dans le sens de la stratégie du pays qui consiste à accroître son indépendance énergétique et à consolider sa compétitivité à long terme grâce à une réduction de sa facture énergétique.

Le concept de croissance verte est une nouvelle approche économique qui vise à accompagner la transition énergétique. Son objectif est de promouvoir la croissance économique et le développement tout en réduisant son impact sur l'environnement. Il s'agit donc de trouver un équilibre entre développement durable et la croissance économique.

Dans cette situation, le chapitre qui suit examine en détail l'utilisation de l'énergie géothermique, notamment pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments.



**Chapitre 2    Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique**



## 2.1 Introduction

### 2.1.1 Historique de la géothermie

La géothermie est l'énergie thermique présente dans la terre. Elle tire son nom du grec « geo » (terre) et « thermo » (chaleur). C'est une source d'énergie renouvelable, car elle génère constamment de la chaleur dans la Terre. Le terme géothermie fait donc référence à la fois au domaine scientifique consacré à l'étude des phénomènes thermiques internes de la Terre et à toutes les technologies employées pour extraire la chaleur du sous-sol. Cette chaleur est utilisée pour générer de l'électricité, du chauffage ou du rafraîchissement.

La géothermie dite Haute énergie (ou Haute enthalpie) démarra au tout début du siècle à Larderello en Italie. En 1904, le prince G. Conti alluma cinq ampoules grâce à une dynamo actionnée par un moteur alternatif utilisant de la vapeur géothermique[27]. L'année suivante la première centrale géothermique expérimentale de 20 kW fut construite. La première vraie centrale géothermique entra en service en 1913 et comprenait un premier groupe à turbine de 0,25 MW. En 1944, la puissance atteignait 127 MW, elle fut en grande partie détruite par la guerre[28]

Entre le début du siècle et 1960, 23 pays ont été visités et une cinquantaine de sites haute énergie ont été identifiés, ce qui représente un total de près de 400 MW installés, soit 285 MW en Italie seulement. En effet, la production d'électricité géothermique à l'échelle mondiale va commencer à augmenter rapidement dans les vingt années qui suivent. En moyenne, l'augmentation annuelle est de 17,5 %, ce qui entraîne une augmentation de la production totale de 400 MW en 1960 à 2 500 MW en 1980. Ensuite, l'augmentation de la capacité mondiale sera encore plus rapide, puisque celle-ci est actuellement d'environ 7 000 MW. Ces progrès remarquables sont le fruit d'une part des crises pétrolières du début des années 1970, qui ont encouragé les études et l'exploitation de sources d'énergie alternatives, D'un autre côté, les pays en développement sont intéressés par l'existence d'une ressource nationale permettant de produire de l'électricité.

La géothermie de basse énergie (extraction d'une eau à une température inférieure à 90 °C) a été initialement employée pour le chauffage. Aux États-Unis, des expériences sporadiques ont eu lieu à Boise (Idaho) et Klamath Falls (Oregon) dès la fin du dix-neuvième siècle, après le réseau très ancien et rudimentaire de Chaudes-Aigues. Celui de Reykjavik (Islande) a été le premier véritable réseau de chauffage urbain alimenté par la géothermie, datant de 1930. Il était capable de chauffer une centaine de maisons, deux piscines, un hôpital et une école. Aujourd'hui, il chauffe presque toute la capitale islandaise. Par la suite, de grands réseaux de

chaleur urbaine utilisant l'énergie géothermique seront développés en Italie, France, URSS, Turquie, Roumanie, Géorgie, États-Unis, Chine[29].

L'utilisation actuelle de l'énergie géothermique fait appel à une source de chaleur à basse température, qui nécessite un générateur pour transférer les calories nécessaires au chauffage ou à la climatisation d'une maison.

### 2.1.2 Contexte général de la géothermie

L'énergie thermique circule à un taux moyen de près de  $59 \text{ mW/m}^2$  [ $1,9 \times 10^{-2} \text{ Btu/h/ft}^2$ ] à travers la croûte terrestre, ce qui explique les vastes réserves naturelles de chaleur de la Terre. La température de la Terre dépasse 1 000 degrés Celsius pour quatre-vingt-dix-neuf pour cent, due à l'accumulation de chaleur résiduelle provenant des origines primordiales de la Terre et à la désintégration de substances radioactives.

La terre répartit l'énergie thermique entre la roche hôte et le fluide naturel au niveau de ses fractures et de ses pores. Dans leur état naturel in situ, ces fluides sont principalement composés d'eau avec des quantités variables de sels dissous. Ils se présentent généralement dans un état liquide, bien qu'ils puissent aussi être un mélange liquide-vapeur saturée ou une phase vapeur surchauffée[30].

Le potentiel de la géothermie est énorme pour notre développement responsable et durable. Elle contribue à notre autonomie énergétique en assurant le chauffage et le refroidissement des habitations et des entreprises, l'alimentation des réseaux de chaleur et la génération d'électricité.

Contrairement aux énergies fossiles, qui se concentrent sur certains sites spécifiques de la croûte terrestre, la géothermie se trouve dans tous les sous-sols et sous toutes les conditions climatiques. Elle est utilisée de différentes manières, car elle offre une grande variété de températures et de profondeurs. À faible profondeur, à n'importe quel endroit du monde, elle peut être utilisée pour chauffer et refroidir les maisons. Plus profondément, et en fonction de la nature des formations géologiques et de la constitution des roches, l'extraction de cette énergie sera plus ou moins simple grâce à des techniques bien maîtrisées, rendant possible d'autres utilisations, comme la production d'électricité[31].

Ce chapitre souligne les principes fondamentaux de la géothermie, les éléments contextuels et les caractéristiques techniques principales. On parle souvent de l'énergie géothermique superficielle et de son utilisation principale pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

### 2.2 Le principe de la géothermie

La géothermie fait référence aux méthodes qui permettent de retirer la chaleur naturelle du sous-sol et des nappes d'eau souterraines (aquifères) afin de l'exploiter comme source d'énergie (produire de l'électricité ou le chauffage). D'un côté, cette chaleur est due aux phénomènes qui ont donné naissance à la planète il y a plusieurs milliards d'années, et de l'autre côté, à la radioactivité naturelle.

Le sous-sol est chaud à différents endroits de la planète, mais aussi à différentes profondeurs : à mesure que l'on s'enfonce vers le centre de la Terre, la température augmente. Le gradient thermique désigne cette variation de la température en fonction de la profondeur. Elle atteint une température mondiale moyenne de +3 °C tous les 100 mètres. Cependant, elle est capable d'atteindre une température de +10 °C/100 m dans les zones volcaniques, là où du magma est retenu sous la croûte terrestre[32].

Elle bénéficie d'une source d'énergie inépuisable, à la différence des énergies fossiles comme le pétrole et le gaz naturel. En réalité, la chaleur émise par le sol est infinie. La méthode d'extraction de l'énergie est simple : des capteurs sont installés dans le sol près du logement afin de capter les calories provenant de la Terre. Dans un circuit, un fluide caloporteur se déplace, accumulant des calories. Ce liquide s'évapore sous pression, ce qui libère la chaleur à l'intérieur du système de chauffage. Le principal avantage écologique de l'énergie géothermique réside dans sa faible consommation électrique et sa faible production de CO<sub>2</sub>[33].

#### 2.2.1 Le fonctionnement de la géothermie

Les techniques de récupération de la chaleur et son utilisation diffèrent en fonction de la température du sous-sol. En général, on distingue deux catégories de géothermie.

##### 2.2.1.1 La géothermie à haute énergie (températures supérieures à 90 °C)

Les hautes températures favorisent une récupération accrue d'énergie et la production d'électricité[32].

- **L'énergie géothermique très haute température (plus de 150 °C) :** Ce type d'énergie se retrouve dans ce que l'on appelle des réservoirs fracturés, autrement dit des zones du sous-sol présentant des failles naturelles, telles que celles utilisées dans la centrale de Rittershoffen, en Alsace. En général, des forages sont réalisés à une profondeur de plus de 1 500 mètres pour faire circuler l'eau présente dans ces fractures jusqu'en surface et la remonter grâce à la perméabilité et aux écoulements naturels existants dans le réseau de failles. Il est aussi envisageable d'injecter de l'eau sous

pression afin de générer de la vapeur. Après avoir atteint la surface, l'eau géothermale est convertie en chaleur ou en électricité grâce à une centrale qui utilise un cycle organique de Rankine, qui permet de générer de l'électricité en utilisant de la chaleur dégagée par un fluide organique.

- **L'énergie géothermique à haute température (entre 90 et 150 °C) :** consiste à capter la chaleur afin de la transformer en vapeur ou en eau chaude, telle qu'elle est pratiquée à la centrale de Bouillante en Guadeloupe. Les réservoirs peuvent être de deux types : des zones spécifiques situées à une profondeur inférieure à 1 000 mètres ou des bassins sédimentaires situés entre 2 000 et 4 000 mètres. Il est essentiel d'avoir un fluide caloporteur pour produire de l'électricité, c'est l'eau géothermale qui transfère sa chaleur à un autre liquide, lequel se vaporise à basse température et entraîne l'action d'une turbine qui génère de l'électricité.

### 2.2.1.2 La géothermie à basse énergie (températures inférieures à 90 °C)

Elle est la plus accessible, en particulier pour les particuliers, puisqu'elle fonctionne à l'aide d'une pompe à chaleur. En général, elle sert de source d'énergie supplémentaire pour le chauffage des bâtiments[32].

- **L'énergie géothermique très basse température (inférieure à 30 °C) :** Elle s'intéresse à la chaleur contenue dans le sol ou dans l'eau du sous-sol à une profondeur maximale de 200 mètres. La température est relativement basse, mais elle offre la possibilité de récupérer de la chaleur destinée au chauffage et à la climatisation.
- **L'énergie géothermique à basse température (entre 30 et 90 °C) :** Les gisements se trouvent dans les aquifères profonds, à une profondeur située entre quelques centaines de mètres et 2 500 mètres. En revanche, la température, qui n'est pas suffisante pour générer de l'électricité, permet de produire de la chaleur par échange thermique direct. Cette option est destinée aux bâtiments de grande envergure.

En général, on utilise la géothermie à basse énergie pour assurer le chauffage des bâtiments.

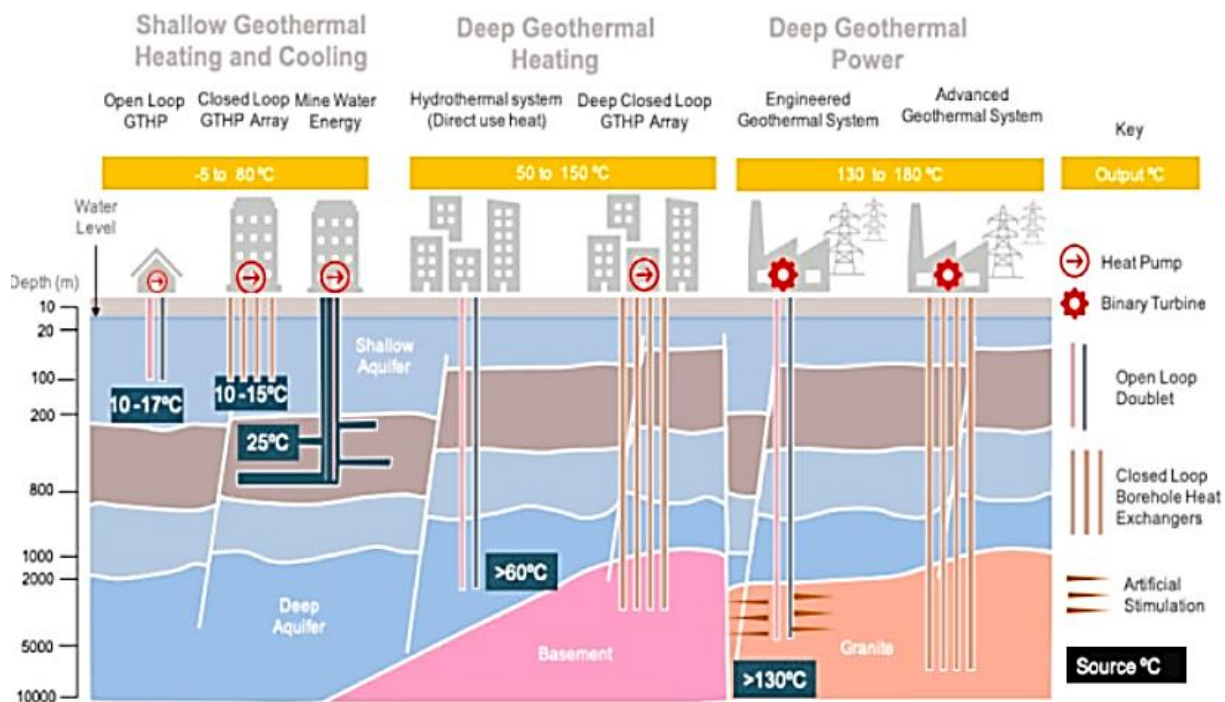


Figure 2. 1 : Les différents types d'énergie géothermique [34].

### 2.2.2 Les atouts et l'intérêt de l'énergie géothermique

- ❖ **La géothermie est accessible en permanence, pratiquement partout :** L'énergie géothermique est présente en grande quantité, à des profondeurs allant de quelques mètres à cinq kilomètres. Cependant, les réservoirs les plus profonds sont présents dans des formations géologiques particulières. Les dispositifs géothermiques qui exploitent cette ressource peuvent fonctionner tous les jours de l'année, quelles que soient les conditions météorologiques.
- ❖ **La géothermie est une énergie durable et écologique :**

L'énergie du sous-sol est utilisée directement par les technologies de la géothermie, sans nécessiter de transport ni de combustion. Ainsi, elles produisent un faible niveau de gaz à effet de serre et ne libèrent aucune particule fine ou molécule toxique.

Très peu de gaz à effet de serre sont émis par la géothermie de surface. Effectivement, la moyenne des coefficients de performance (appelés « COP ») des pompes à chaleur géothermiques est de 4, indiquant que chaque kWh électrique consommé par la pompe à chaleur génère 4 kWh de chaleur, parmi lesquels 3 sont issus de sources renouvelables (L'énergie calorifique libérée par le sous-sol).

Par conséquent, il est estimé que l'énergie géothermique de surface produit environ 45 g équivalent de CO<sub>2</sub> par kWh de chauffage, ce qui est lié à la consommation électrique de la pompe de chaleur. Celle-ci est près de 4 fois inférieure à celle des installations traditionnelles

à l'électricité, 6 fois inférieure à celle au gaz naturel et 7 fois inférieure à celle au fioul pour le chauffage.

### ❖ **La géothermie présente un coût total compétitif :**

Souvent, l'investissement initial pour la géothermie est plus élevé que pour les énergies traditionnelles (électricité, fioul, gaz), cependant son coût de fonctionnement est considérablement plus faible.

En ce qui concerne le chauffage d'une maison individuelle, la géothermie permet de minimiser la facture énergétique de fonctionnement de manière durable, car elle ne concerne que l'apport d'énergie conventionnelle nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur. De cette manière, on peut moins dépendre de la fluctuation des prix des énergies fossiles.

Cette énergie renouvelable est actuellement encouragée au niveau public et des dispositifs de soutien, à la fois financiers et techniques, existent.

### ❖ **La géothermie est une énergie renouvelable innovante :**

Grâce à sa capacité à être modulée et renouvelée, ainsi qu'à sa compatibilité avec d'autres énergies, l'énergie géothermique présente un avantage dans la lutte contre le changement climatique et dans les pensées concernant la construction de la future ville durable.

### ❖ **La géothermie est une source d'énergie fiable :**

La mise en place de ces technologies est simple et efficace. Elles exploitent l'énergie durable de la planète. Les constructions géothermiques ont une durée de vie d'au moins 50 ans.

### ❖ **La géothermie est une énergie à la fois locale et discrète :**

La géothermie représente une source d'énergie locale, accessible presque partout. Elle nécessite une surface de terrain limitée pour sa mise en place et les équipements de production de chaleur sont intégrés harmonieusement dans l'environnement. Après la réalisation des travaux, le forage est quasiment invisible et ne produit aucun son ni odeur. Le zone d'opération n'est pas grand, car il n'y a pas de réserve de combustible. Les constructions géothermiques peuvent donc être effectuées à la fois en milieu urbain et rural.

### **2.2.3 Limites et points à surveiller**

En tant que source d'énergie renouvelable, la géothermie est influencée par les conditions locales, notamment par la géologie du sous-sol. Les régions volcaniques sont donc les plus favorables à l'utilisation de la géothermie à grande échelle[32].

- ✓ Il est essentiel d'utiliser localement la chaleur produite par la géothermie, puisque le transfert vers de longues distances entraîne des pertes thermiques. Ce n'est pas le cas de l'électricité, qui est transportée par les lignes électriques.

- ✓ Un investissement initial élevé (forage, pompe à chaleur, etc.) est nécessaire, mais il est rentabilisé grâce à un prix du kilowattheure (kWh) très concurrentiel.
- ✓ Si on ne laisse pas les eaux souterraines se réchauffer durant leur circulation dans le sous-sol, les réservoirs peuvent s'épuiser avec le temps. Le plafonnement des quantités de chaleur prélevées et la limitation de l'exploitation des réservoirs dans le temps sont donc nécessaires.

### 2.2.4 Les applications de la géothermie

L'énergie géothermique présente diverses applications [35]:

1. La géothermie produire du chauffage et de la climatisation : La chaleur du sol est utilisée par les pompes à chaleur géothermiques pour chauffer ou rafraîchir des édifices résidentiels. Il est possible d'utiliser un système de pompe à chaleur géothermique pour diminuer significativement les dépenses énergétiques d'une maison familiale, ou encore pour soutenir le développement durable d'une entreprise en optant pour cette méthode plus respectueuse de l'environnement pour chauffer ses locaux.
2. La géothermie permet de produire de l'eau chaude sanitaire : L'eau chaude est fournie par la géothermie pour les besoins privés et industriels. Cette source d'énergie peut par exemple être utilisée dans les vestiaires des centres sportifs et des piscines, afin de garantir une alimentation en eau chaude permanente et économique.
3. La géothermie peut être utilisée pour alimenter des réseaux de chauffage urbain : La chaleur géothermique est utilisée pour chauffer des habitations, des établissements publics et des infrastructures telles que les écoles et les hôpitaux, dans des quartiers entiers. La géothermie peut également servir à produire de l'eau chaude pour les piscines municipales.
4. L'énergie géothermique permet de produire de l'électricité : La chaleur extraite aux profondeurs de la Terre dans les régions volcaniques peut être transformée en électricité, ce qui en fait une ressource renouvelable et efficace. À titre d'exemple, l'Islande utilise les centrales géothermiques pour fournir de l'électricité propre à des milliers de foyers.

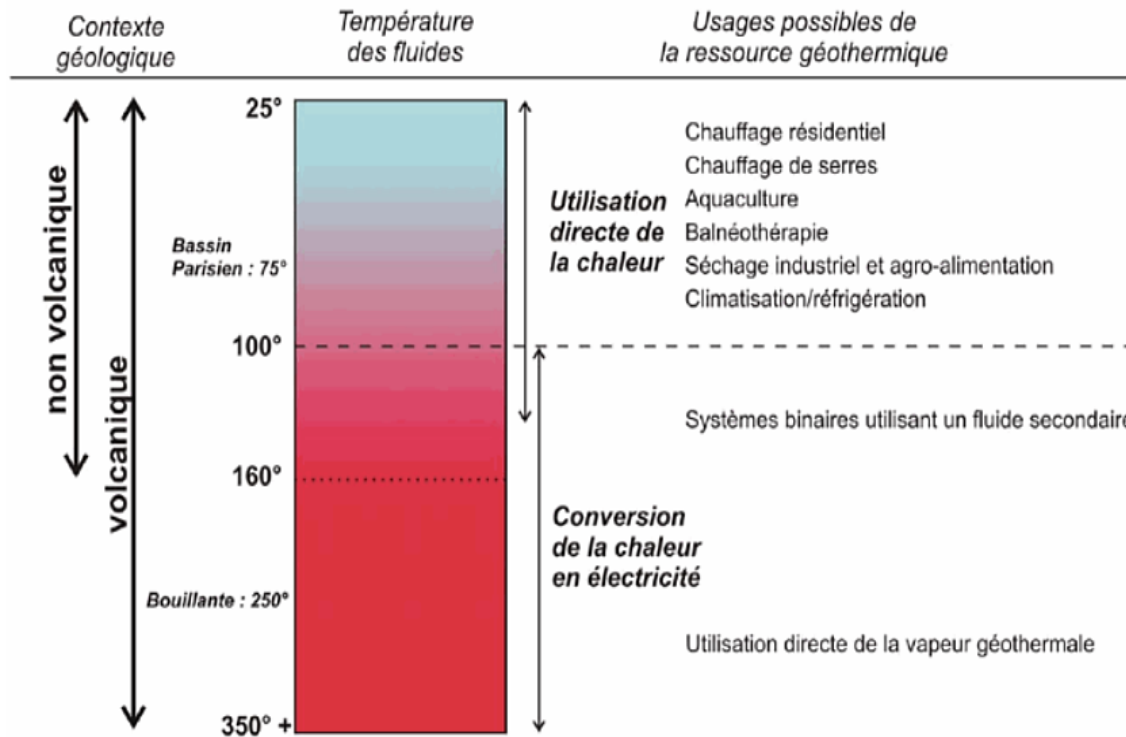


Figure 2. 2 : l'énergie géothermique dépend de la température des différentes couches géologiques[36].

## 2.3 L'évolution de la géothermie

### 2.3.1 La géothermie à l'échelle mondiale

La carte ci-dessous (figure 2.4) illustre l'utilisation de la géothermie pour générer de l'électricité ou exploiter directement la chaleur dans le secteur domestique[37].

La génération d'électricité géothermique se situe principalement sur la ceinture de feu du Pacifique, un ensemble de volcans qui bordent l'océan Pacifique sur la plupart de son périmètre. Par contre, la répartition de la production de chaleur est plus équilibrée.

Selon les estimations, la production mondiale d'énergie géothermique pourrait atteindre 70 à 80 GW. Cependant, seuls 15 % des gisements connus sont utilisés pour produire de l'électricité, ce qui représente à peine 13 GW [37].

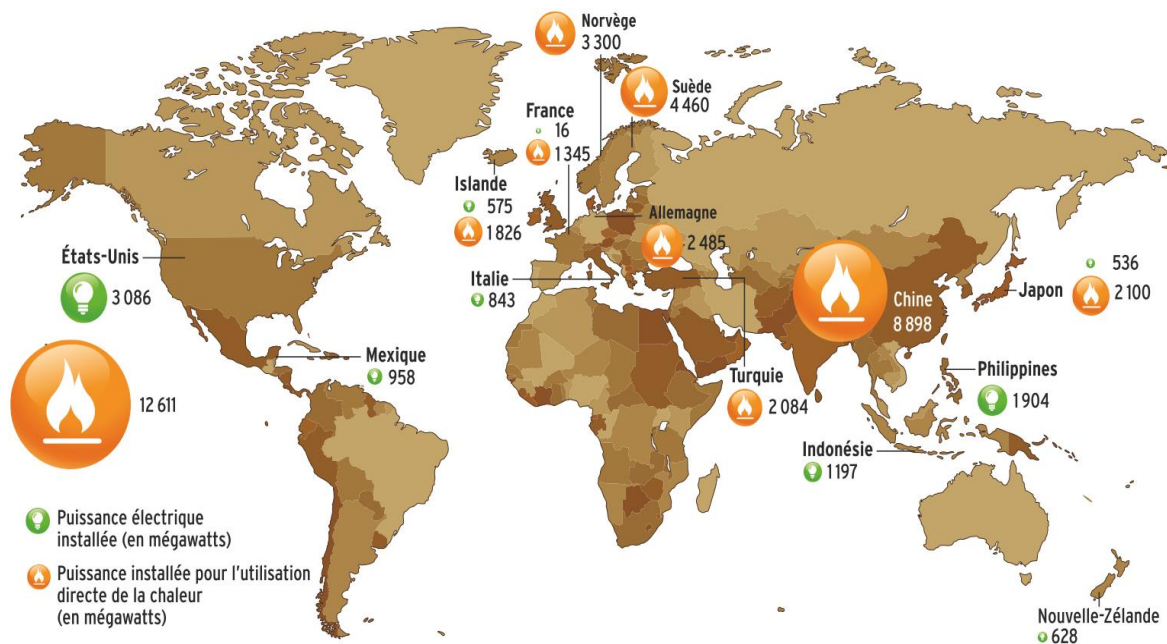


Figure 2. 3 : la répartition de l'utilisation de la géothermie pour générer de l'électricité ou exploiter directement la chaleur à l'échelle mondiale[37].

D'après l'association « Geothermal Energy », les centrales géothermiques installées à travers le monde ont une capacité totale d'environ 17,5 GW, avec une production énergétique estimée à environ 74 TWh par an. Les États-Unis sont le principal producteur d'énergie géothermique, suivis des Philippines, de l'Indonésie et du Mexique[38].

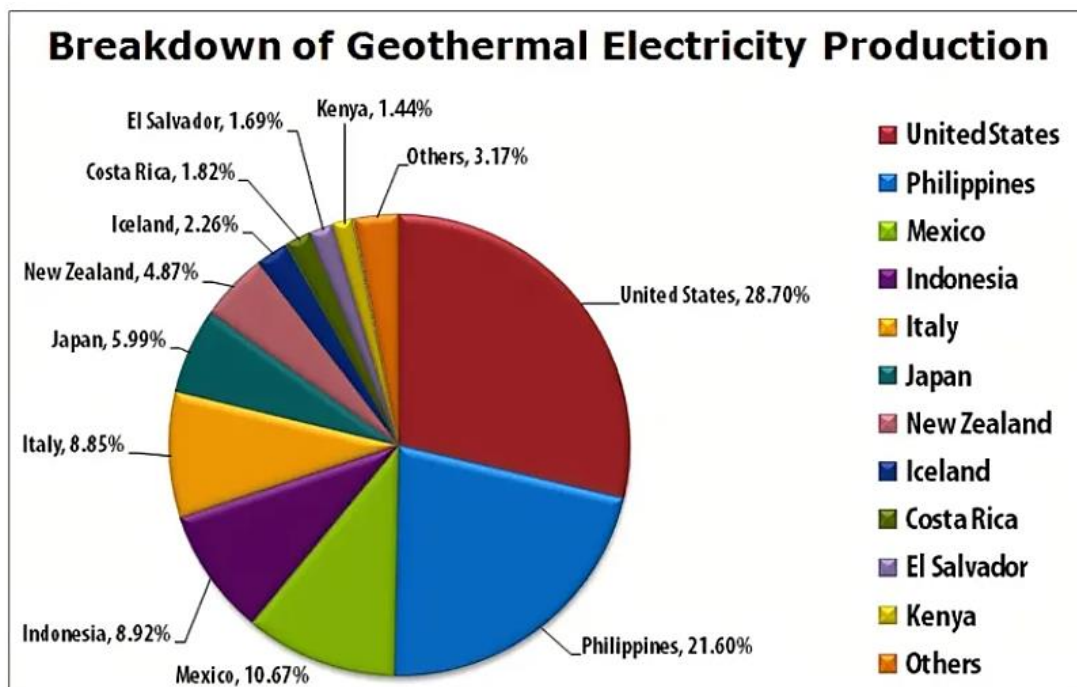


Figure 2. 4 : Répartition de la production d'électricité géothermique [38]

## Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique

### 2.3.1.1 Production européenne de chaleur à usage direct

Le tableau suivant illustre la génération de chaleur par utilisation directe de la chaleur géothermale. Ces données incluent la production d'énergie destinée à l'alimentation de réseaux de chaleur, ainsi que les autres utilisations (tertiaire, balnéothérapie, agriculture, etc.)[39].

Tableau 1 Production de chaleur à usage direct à échelle européenne.

Tableau 2. 1 : Production de chaleur à usage direct à échelle européenne [39].

Pays	Puissance (MWth)	Energie prélevée(ktep)
Hongrie	694.2	189.6
Italie	500	176.7
France	312	114
Allemagne	280	14
Roumanie	145.1	67.9
Slovaquie	142.8	13
Pologne	110	11.5
Autriche	97	16
Bulgarie	77.7	25.9
Grèce	69.8	12.5
Slovénie	44.7	14.7
Portugal	30.4	10.3
Espagne	22.3	8.3
Lituanie	17	8.7
Belgique	9	1.6
République tchèque	4.5	2.1
Royaume-Uni	3	1.9
Irlande	0.4	0.5
<b>Total</b>	<b>2 559.9</b>	<b>689.2</b>

### 2.3.1.2 Production mondiale de chaleur à usage direct

Concernant la production de chaleur utilisée directement dans 78 pays, sa capacité totale pour l'année 2009 est de 50,6 GW et sa production annuelle est de 121 600 GWh, soit 1 414 Mtep. Les États-Unis, la Chine, la Suède, la Norvège et l'Allemagne occupent les cinq premières

places du classement des pays en termes de capacité installée, représentant 60 % de la capacité mondiale[39].

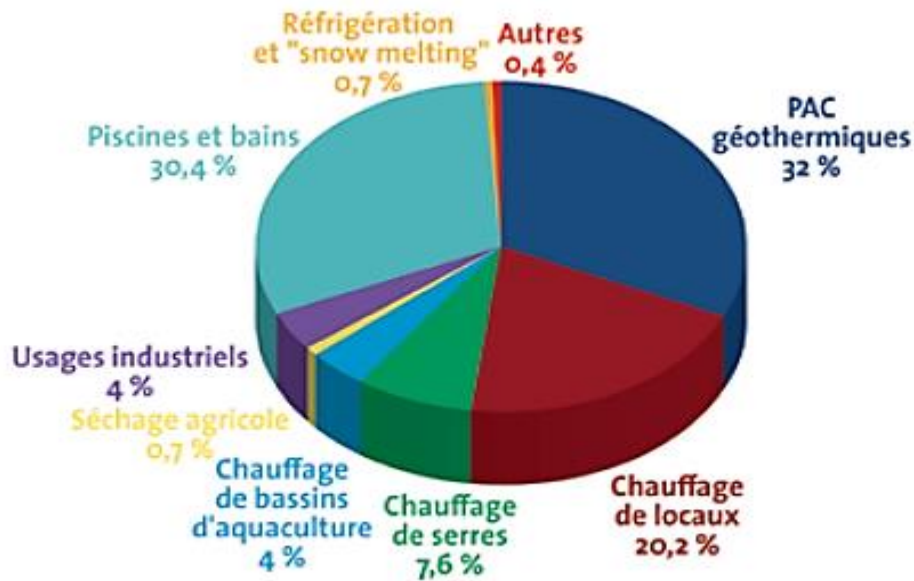


Figure 2. 5 : Répartition mondiale des utilisations de la chaleur[39]

### 2.3.2 La géothermie en Algérie

#### 2.3.2.1 Potentiel de l'énergie géothermique à l'échelle nationale

Grâce à la collecte des informations géologiques, géochimiques et géophysiques, une carte géothermique préliminaire a été établie. On a recensé plus de deux cent sources chaudes au sein de la région nord du pays, approximativement 33 % d'entre elles présentent des températures dépassant les 45°C. À Biskra, il y a des sources où les températures peuvent atteindre 118°C. D'après des recherches sur le gradient thermique, trois zones ont été identifiées où le gradient excède les 5°C/100m [40] :

- ✓ Secteur de Relizane et Mascara ;
- ✓ Secteur d'Aïne Boucif et Sidi Aïssa ;
- ✓ Secteur de Guelma et Djebel El Onk.

#### 2.3.2.2 La carte de la température en Algérie

On recense de multiples sources thermales classées, de basse à moyenne température, dans le nord de l'Algérie, réparties d'est en ouest, notamment dans la région est. Selon la figure qui suivra, les températures observées lors de l'apparition des fluctuent entre 22 °C et 98 °C. Les plus nombreuses sont les sources thermales avec une température comprise entre 22 et 45 °C,

## Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique

suivies de celles avec une température variante entre 45 et 60 °C et finalement de celles avec une température supérieure à 60 °C[41].

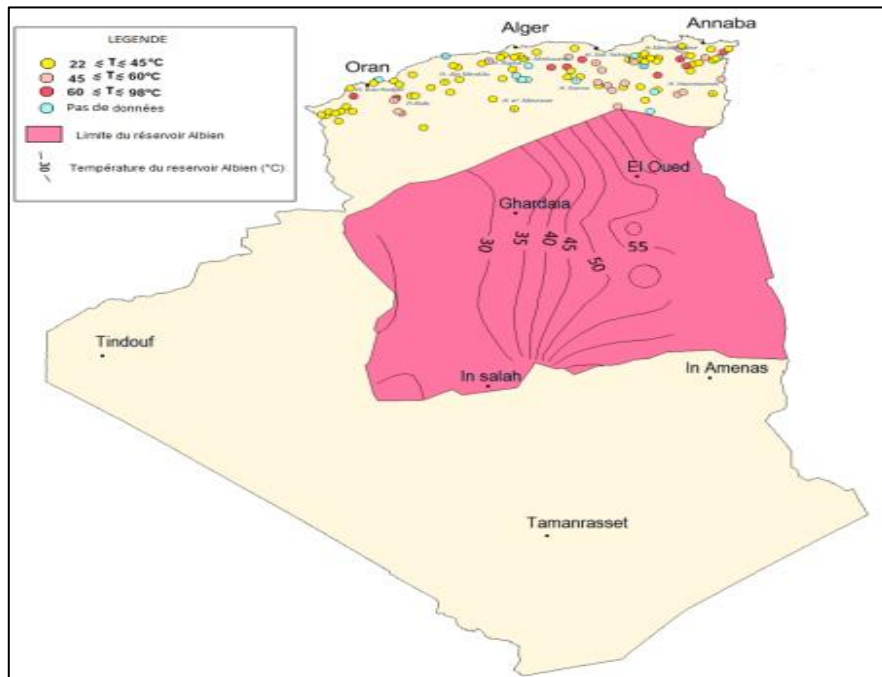


Figure 2. 6 : La carte de la température en Algérie[42].

### 2.3.3 L'utilisation de l'énergie géothermique en Algérie

L'Algérie possède un potentiel géothermique considérable. Malgré leur faible enthalpie, la plupart des ressources géothermiques ne sont pas adaptées à la production d'électricité, mais elles sont toujours adaptées au chauffage direct. Selon le tableau 2.2, l'Algérie occupe la première place en Afrique en matière d'utilisation directe de l'énergie géothermique, avec une puissance thermique installée de 54,64 MWt et un usage annuel d'énergie estimé à 1699,65 TJ/an[43].

La figure 2.8 présente la répartition de l'utilisation directe de la géothermie par pays en Afrique, qui témoigne de la présence d'une capacité thermique installée de plus de 39 % en Algérie[43].

Tableau 2. 2 : La capacité géothermique installée destinée à une utilisation directe en Afrique [43].

Pays	MW <sub>t</sub>	TJ/an
Algérie	54.64	1699.65
Égypte	6.80	88.00
Éthiopie	2.20	41.60
Kenya	22.40	182.62
Madagascar	2.81	75.59
Maroc	5.00	50.00
Sud de l'Afrique	2.30	37.00
Tunisie	43.80	364.00

## Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique

Total	140	2538
-------	-----	------

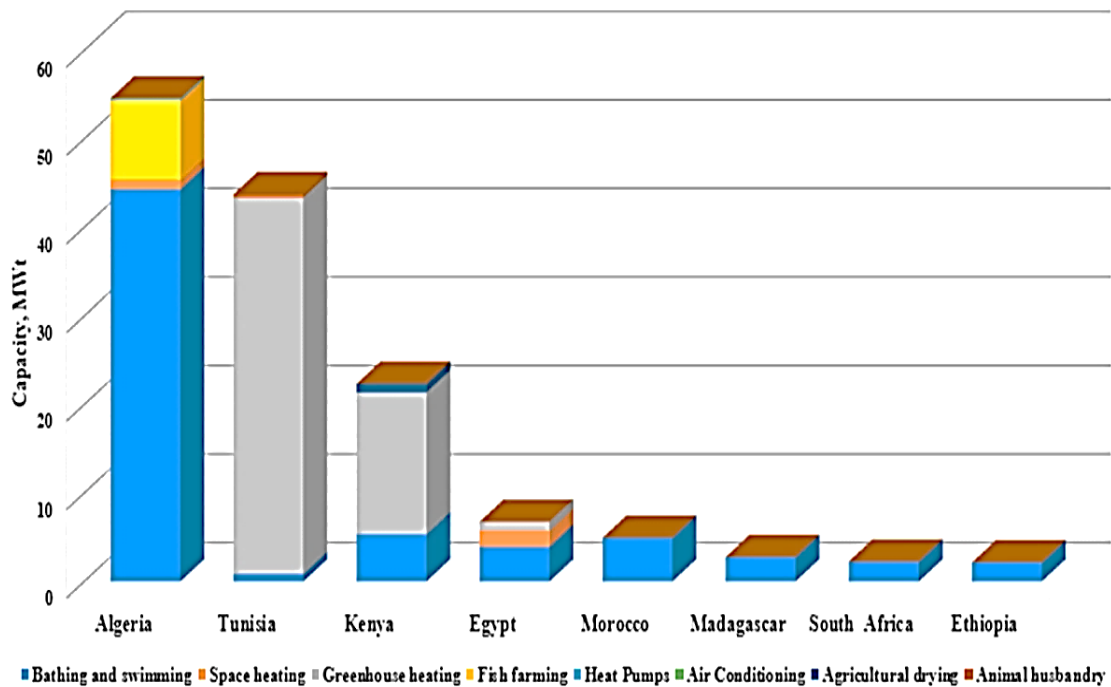


Figure 2. 7 : Analyse de la répartition de la capacité d'énergie géothermique à usage direct par pays en Afrique[43]

La balnéologie est le principal secteur d'utilisation de l'énergie géothermique en Algérie, représentant près de 82% (44,37 MWt) de l'utilisation totale (54,64 MWt). Par conséquent, seuls 18 % (10,28 MWt) sont employés dans d'autres domaines tels que la chaleur de l'espace, les pompes à chaleur et la culture des poissons, comme le montre la Figure 2.9.

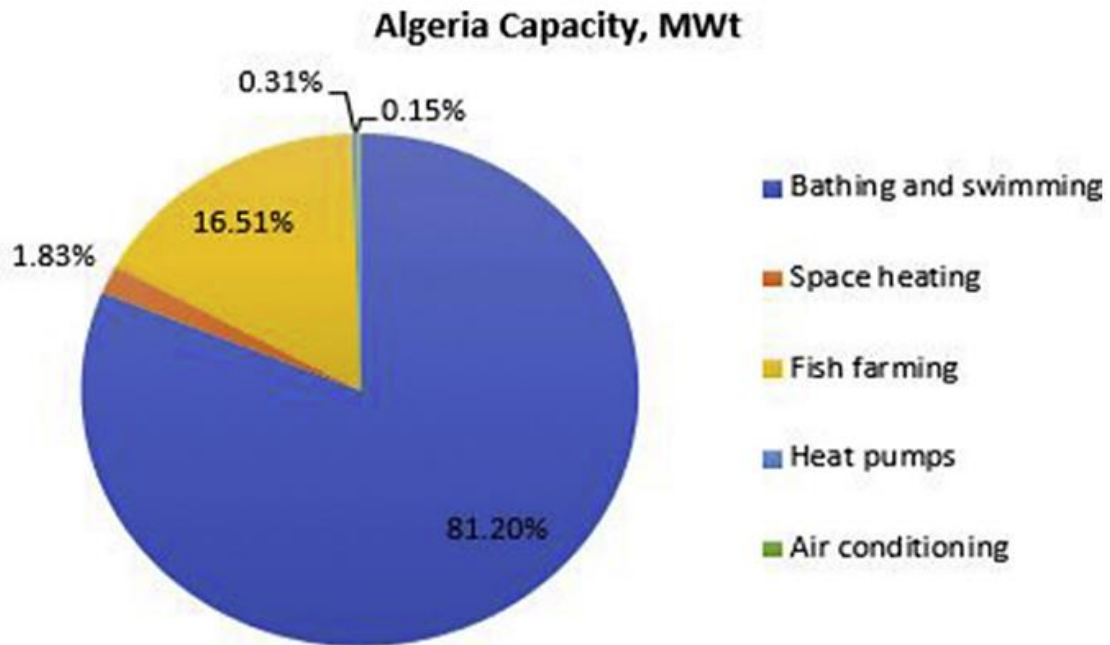


Figure 2. 8 : Répartition de la capacité totale de production d'énergie géothermique (MWt) en Algérie[43]

### 2.4 La géothermie superficielle : une source d'énergie verte sous nos bâtiments

Le concept de la géothermie superficielle repose sur le fait que la température du sous-sol demeure relativement constante tout au long de l'année, sauf aux premiers 5 à 8 mètres, ce qui le rend supérieur à celui de l'air externe en hiver et inférieur en été. Par conséquent, cette variation de température permettra d'extraire de la chaleur du sol en hiver pour chauffer les bâtiments équipés et d'en injecter en été pour refroidir ces structures. Il s'agit de systèmes géothermiques classés comme « à basse enthalpie », ce qui signifie qu'ils s'appliquent aux premiers 100 mètres de sol et qu'ils fonctionnent avec des fluctuations de température d'environ 10 à 20 °C. Ces systèmes sont reliés à une pompe à chaleur afin d'ajuster la température des échangeurs à celle requise pour chauffer ou refroidir les bâtiments[44].

Il existe deux façons d'exploiter les températures basses et constantes du sol [45]:

- ✓ Améliorer ou diminuer la température de la chaleur géothermique jusqu'à ce qu'elle puisse être utilisée grâce à l'utilisation de pompes à chaleur (pompes géothermiques, GSHP) ;
- ✓ Le stockage d'énergie thermique souterraine, UTES.

Les diverses méthodes géothermiques peu profondes qui permettent de transmettre la chaleur à l'extérieur ou au niveau du sol incluent[45] :

- ✓ Les échangeurs de chaleur souterrains horizontaux vont de 1,2 à 2,0 m de profondeur ou boucles horizontales ;
- ✓ Les échangeurs de chaleur de forage de 10 à 250 m de profondeur (boucles verticales) ;
- ✓ Les pieux énergétiques sont situés entre 5 et 45 mètres de profondeur ;
- ✓ Les puits d'eau souterraine de profondeur comprise entre 4 et plus 50 m ;
- ✓ Les eaux provenant des mines et des tunnels.

### 2.4.1 Les Géo structures thermiques

Dans un contexte de croissance constante des besoins énergétiques et de recherche croissante de sources d'énergie vertes, locales et renouvelables, les géo structures énergétiques occupent un emplacement idéal. Elles constituent une option novatrice et prometteuse pour chauffer ou refroidir les bâtiments et les installations.

#### 2.4.1.1 Élaboration d'une structure thermique géo structurale

Les Géo structures thermiques sont des structures géotechniques (telles que les pieux de fondation, les ouvrages de soutènement, les tunnels, etc.) qui ont d'abord une fonction mécanique. Ces derniers, équipés de tubes échangeurs de chaleur, permettent également de transmettre de l'énergie au milieu environnant pour chauffer ou climatiser un bâtiment grâce à une pompe à chaleur géothermique (PAC). Les géo structures thermiques font partie du domaine de la géothermie à très basse d'énergie. La température du fluide caloporteur, circulant dans les tubes des échangeurs, varie ici de +1 à +35 °C. Cette méthode est donc moins adaptée pour produire de l'eau chaude sanitaire [46].

En principe, le système peut servir à la fois à chauffer et à refroidir les bâtiments en mode double ou à chauffer ou à refroidir en mode simple. Le choix du mode de fonctionnement dépend notamment des conditions locales de circulation des eaux souterraines[44].

- En l'absence ou en cas de faible écoulement de l'eau souterraine, il est essentiel de recharger le sol pour maintenir sa température à long terme. Il est vivement recommandé d'utiliser le système en mode double pour assurer son efficacité.
- En revanche, si le sol est assez perméable (sable) et exposé à un écoulement d'eau souterraine de plus de 0,5 ou 1 m par jour, sa température revient automatiquement à l'équilibre et il est possible d'adopter un mode simple.

D'un autre point de vue, dans le premier cas (absence d'écoulement), le stockage saisonnier de chaleur est possible, alors que dans le deuxième (écoulement important), cela n'est pas réalisable. L'extraction est alors séparée de l'injection de manière propre.

### 2.4.1.2 Le déploiement de la technologie

L'évolution du nombre d'installations de 1993 à 2017 est illustrée dans le graphique ci-dessous (Figure 2.10), de même que la diminution correspondante des émissions de CO<sub>2</sub>. Il est probable que les données disponibles ne reflètent pas toutes les situations réelles, mais le graphique offre un aperçu de l'intérêt porté à cette technologie et de ses avantages[44]. Les pieux énergétiques demeurent largement utilisés dans de nombreuses applications. Il est fréquemment employé ce genre de fondation profonde afin de traverser une couche de sol avec une mauvaise solidité mécanique ou pour s'appuyer sur un soubassement rocheux, par exemple.

À partir des années 1980, les géo structures énergétiques ont connu un développement en Europe et dans le reste du monde. L'installation initiale a eu lieu en Autriche, mais la technologie s'est rapidement propagée en Suisse, en Allemagne et en Angleterre, comme l'indique la Figure 2.11.

Cependant, dans d'autres pays, tels que l'Italie et la France, leur développement social reste limité et leur déploiement est plus lente.

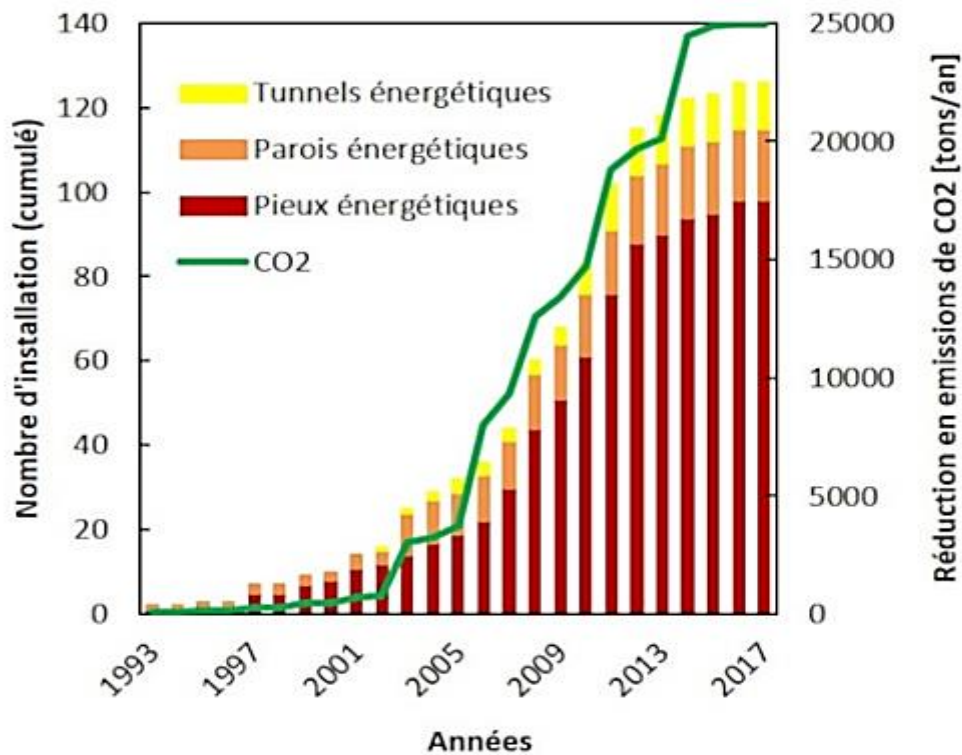


Figure 2. 9 : Le nombre d'installations et la diminution du CO<sub>2</sub> évoluent au fil du temps[44]

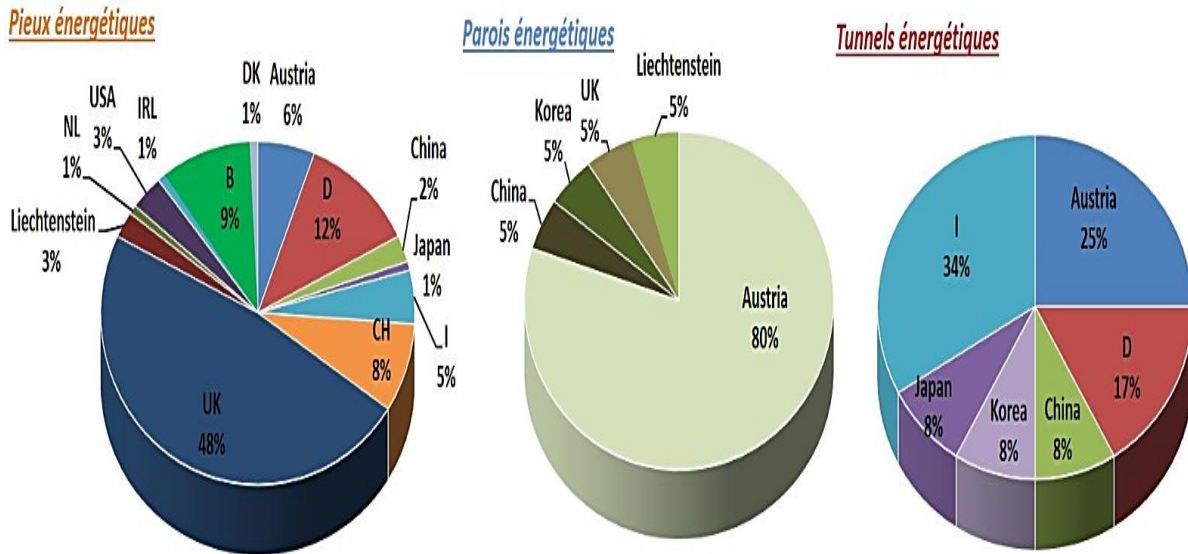


Figure 2. 10 : La répartition des structures énergétiques dans divers pays[44].

## 2.4.2 Techniques d'exploitation de la géothermie superficielle

Le système géothermique superficielle se compose d'un système primaire, d'un système secondaire et d'une pompe à chaleur[47], [48].

- Système primaire : Le réseau principal est composé de conduites fermées qui sont en contact avec le sol. L'énergie du bâtiment est échangée avec le sol grâce à des éléments en béton, tels que les pieux, les échangeurs de chaleur (horizontaux ou verticaux), des parois moulées, des épingles, des plaques de base, etc.
- Système secondaire : correspond à un système fermé qui utilise un fluide pour le chauffage ou le refroidissement du bâtiment (tuyauterie secondaire). Ce circuit est encastré dans les planchers et les murs de la structure, ainsi que dans les tabliers de pont, les structures routières, les plates-formes, etc.
- Les systèmes primaires et secondaires sont connectés par une pompe à chaleur qui modifie la température, habituellement comprise entre 10 et 15 °C, pour l'amener à un niveau compris entre 25 et 35 °C.

Les dispositifs destinés à exploiter les gisements géothermiques de faible profondeur visent à exploiter le potentiel géothermique à des profondeurs inférieures à 400 mètres. Il existe deux types de systèmes d'exploitation des ressources géothermiques à faible profondeur : les systèmes à circuit ouvert et les systèmes à circuit fermé.

### 2.4.2.1 Systèmes géothermiques à boucle ouverte

L'eau souterraine est en réalité le fluide caloporteur dans les systèmes en boucle ouverte. Il est important de souligner que dans cette situation, les températures de l'eau sont inférieures à celles de l'eau hydro géothermique, ce qui en fait des systèmes qui reposent sur le pompage direct à l'aide d'un puits de production de l'eau des aquifères souterrains. À partir de l'aquifère, l'eau souterraine est pompée et acheminée jusqu'à la pompe à chaleur où la chaleur est extraite, puis réinjectée dans l'aquifère via un puits. Dans ce cas, il n'y a pas de circulation permanente de la même quantité de fluide que celle observée dans les systèmes en boucle fermée. L'eau qui est chauffée est évacuée dans l'aquifère en mode de refroidissement. La figure ci-dessous illustre un système géothermique en boucle ouverte, pour lequel les puits de production et d'injection doivent être placés le plus éloignés possible les uns des autres[49].

Pour une utilisation optimale et fiable de ces systèmes, il est nécessaire de respecter deux exigences essentielles. Les formations de sol doivent être assez perméables et les eaux souterraines doivent présenter une qualité chimique adéquate.

En pratique, ces systèmes rencontrent souvent des problèmes en raison du colmatage causé par le dépôt de minéraux dissous provoqué par les variations de température. C'est la raison pour laquelle il est essentiel d'utiliser une eau à faible teneur en fer. Plutôt que d'être injectée dans des puits, l'eau peut aussi être rejetée dans les eaux de surface (lacs, rivières, etc.).

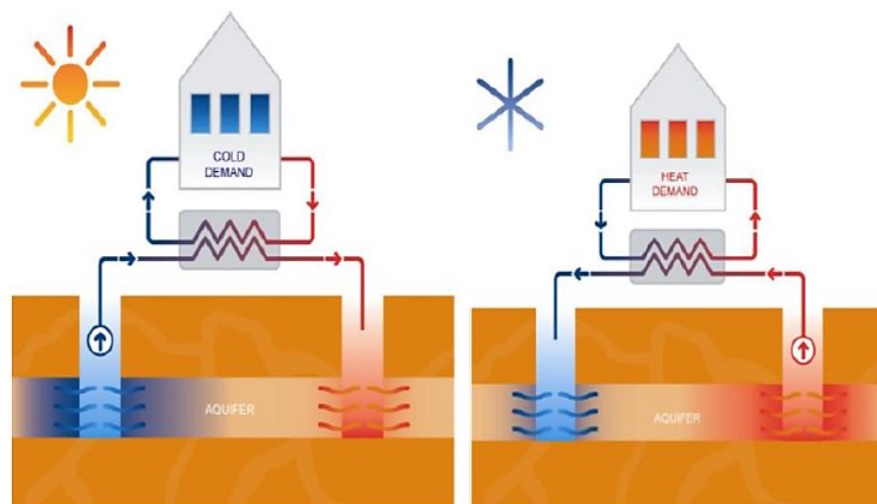


Figure 2. 11 : Systèmes de chauffage et de refroidissement à circuits ouverts[50].

### 2.4.2.2 Systèmes géothermiques à circuit fermé

Le potentiel thermique des formations du sol est utilisé dans les systèmes en circuit fermé d'exploitation des ressources géothermiques peu profondes. Cette exploitation de l'énergie

## Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique

---

géothermique est largement influencée par les installations de tuyauterie reliées à la pompe à chaleur géothermique. En général, les tuyaux remplis toujours de la même quantité de fluide de travail sont constitués de polyéthylène ou de polybutène, qui sont flexibles et résistants. Ils servent à faire circuler le fluide de travail à travers le sol ou la roche afin de favoriser le transfert thermique. En fonction de l'installation de ces tuyaux, on peut distinguer les systèmes en boucle fermée, horizontaux et verticaux[49].

### a) Les systèmes géothermiques horizontaux en boucle fermée

Le principe de ces systèmes consiste à faire transmettre la chaleur du sol générée par le rayonnement solaire au fluide de travail circulant dans les conduites. Dans ce cas, les tuyaux sont situés assez près de la surface du sol, ce qui rend ces systèmes peu efficaces dans les régions soumises à des conditions climatiques extrêmes, pour lesquelles les systèmes verticaux fermés sont plus adaptés. Les tuyaux sont enterrés plus profondément que la ligne de gel dans les systèmes horizontaux. Pour installer les tuyaux, il existe différentes options, telles que les tuyaux horizontaux droits et les tuyaux horizontaux en forme de slinky. Une fois l'installation des tuyaux est terminée, les tranchées sont remplies[49]. La figure ci-dessous illustre un système géothermique horizontale à boucle fermée.

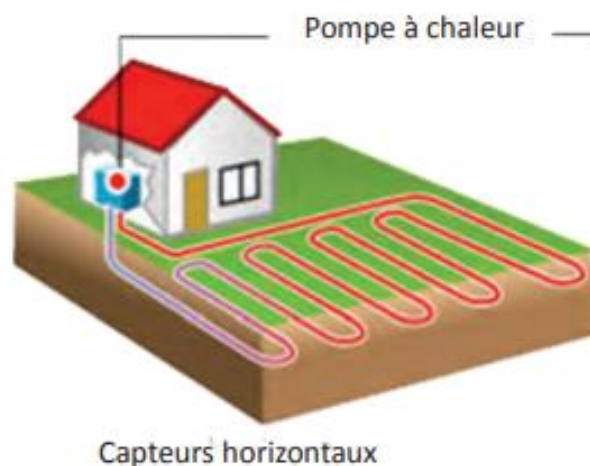


Figure 2. 12 : un système géothermique horizontale à boucle fermée[51].

### b) Les systèmes géothermiques verticaux en boucle fermée

Les systèmes verticaux en boucle fermée sont non seulement plus efficaces dans les zones à températures extrêmes, mais ils présentent également un intérêt lorsque la surface de pose des tuyaux est réduite ou en cas d'exploitation du potentiel géothermique de la roche, Il serait difficile dans cette dernière de réaliser des travaux d'excavation pour la tuyauterie horizontale. Pour les systèmes verticaux en boucle fermée, les conduits sont disposés à l'intérieur d'un

forage du diamètre de 150 mm et sont reliés à la pompe à chaleur géothermique[49]. La figure 2.14 illustre un système géothermique verticale à boucle fermée.

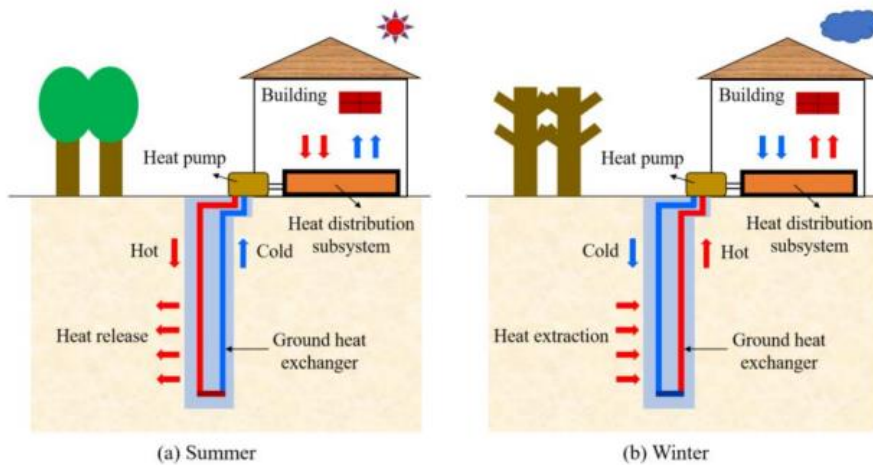


Figure 2. 13 : Exemple d'un système géothermique verticale à boucle fermée pour une maison [52].

## 2.5 Conclusion

Le terme « énergies géothermiques » fait référence aux méthodes qui permettent de tirer parti de la chaleur naturelle présente dans le sous-sol ainsi que dans les nappes d'eau souterraines (aquifères), afin de l'exploiter à des fins énergétiques. Elle présente de nombreux avantages en tant que source d'énergie renouvelable et est actuellement très populaire. Comparée à d'autres sources d'énergie, elle se caractérise par de faibles émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait une source d'énergie verte et respectueuse de l'environnement. Leur principale utilisation est de produire de l'électricité (géothermie à haut énergie) ainsi que de fournir le chauffage et le refroidissement dans le secteur résidentiel (géothermie à basse énergie).

La chaleur du sol est captée par les systèmes géothermiques peu profonds, qui utilisent un système de tuyaux enterrés dans les premiers mètres sous la surface. Dans cette boucle fermée placée dans le sol, un fluide, généralement de l'eau glycolée, y circule, retient la chaleur du sol et la restitue au bâtiment par le biais d'une pompe à chaleur géothermique dont la fonction est de redistribuer cette chaleur dans un circuit de chauffage domestique.

Certes, l'énergie géothermique présente un potentiel très intéressant, mais elle reste mal connue et peu exploitée en Algérie. Certes, l'énergie géothermique présente un potentiel très intéressant, mais elle reste mal connue et peu exploitée en Algérie. Toutefois, le gaz naturel ne sera plus disponible dans proche avenir pour répondre à la demande de chauffage dans de nombreux pays riches en gaz, y compris l'Algérie. Dans ce contexte, il est très encourageant de s'orienter vers l'exploitation de cette ressource énergétique (géothermie superficielle) qui

## **Analyse bibliographique sur l'énergie géothermique**

---

est inépuisable et respectueuse de l'environnement, destinée à produire du chauffage et de la climatisation dans notre bâtiment. C'est la raison qui a motivé notre recherche, qui portait sur ce type d'énergie renouvelable qui requiert un système thermodynamique appelé « pompe à chaleur géothermique ».

Dans le prochain chapitre, nous examinerons les échangeurs de chaleur associés à une pompe à chaleur géothermique. Les diverses catégories, leur fonctionnement, leurs bénéfices, etc., sont décrits en détail.



**Chapitre 3    Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les  
bâtiments**



## 3.1 Introduction

Malgré l'avenir prévisible des combustibles fossiles et des technologies de chauffage électrique traditionnelles, il est prévu que le marché des technologies économes en énergie et basées sur les énergies renouvelables, comme les pompes à chaleur (PACS), continue de croître sous l'effet de mesures de soutien. Les PACS peuvent être utilisés comme des systèmes de chauffage/refroidissement primaires dans les climats doux, et de systèmes de chauffage secondaires dans les climats plus froids[53].

La mise en œuvre de systèmes thermodynamiques pour garantir le chauffage ou le refroidissement des locaux est une approche plus complexe que les méthodes classiques de chauffage, mais efficace. Elle présente principalement des bénéfices tels que l'accès gratuit à la ressource géothermale et la capacité à générer de la chaleur ou du froid[54].

L'objectif de la pompe à chaleur est de chauffer l'intérieur d'une pièce en puisant la chaleur naturelle dans l'environnement. Pour une utilisation domestique, la pompe à chaleur utilise l'air extérieur, le sol ou l'eau d'un étang ou de la nappe phréatique comme source de calories[55].

En utilisant la température constante et peu profonde du sol comprise entre 40 à 70 °F (4,5 à 21 °C), les pompes à chaleur géothermiques (GHP) assurent un échange efficace des températures, permettant de chauffer les maisons en hiver et de les refroidir en été. En effet, même si de nombreuses régions sont marquées par des températures extrêmes saisonnières (de la douceur en été et à la froideur en hiver), le sol maintient une température assez constante tout au long de l'année, à quelques mètres sous la surface de la terre[56]. En hiver, la température du sol est plus haute que celle de l'air, tandis qu'en été, elle est plus froide. Le système GHP utilise cette température constante du sous-sol afin d'échanger de la chaleur avec le sol par le biais des échangeurs de chaleur souterrains.

Dans ce chapitre, nous examinons en détail les principaux aspects des systèmes de pompe à chaleur. Il aborde principalement les spécificités technologiques des PACS, ainsi que les différents types et variations de pompes à chaleur, en soulignant leurs avantages et inconvénients respectifs.

Ce chapitre s'appuie principalement sur les pompes à chaleur géothermiques (GHP) et aborde leur fonctionnement, leur conception, les différents types existants, les différentes configurations des échangeurs de chaleur couplés à la pompe à chaleur ainsi que les points positifs et négatifs de chaque configuration dans le but de sélectionner la conception la plus adaptée. Enfin, nous avons examiné les différents indicateurs qui servent à définir l'efficacité énergétique des pompes à chaleur.

## 3.2 Les systèmes de pompe à chaleur

La pompe à chaleur (PAC) est un appareil qui permet de transporter de l'énergie thermique d'un environnement à température basse vers un environnement à température élevée. Elle consiste à capter la température extérieure de l'air, du sol ou de l'eau et à la transmettre afin d'obtenir une température suffisante pour chauffer un logement. Pour assurer leur fonctionnement, toutes les pompes à chaleur requièrent de l'électricité.

### 3.2.1 Les principaux types de pompes à chaleur

Quatre catégories de pompes à chaleur sont disponibles[57]

- **Le système de pompe à chaleur air-eau**

Ce dispositif capte l'énergie disponible dans l'air et la rejette dans l'eau utilisée pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Il s'agit d'un dispositif efficace qui requiert l'installation de radiateurs hydrauliques ou d'un plancher chauffant. La chaleur recueillie dans l'air est bien utilisée, mais son efficacité varie en fonction de la température extérieure et requiert un système d'appoint, généralement électrique et incorporé au système, permettant de garantir le chauffage lorsque la température extérieure est trop basse. La pompe à chaleur air/air présente également un COP d'environ 3 à 4, ce qui lui confère un rendement très élevé.

Le modèle air/eau présente également l'avantage de pouvoir installer une chaudière en remplacement. Il existe aussi des modèles hybrides. Si vous avez un plancher chauffant, vous pouvez également profiter d'une fonction réversible pour rafraîchir votre logement en été.

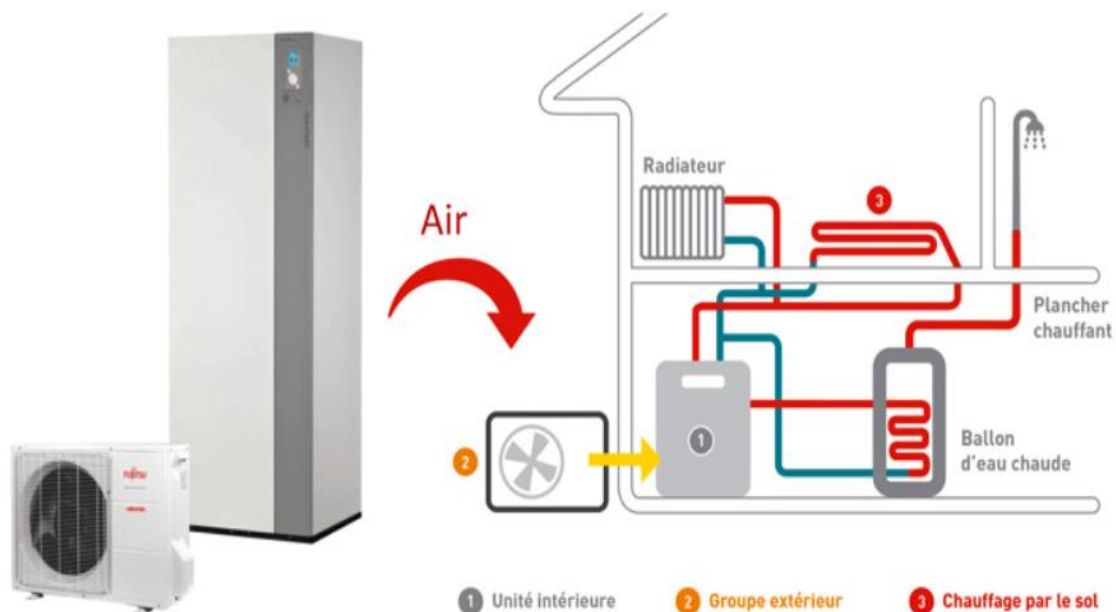


Figure 3. 1 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur air-eau[58].

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

### ▪ Le système de pompe à chaleur air-air

Une pompe à chaleur air-air extrait de l'énergie de l'air extérieur, puis la réchauffe et la transporte vers la pièce concernée. Cependant, lorsque les températures deviennent très basses, son efficacité diminue, et peut même devenir nulle. Il est alors nécessaire de l'ajouter un appoint, tout comme pour la PAC Air/eau. Ce genre d'infrastructure est donc principalement conçu pour les régions méditerranéennes, qui sont plus vulnérables aux fluctuations de température.

En ce qui concerne les performances énergétiques, la PAC air/air représente un avantage majeur pour diminuer votre coût de chauffage. En général, le coefficient de performance (COP) est supérieur à 3.

Ce genre de pompe à chaleur, en revanche, ne permet pas de générer de l'eau chaude. Il est donc nécessaire d'envisager l'acquisition d'un système de chauffage de l'eau : un ballon thermodynamique, dont le fonctionnement repose également sur les énergies renouvelables, ou un chauffe-eau électrique.

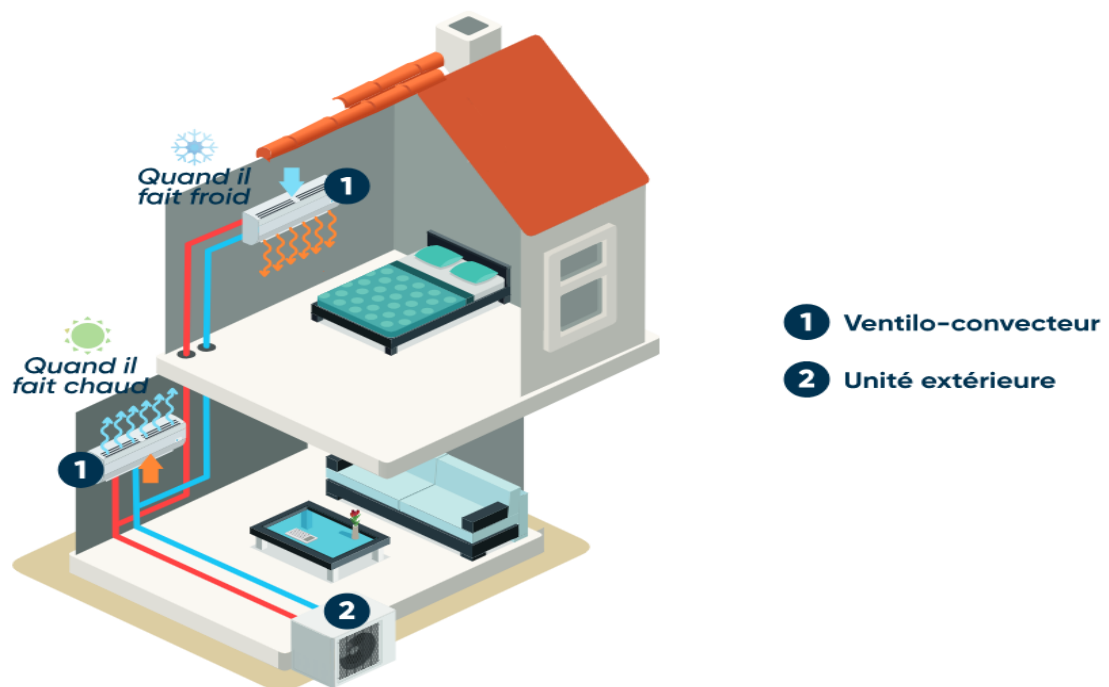


Figure 3. 2 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur air-air[59].

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

### ▪ Le système pompe à chaleur géothermique

Le dispositif de pompe à chaleur géothermique permet de chauffer l'eau du circuit de chauffage ainsi que l'eau chaude sanitaire en exploitant la chaleur de la terre. Cette solution est plus difficile à mettre en place, car elle requiert une surface de terrain pour pouvoir installer un réseau de capteurs de chaleur sous la terre. Elle est également plus onéreuse, mais garantit néanmoins une performance énergétique exceptionnelle durant toute l'année.

La PAC géothermique est capable de capter les calories à des températures inférieures ou égales à 10 °C. Elle présente des performances énergétiques supérieures à celles des PAC aérothermiques. En moyenne, son COP est donc compris entre 4 et 5.

La mise en place de ce genre de pompe à chaleur est complexe. Il est essentiel de solliciter l'aide de spécialistes en géothermie.

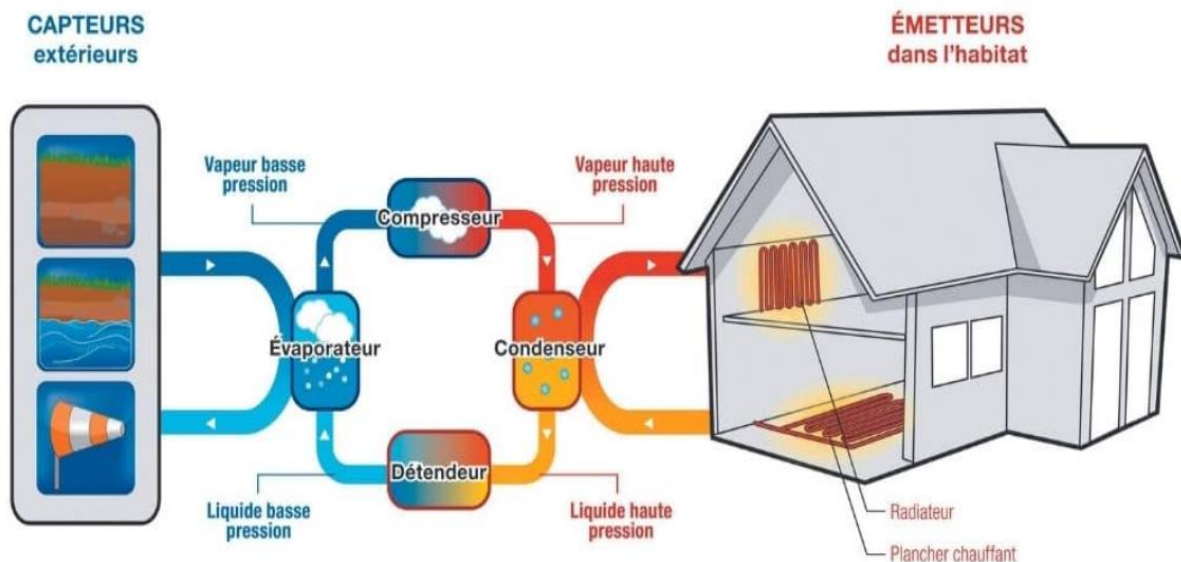


Figure 3.3 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur géothermique[60].

### ▪ Le système pompe à chaleur hydrothermique

Conformément à son nom, une pompe à chaleur hydrothermique, également connue sous le nom aquathermique, utilise le principe eau/eau. Elle puise son énergie dans un fleuve ou dans la nappe phréatique. En effet, la source la plus bénéfique est celle-ci, car la température de l'eau est relativement haute et stable. Ce modèle présente des performances énergétiques remarquables, comme pour la PAC géothermique, avec une valeur de COP moyenne comprise entre 4,5 et 5. Cela est dû à la stabilisation de la température moyenne de l'eau potable.

Afin d'installer ce genre de PAC, il est nécessaire d'avoir un puits déjà existant ou de procéder à des travaux de forage vertical. La profondeur nécessaire varie de 30 à 100 mètres. La mise

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

en place est laborieuse et demande l'intervention de spécialistes dans le domaine pour réaliser ce type d'installation.

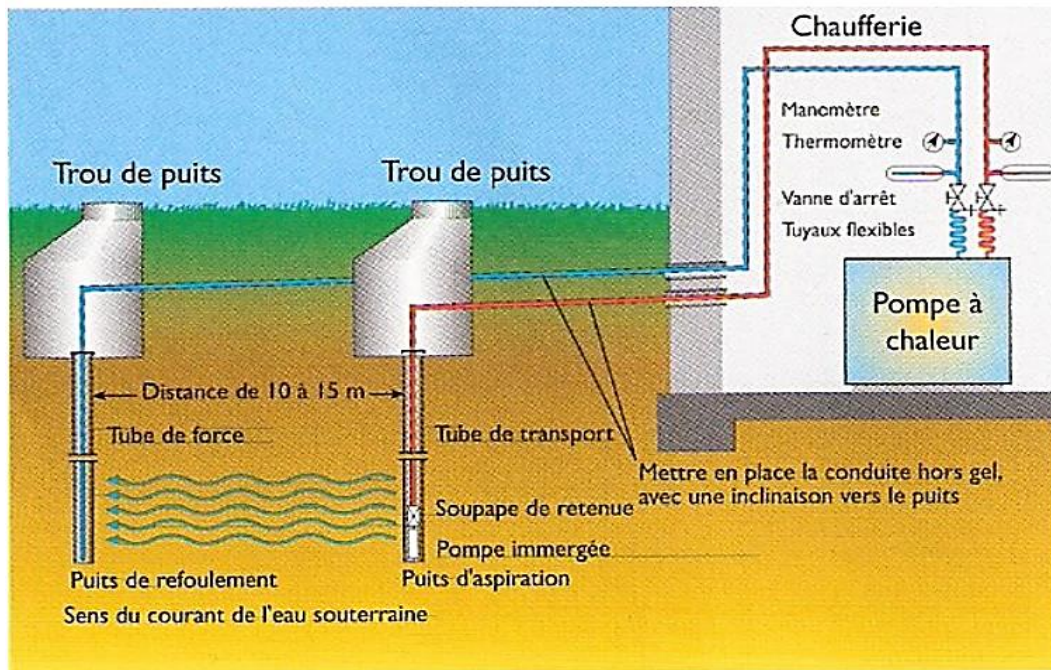


Figure 3. 4 : Schéma représentatif d'une pompe à chaleur hydrothermique[61].

- ✓ **Quelle est la distinction entre une pompe à chaleur aérothermie et une pompe à chaleur géothermie ?**

La chaleur du sol est récupérée par une pompe à chaleur géothermique, qui utilise diverses techniques telles que des capteurs horizontaux, des sondes géothermiques et l'eau de nappe phréatique. D'autre part, le principe d'une pompe à chaleur aérothermique est de puiser la chaleur dans l'air par l'intermédiaire d'un échangeur à ailettes, semblable à celui d'une unité de climatisation extérieure[62].

### 3.2.2 Avantages d'une pompe à chaleur

La pompe à chaleur est fréquemment mentionnée parmi les nouveaux systèmes de chauffage les plus récents, car elle présente de nombreux avantages[63].

- ✓ **Une consommation d'énergie réduite :**

La mise en place d'une pompe à chaleur dans une habitation présente de nombreux bénéfices tels que la possibilité de réaliser des économies d'énergie importantes qui seront visibles sur votre facture d'électricité. En effet, l'appareil se sert d'une ressource toujours accessible et gratuite : l'air ambiant. De plus, ses divers éléments sont peu énergivores. En outre, la

performance et la faible consommation d'énergie d'une pompe à chaleur sont principalement assurées par son COP, ou coefficient de performance. L'appareil est considéré comme performant lorsqu'il a un COP situé entre 4 et 5.

### ✓ **Un confort d'utilisation remarquable :**

Un des principaux atouts de la pompe à chaleur réside dans sa facilité et son agrément d'utilisation. À la différence des chaudières à fioul ou à bois, elle n'émet aucune odeur pendant son fonctionnement. De plus, elle a la capacité de maintenir la température dans l'espace de manière durable et d'augmenter la température de l'air rapidement.

En été, afin d'améliorer encore davantage le confort, une PAC air/air permet également de rafraîchir l'air intérieur en inversant une vanne. Des PAC air/eau peuvent également inclure un mode de rafraîchissement. En général, ces modèles sont liés à un circuit hydraulique situé sous le sol.

### ✓ **La facilité de mise en place :**

Si une construction de logement est en cours, la PAC air/air peut être installée de manière séparée ou encagée, fixée au mur par exemple, ou équipée d'un système de gaines qui traverse les faux plafonds. La PAC air/eau peut également être installée facilement.

L'installation d'une PAC Air/Eau est tout aussi simple en cas de rénovation, car elle peut être connectée directement à un circuit hydraulique existant, à l'exception des cas de chauffage exclusivement électrique. Une PAC Air/Air est également possible pour un modèle séparé. Il faudra néanmoins un chauffage d'appoint pour assurer une chaleur adéquate. L'installation d'une PAC Air/Air gainable nécessite des travaux plus importants, car il est nécessaire de percer les murs et les plafonds pour que les gaines soient invisibles.

### ✓ **Un impact faible sur l'environnement :**

L'air extérieur est la matière première d'une pompe à chaleur. En d'autres termes, elle est sans frais, entièrement renouvelable et naturelle. Ainsi, la seule pollution produite par une PAC est celle de l'énergie consommée pour produire l'électricité ainsi que celle utilisée pour fabriquer ses composants. Le bilan est nettement favorable à la PAC : En effet, chaque kilowattheure fourni par une PAC émet quatre fois moins de CO<sub>2</sub> qu'un kilowattheure fourni par une chaudière à combustible.

### **3.2.3 Inconvénients d'une pompe à chaleur**

La pompe à chaleur est une option de chauffage à la fois efficace et respectueuse de l'environnement. Toutefois, elle présente également certains désavantages qu'il convient de prendre en compte[64].

### ✓ **Son coût initial est élevé**

Le prix initial d'une pompe à chaleur est souvent mentionné comme l'un des principaux désavantages. En effet, son installation est souvent plus onéreuse que celle d'un dispositif de chauffage traditionnel, comme une chaudière à gaz ou à fioul. Différents éléments influencent le coût d'une pompe à chaleur, tels que :

- **La catégorie de pompe à chaleur utilisé :** Les plus coûteuses sont les pompes à chaleur géothermiques, ensuite les pompes à chaleur air-eau et enfin les pompes à chaleur air-air.
- **La capacité de la pompe à chaleur :** Il est nécessaire d'ajuster la puissance de la pompe à chaleur en fonction des exigences de chauffage du logement.
- **La mise en place :** En ce qui concerne le prix de l'installation, il dépend de la complexité de celle-ci et de la distance qui sépare la pompe à chaleur et les équipements de chauffage.

### ✓ **Un espace extérieur approprié est nécessaire**

Les pompes à chaleur géothermiques, par exemple, requièrent un espace extérieur approprié. Effectivement, il est nécessaire d'installer la pompe à chaleur près d'une source de chaleur, comme une nappe phréatique ou un puits.

### ✓ **La performance varie en fonction du climat**

La performance d'une pompe à chaleur est influencée par la température de la source d'énergie thermique utilisée.

## 3.3 Le principe d'une pompe à chaleur

### 3.3.1 Descriptif et mécanisme de la pompe à chaleur

Le classement de la technologie HP est habituellement basé sur sa source, sa fonction, son type d'énergie et son application, comme indiqué ci-dessous [65]:

- **Des sources de chaleur :** sont le sol, l'eau, l'air, la chaleur solaire, les eaux usées, etc.
- **Fonctions :** telles que le chauffage, le refroidissement, le chauffage de l'eau chaude, le refroidissement et le chauffage.
- **L'énergie fournie à une HP :** qui peut être mécanique, électrique ou thermique (gaz naturel, propane, eau chauffée par la géothermie, eau chauffée par le soleil, etc.).
- **Application :** résidentielle, industrielle, chauffage urbain, commerciale, etc.

La figure ci-dessous présente le principe de fonctionnement de la HP. Dans la pompe à chaleur, le transfert d'énergie repose sur le changement de phase du réfrigérant au cours du cycle thermodynamique constant. La chaleur est récupérée de la source d'énergie et transmise

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

aux dispositifs énergétiques du bâtiment. L'utilisation de pompes à chaleur à cycle inverse permet également de refroidir, en modifiant la direction d'écoulement du réfrigérant, ce qui permet d'évacuer la chaleur du bâtiment et de la rejeter vers l'extérieur.

Le HP comprend quatre éléments essentiels que sont le compresseur, le détendeur et les deux échangeurs de chaleur destinés à l'évaporation et à la condensation, (la figure 3.5).

Les ventilateurs, la tuyauterie et les contrôles constituent les principaux éléments auxiliaires.

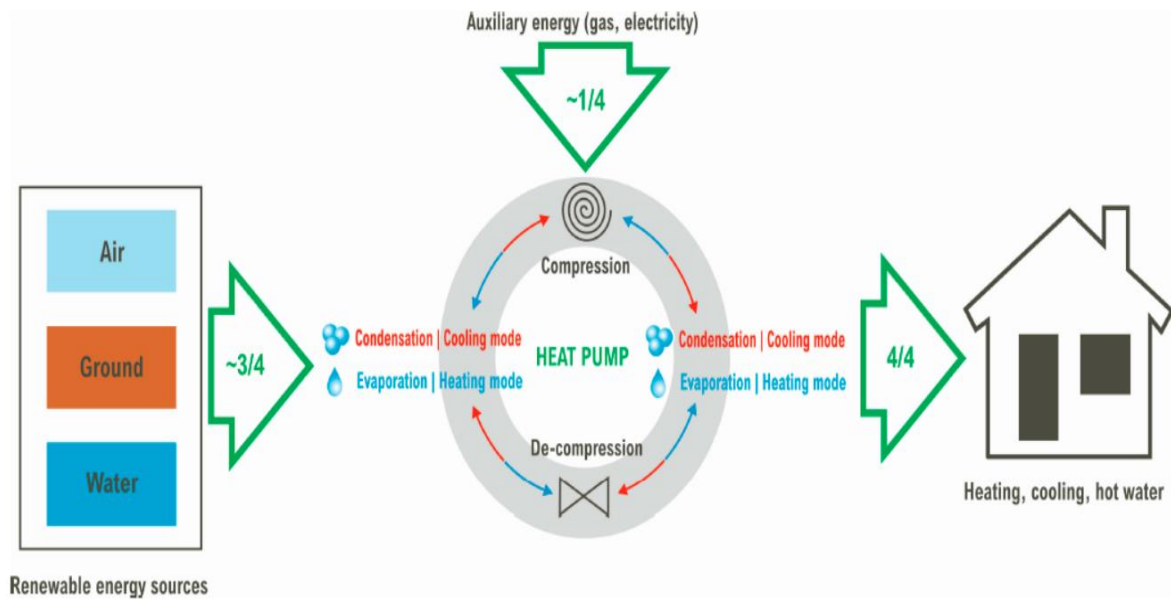


Figure 3. 5 : Fonctionnement du HP en mode chauffage (horaire/rouge) ou refroidissement (antihoraire/bleu)[65].

### 3.3.2 La pompe à chaleur géothermique

#### 3.3.2.1 Principe de base de pompe à chaleur géothermique

Quelles que soient les conditions climatiques et les variations saisonnières, la chaleur dans le sol (au-delà de 10 mètres de profondeur environ) est constante. Il est possible de l'exploiter partout où on en a besoin, sans faire voyager la chaleur sur de longues distances. La pompe à chaleur exploite cette zone où la température du sol est constante afin de produire le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Cet équipement présente des performances très intéressantes, pour un kilowattheure d'électricité consommé, il restitue plus de quatre kilowattheures de chaleur pour votre logement. Votre chauffage peut donc être assuré par une énergie renouvelable, locale et non polluante[66].

Une pompe à chaleur géothermique comprend trois composants principaux[67]

- ✓ Sous-système de la pompe à chaleur : Transférer la chaleur entre le bâtiment et le sol et modifiant sa température.

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

- ✓ Le sous-système de distribution de la chaleur intérieure : Contrôle et distribue la chaleur dans l'espace.
- ✓ Un sous-système de connexion à la terre : Permet l'extraction de la chaleur du sol par une boucle d'échangeur de chaleur à intégrer à l'unité de pompe à chaleur.

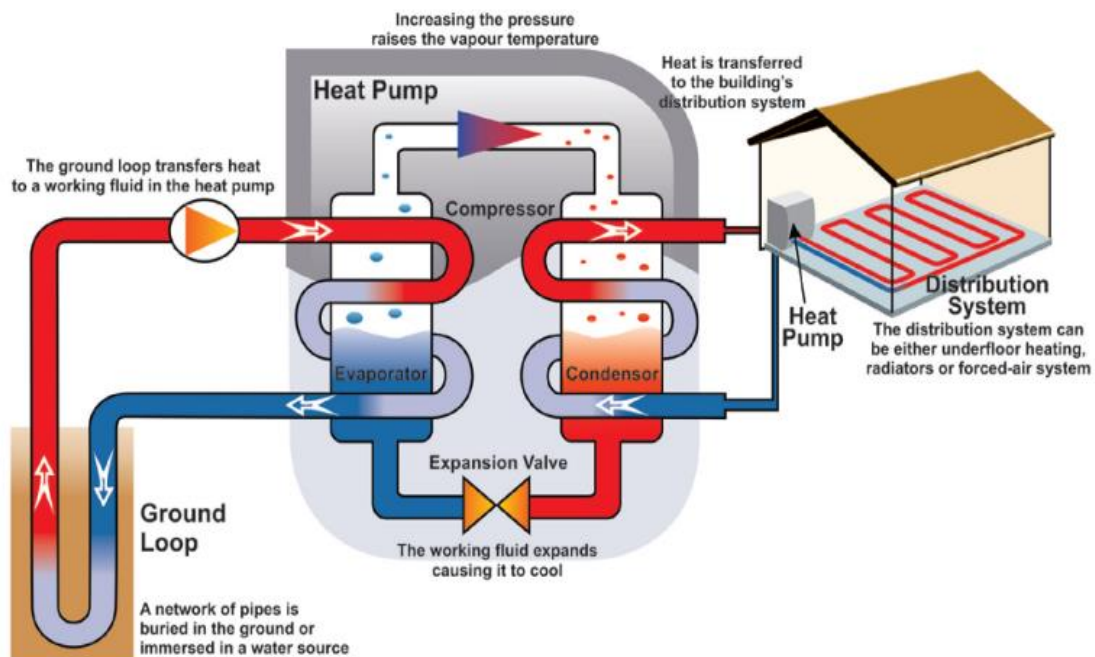


Figure 3. 6 : Schéma de la pompe à chaleur géothermique (en mode chauffage) [68]

### 3.3.2.2 Sous-système de la pompe à chaleur

Grâce à l'électricité, les pompes à chaleur sont alimentées par des compresseurs qui effectuent le travail requis pour concentrer et transporter l'énergie thermique. De base, leur fonctionnement repose sur le cycle de réfrigération à compression de vapeur. En général, le réfrigérant est utilisé comme fluide de travail de la pompe à chaleur, et son choix dépend des caractéristiques et des besoins globaux du système de la pompe à chaleur géothermique (GHP). En contrôlant la pression et la température, une GHP transporte l'énergie thermique entre la terre et l'espace chauffé en utilisant la compression et la dilatation[69].

Le fonctionnement des pompes à chaleur géothermique pour le chauffage est le suivant [69]:

1. L'énergie thermique issue de la terre est extraite et acheminée vers l'évaporateur.
2. Dans la pompe à chaleur, le liquide réfrigérant froid, qui est principalement constitué de liquide et de vapeur, entre dans l'évaporateur. Le fluide frigorigène est chauffé depuis la connexion à la terre, ce qui provoque son ébullition ainsi que sa

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

transformation en vapeur à basse pression, ce qui entraîne une légère augmentation de la température.

3. La vapeur pénètre dans un compresseur électrique, dont la pression est élevée. Cela génère une vapeur à haute pression et à haute température.
4. La vapeur à haute température pénètre dans le condenseur. Comme la température du réfrigérant est plus élevée que celle de l'espace, elle provoque un transfert de chaleur du réfrigérant jusqu'au bâtiment. Le réfrigérant est alors refroidi et condensé, créant ainsi un liquide à pression élevée et à température élevée.
5. La pression du liquide chaud est réduite par une valve d'expansion, ce qui entraîne une diminution de la température. Le liquide réfrigérant entre dans l'évaporateur afin de démarrer un nouveau processus.

Certains systèmes incluent un mode de refroidissement permettant d'extraire l'énergie thermique d'un espace et de la rejeter au sol. Dans le cycle de refroidissement, une vanne d'inversion est employée afin de déplacer le fluide dans la direction opposée. Dans ce cas, on inverse les échangeurs de chaleur : le condenseur devient l'échangeur de chaleur de la connexion à la terre et l'évaporateur devient l'échangeur de chaleur du bâtiment.

Certains dispositifs incluent également un désurchauffeur (schéma 3.7) servant d'échangeur de chaleur additionnel destiné à chauffer un réservoir d'eau chaude. Il est situé à la sortie du compresseur et permet de transmettre la chaleur de la vapeur comprimée à l'eau qui circule dans un réservoir d'eau chaude, ce qui conduit à une diminution ou à une élimination de l'énergie exigée pour chauffer l'eau.

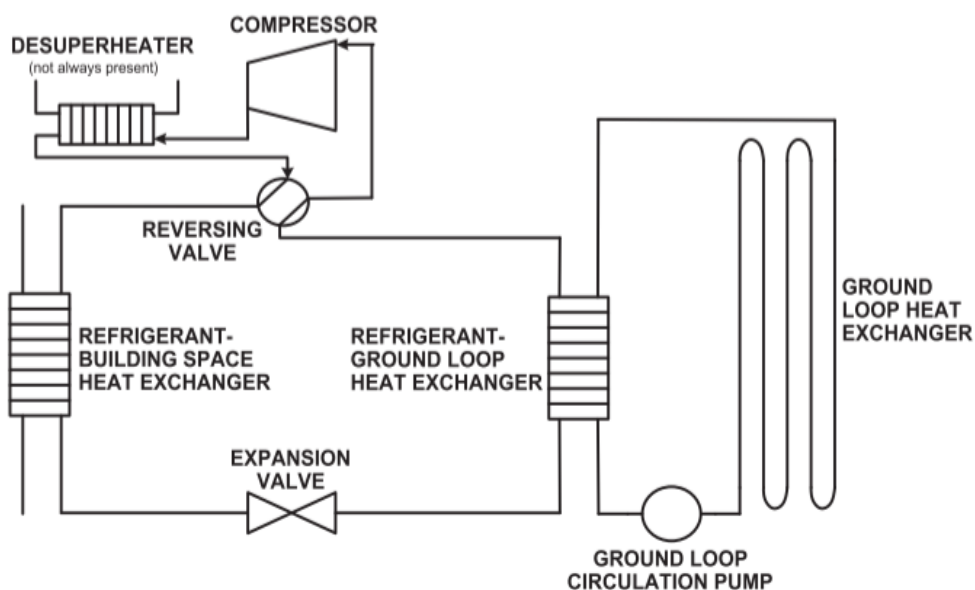


Figure 3.7 : Modèle d'un système de pompe à chaleur géothermique, incluant le désurchauffeur [69].

## **Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments**

---

Les GHPs peuvent être ajustés en fonction des particularités d'un site spécifique. À titre d'exemple, si le site dispose d'une ouverture sur un lac ou une rivière, il est possible de prévoir la mise en place soit d'un serpentin immergé, soit d'une eau de surface. Si la surface est restreinte, il est préférable d'opter pour une installation verticale. La demande de chauffage/refroidissement du bâtiment doit prendre en considération d'autres éléments tels que la température de l'aquifère ou de l'eau souterraine, son accessibilité et ses propriétés, la nature et la température du sol, de même que la capacité thermique et la conductivité thermique du sol [68].

### **3.3.2.3 Le sous-système de distribution de la chaleur intérieure**

La chaleur fournie par la pompe à chaleur est distribuée dans tout l'espace grâce au système de distribution de chaleur. Deux principaux types de systèmes de distribution sont présents : eau-air et eau-eau. Le système eau-air transmet l'énergie thermique du sol à l'air, qui sert alors de médium de transport dans l'espace, alors que le système eau-eau repose sur l'utilisation de l'eau ou d'un autre fluide afin de transférer la chaleur.

Le système eau-air consiste en un serpentin d'air chauffé par le condenseur de la pompe à chaleur, qui réchauffe l'air qui passe au-dessus de lui. Le bâtiment reçoit de l'air en utilisant des conduits HVAC et des bouches d'aération.

Dans les systèmes eau-eau, ou systèmes hydroniques, la chaleur est extraite de la boucle souterraine, puis traitée par la pompe à chaleur avant d'être distribuée dans tout le circuit du bâtiment via l'eau. La chaleur est extraite grâce à la pompe à chaleur qui pompe l'eau à travers le condenseur de l'unité. Par la suite, l'eau est injectée dans l'édifice afin de chauffer l'espace par le biais soit de radiateurs rayonnants, soit de radiateurs, soit de serpentins à air. Ces systèmes ont une température de chauffage relativement faible par rapport aux systèmes traditionnels à air pulsé. La température la plus élevée de l'air dans les pièces chauffées par un chauffage à air pulsé est repoussée vers le plafond, ce qui laisse une grande partie de l'espace habitable à une température plus fraîche. Afin de maintenir la température désirée dans l'espace de vie, il est nécessaire que la température de l'air qui pénètre dans l'espace soit plus élevée que celle de l'espace. Une pièce avec des radiateurs aura une température plus homogène, du plafond à la porte, et exigera une température de fonctionnement plus basse afin de garantir des conditions de vie appropriées[69].

Il existe également des systèmes hybrides qui associent ces deux méthodes de distribution. Cela permet de rendre le système plus flexible et de mieux contrôler la température de l'environnement.

### 3.3.2.4 Sous-système de connexion à la terre

À la différence des pompes à chaleur aérothermiques dont la source de chaleur est l'air ambiant, les pompes à chaleur géothermiques utilisent la chaleur du sol environnant. Au cours de l'année, la température de l'air ambiant varie considérablement par rapport à la température du sol, tant sur une base quotidienne qu'annuelle. La température du sol varie quotidiennement à des profondeurs inférieures à 0,8 m ; cette variation diminue au-delà de cette profondeur. Les fluctuations sont plus marquées en fonction des saisons qu'en fonction des jours.

À titre d'exemple, l'évolution annuelle de la température du sol en fonction de la profondeur à Ottawa, au Canada, est illustrée dans la figure 3.8. Plus on s'enfonce dans le sol, plus les températures extrêmes chaudes et froides se rencontrent. La température du sol à une profondeur donnée dépend de divers éléments tels que l'exposition au rayonnement solaire, la couverture neigeuse, la température de l'air, les précipitations et les caractéristiques thermiques du sol[69].

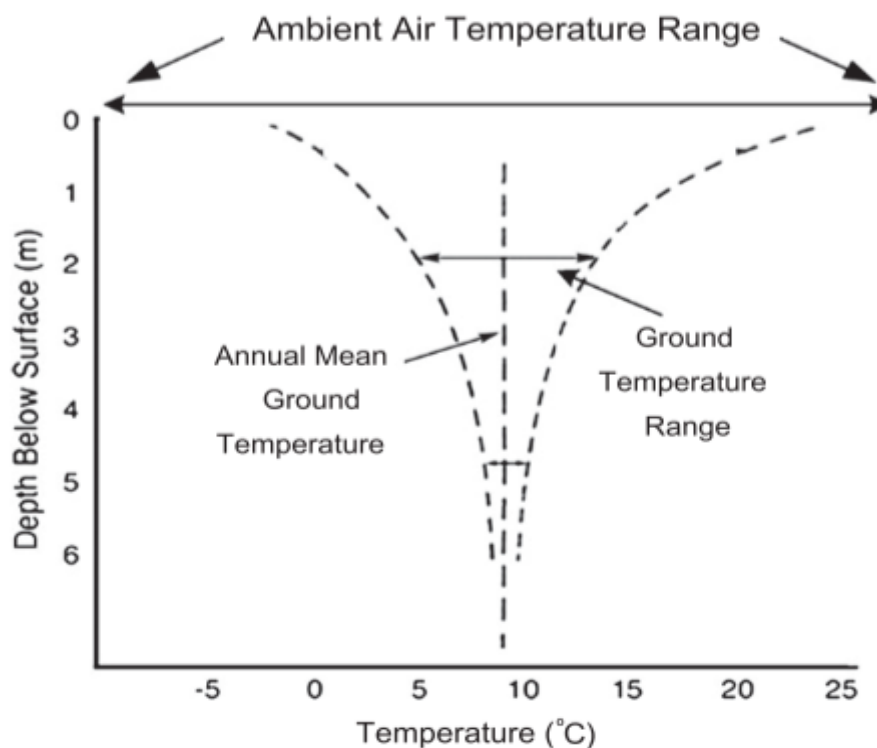


Figure 3. 8 : Évolution de la température du sol par rapport à la profondeur à Ottawa, au Canada[69].

Les pompes à chaleur géothermique exploitent la température constante du sol, dont la température est plus chaude que l'air ambiant en hiver et plus fraîche en été. Le sol reste à une température plus proche de celle désirée à l'intérieur d'un édifice. Quand les températures intérieures et extérieures varient considérablement, comme c'est le cas pour les pompes à

chaleur à air, le système doit fournir davantage d'efforts pour assurer le même degré de chauffage, ce qui diminue le COP.

Les échangeurs de chaleur connectés à la terre ou à boucle souterraine sont composés d'un réseau de conduites qui transmettent le fluide entre l'unité de pompe à chaleur et le sol. Deux modèles principaux de boucle souterraine sont présents : les modèles à double boucle et à boucle simple.

### ***3.3.2.4.1 Connexion à une boucle unique***

Le fluide de travail de la pompe à chaleur circule dans l'échangeur de chaleur souterrain dans les configurations à boucle unique, également connues sous le nom de systèmes à échange direct, ce qui permet d'éviter l'utilisation d'une boucle souterraine destinée à alimenter l'échangeur de chaleur de la pompe à chaleur. Au fond, la boucle souterraine joue le rôle d'évaporateur pour la pompe à chaleur dans le cadre de l'utilisation du chauffage. Les boucles uniques sont également dépourvues de la pompe de circulation de la boucle souterraine et reposent sur un compresseur légèrement plus grand. Grâce à ces mesures, le COP moyen de la pompe à chaleur géothermique est amélioré. Dans ces systèmes, la tuyauterie en cuivre est fréquemment employée en raison de ses excellentes capacités de transfert de chaleur, ce qui diminue la surface de tuyauterie requise. La pressurisation des systèmes d'échange direct demande une ingénierie rigoureuse, car la rupture est plus probable en raison des forces significatives exercées au-dessus du sol ou d'un fonctionnement incorrect. En cas de détérioration de la tuyauterie, il peut être indispensable de creuser l'ensemble du système afin de procéder aux réparations. Un autre désavantage réside dans l'obligation d'augmenter la quantité de réfrigérant pour prendre en compte le volume de la boucle souterraine, ce qui entraîne une augmentation des dépenses[69].

### ***3.3.2.4.2 Connexion en double boucle***

La conception en double boucle est la plus fréquente du système et nécessite une prise de terre distincte de la pompe à chaleur. Un échangeur de chaleur permet de transmettre la chaleur au réfrigérant via de l'eau ou un mélange d'eau et d'antigel, qui se déplace dans la tuyauterie de l'unité de pompe à chaleur vers le sol. Actuellement, le tuyau classique est fabriqué à partir de polyéthylène ou de polypropylène et possède un diamètre intérieur de 19 mm adapté aux applications de petites et moyennes dimensions. Elles se déclinent en deux configurations : boucle fermée et boucle ouverte. Nous avons déjà examiné le fonctionnement de ces deux configurations dans le chapitre précédent. Toutefois, il est nécessaire de préciser les diverses configurations envisageables pour chaque système[69].

### a) Systèmes de pompe à chaleur géothermique en boucle fermée

En général, dans les systèmes en boucle fermée, le fluide caloporteur est confiné à l'intérieur d'une boucle de circulation dont il n'a pas de contact direct avec le sol. La chaleur est transférée au sol à travers le matériau de la tuyauterie. Les systèmes d'échange de chaleur en circuit fermé sont classés en quatre catégories : horizontal, spirale, vertical et étang.

#### ✓ Boucle horizontale fermée

Dans cette situation, la boucle souterraine est placée horizontalement, en dessous de la surface du sol, dans des tranchées remblayées. Les boucles peuvent être disposées de manière différente selon les besoins en termes de transfert de chaleur et la superficie disponible du terrain. Les configurations les plus fréquentes sont : a) la boucle de base, b) la boucle en série et c) la boucle parallèle. Il faut également noter que, en règle générale, la configuration de base requiert une surface de terrain bien plus grande comparée aux configurations en série et parallèle. Toutefois, la configuration en série est répandue en raison de son espace limité et de sa facilité d'utilisation. Il est également possible de combiner les boucles en série et en parallèle, ce qui accroît la souplesse des installations horizontales. Pour les applications résidentielles, les systèmes d'échange de chaleur horizontaux sont généralement plus économiques que les systèmes verticaux, puisqu'ils engendrent des frais de creusement de tranchées moins importants que ceux liés aux forages.

En général, les tranchées qui contiennent la tuyauterie ne sont pas plus de quelques mètres sous la surface, cependant, sous les zones de gel, elles se situent en dessous de la ligne de gel. L'interaction entre le sol et l'environnement est plus intense à faible profondeur, ce qui provoque des fluctuations quotidiennes et annuelles de la température du sol. Cela a un impact sur le transfert de chaleur et donc sur les performances du système. Certains autres éléments influent également sur les caractéristiques du transfert de chaleur, tels que la pluie, la neige, la croissance de la végétation et l'ombre. Par conséquent, ces systèmes horizontaux requièrent souvent plus de canalisations qu'un système vertical.

En hiver, les systèmes horizontaux nécessitent une certaine protection contre le gel qui consiste à mélanger de l'eau et de l'antigel [70].

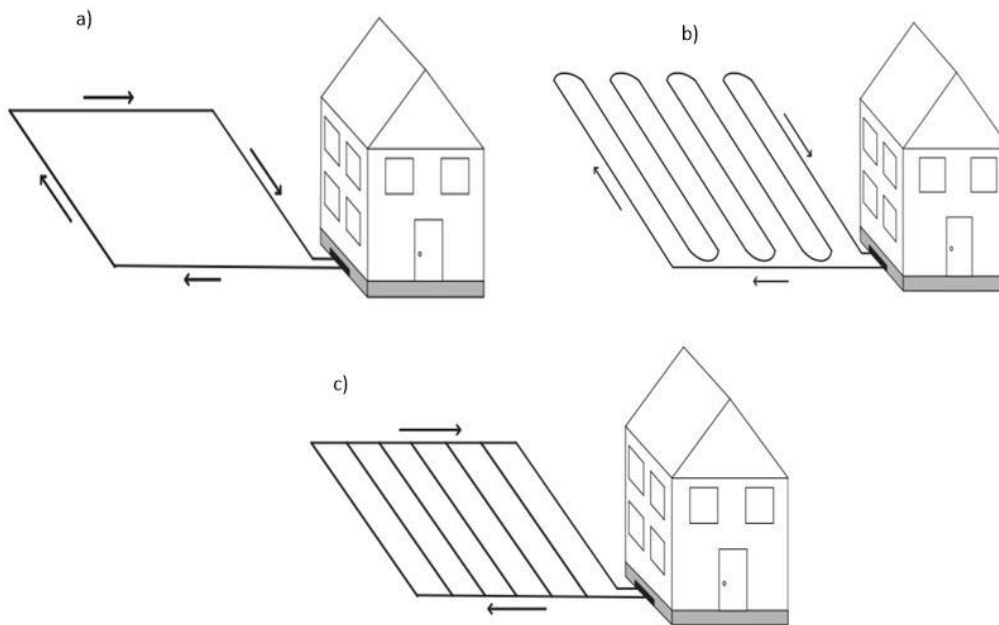


Figure 3. 9 : Une boucle horizontale équipée de tuyaux : a) de base, b) en série et c) parallèles pour une pompe à chaleur géothermique[69].

### ✓ Boucle fermée en spirale

Les boucles en spirale ressemblent aux boucles horizontales traditionnelles, puisqu'elles sont généralement disposées horizontalement dans des tranchées peu profondes. Cependant, l'installation des tuyaux est organisée en boucles circulaires à l'intérieur de la séquence. Chaque spirale est terminée par un tuyau droit pour le retour vers la pompe à chaleur. Les boucles en spirale requièrent une superficie moindre que les boucles horizontales traditionnelles ainsi que moins de tranchées, cependant elles nécessitent un plus grand nombre de mètres de tuyauterie pour une charge donnée.

Un autre type de système à boucle en spirale est de disposer les boucles verticalement dans des tranchées verticales étroites. La disposition en boucle verticale présente le principal avantage de diminuer les besoins en surface horizontale. Elle permet ainsi de recourir à divers équipements de creusement de tranchées, ce qui peut parfois avoir des répercussions économiques positives. Il est important de souligner que les boucles en spirale peuvent diminuer les dépenses initiales lorsque le creusement de tranchées représente une part importante du coût du système GHP, mais pas forcément quand les prix des matériaux sont élevés. Les autres désavantages des boucles en spirale sont similaires à ceux des systèmes horizontaux, notamment un faible transfert de chaleur et la nécessité de surfaces plus élevées. En tenant compte de la longueur de tuyau supplémentaire, les boucles en spirale ont des besoins de pompage plus élevés que les autres systèmes horizontaux, ce qui entraîne une diminution du COP du système.

### ✓ Boucle verticale fermée

Un système en boucle fermée verticale est composé d'un champ de boucles composé de tuyaux d'échange de chaleur dirigés verticalement. On fore un trou dans le sol, habituellement à une profondeur de 45 à 75 mètres pour les constructions résidentielles et de plus de 150 mètres dans le cas d'applications industrielles plus importantes. On introduit dans le trou des paires de tuyaux, reliées à la base par un raccord en forme de U (comme le montre la figure 3.10). Afin d'optimiser la transmission de chaleur, on recouvre l'espace entre les tuyaux et la paroi de forage d'un coulis à pompe. Pour une maison résidentielle classique, le diamètre du trou de forage est d'environ 102mm. L'espacement entre les forages est d'environ 5 à 6 mètres pour une application résidentielle classique, de manière à éviter que les forages adjacents ne soient influencés réciproquement et ne modifient les conditions du sol. Afin de garantir des débits homogènes pour différents systèmes de forage, un système de collecteur est utilisé, qu'il soit implanté dans le bâtiment ou enfoui dans le champ de bouclage. L'avantage de la configuration en boucle verticale est de diminuer la surface d'installation, ce qui est bénéfique lorsque le terrain est restreint. En outre, l'installation de la tuyauterie en profondeur dans le sol, dans un environnement où la température demeure constante tout au long de l'année, permet de garantir des performances permanentes de la pompe à chaleur et de diminuer la longueur totale de la boucle [69]. Le coût de l'installation est le principal désavantage de l'utilisation d'un système vertical, car le forage est généralement plus onéreux que le creusement de tranchées horizontales. Ainsi, les systèmes à boucle verticale sont généralement plus économiques pour les applications plus importantes [70].



Figure 3. 10 : Un système en boucle fermée vertical pour une pompe à chaleur géothermique[71].

## Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments

---

### ✓ Boucle fermée d'étang

Les systèmes d'échange de chaleur en boucle fermée les moins fréquents sont les boucles d'étang fermées, qui sont principalement des boucles en spirale immergées dans un plan d'eau. La canalisation en spirale est reliée à un cadre et immergée grâce à des ancrages en béton. En règle générale, le cadre est placé à une hauteur de 23-48 cm au-dessus du fond de l'étang afin de favoriser un flux convectif autour de la tuyauterie [69].

En général, la boucle est située à une profondeur d'au moins 1,8 m sous la surface de l'eau. Il faut veiller à ce qu'une masse thermique adéquate soit conservée lors de basses eaux ainsi que de courants d'air prolongés, et que la température de l'eau entourant immédiatement la boucle ne soit jamais inférieure au point de congélation de l'eau pendant les saisons froides. Le comportement imprévisible des rivières (crues, courants d'air, etc.) peut également endommager les systèmes et présente des dangers liés aux débris mobiles. Les boucles d'étang ont connu une croissance de leur popularité en partie en raison de leur moindre besoin en tuyauterie par rapport aux autres systèmes en boucle fermée, de leurs meilleures caractéristiques de transfert de chaleur et de l'absence de forage ou de creusement de tranchées [70]. Les principaux points négatifs de ce système sont l'exigence d'un plan d'eau assez vaste et les contraintes liées à son utilisation.



Figure 3. 11 : Un système en boucle fermée d'étang pour une pompe à chaleur géothermique[71].

### b) Systèmes de pompe à chaleur géothermique en boucle ouverte

Les systèmes de transfert de chaleur en boucle ouverte sont en contact direct avec la terre. Dans ces systèmes, les eaux souterraines locales ou les eaux de surface, comme les lacs et les étangs, sont utilisées pour le transfert direct de la chaleur. La pompe à chaleur utilise l'échangeur de chaleur pour extraire l'eau, puis la rejeter dans la source ou dans le sol pour l'irrigation [70]. Actuellement, des études sont menées sur l'utilisation de l'eau dans les mines abandonnées, puisque les mines remplies d'eau permettent d'être chauffées à faible coût grâce à la technologie des pompes à chaleur. Trois types de boucles ouvertes sont fréquents : les puits d'extraction, les puits d'extraction et de réinjection et les systèmes d'eau de surface.

Le type le plus répandu est celui des puits d'extraction et de réinjection. La procédure consiste à extraire l'eau d'un puits de production jusqu'à la nappe phréatique, puis à la réinjecter dans cette même nappe à une distance adéquate du puits de production. Cela permet d'assurer un transfert de chaleur suffisant du sol vers l'eau entre les puits [70]. Ces installations en boucle ouverte présentent l'avantage de maintenir une température pratiquement constante de l'eau de la source. De plus, il est possible d'éviter les pertes liées à l'échangeur de chaleur supplémentaire requis pour les systèmes en boucle fermée, ce qui améliore le COP de la pompe à chaleur géothermique [69]. De plus, il est moins nécessaire de forer des boucles ouvertes que des boucles fermées verticales, dont les configurations de raccordement au sol sont plus simples et dont les frais initiaux sont plus bas [70]. L'un des inconvénients majeurs des boucles ouvertes réside dans la nécessité de préserver la qualité de l'eau, habituellement au moyen de réglementations concernant l'eau propre et les eaux de surface. Dans certains cas, les systèmes en boucle ouverte ne sont pas admis. De plus, la corrosion, l'encrassement et l'entartrage sont des inconvénients pour l'échangeur de chaleur situé entre la boucle d'échange de chaleur et la pompe à chaleur. Pour cette raison, une composition chimique d'eau relativement neutre et une faible quantité de minéraux tels que le fer sont nécessaires. Cependant, si les propriétés chimiques de l'eau ne sont pas neutres, un entretien des puits peut s'avérer nécessaire et l'utilisateur est alors davantage impliqué [70].

### 3.4 La Performance d'une pompe à chaleur

Lors du choix d'une pompe à chaleur (PAC), il est primordial de prendre en compte son efficacité. Cette mesure permet d'évaluer l'efficacité de la PAC grâce à la comparaison entre l'énergie générée et l'énergie consommée. Afin de garantir le choix du modèle le plus efficace, il est important de prendre en considération plusieurs critères [72] :

- Le coefficient de performance (COP) ;

- Le coefficient de performance saisonnier (SCOP) ;
- L'efficacité énergétique (ETAS).

Grâce une bonne compréhension de ces indicateurs, les consommateurs peuvent réduire leur facture énergétique et contribuer à une gestion plus efficace de leurs dépenses. À mesure que ces indicateurs sera élevée, la pompe à chaleur est performante et économique en énergie.

### 3.4.1 Le coefficient de performance de la pompe à chaleur

Un indicateur essentiel pour évaluer l'efficacité d'une pompe à chaleur est le coefficient de performance (COP). Il représente la capacité du dispositif à échanger de la chaleur en fonction de sa consommation énergétique. Autrement dit, un COP élevé indique une performance élevée de la pompe à chaleur.

Par exemple, une pompe à chaleur affichant un COP de 3 représente ainsi la production 3 kWh de chaleur pour chaque kWh d'électricité consommée. Ce rapport met en évidence l'efficacité de l'instrument. Un COP élevé est donc associé à une diminution des dépenses énergétiques pour le consommateur[72].

Le coefficient de performance d'une pompe à chaleur est défini comme le rapport entre l'effet utile généré (énergie thermique utile EU) et l'énergie consommée pour l'obtenir (énergie d'entraînement ED). Il s'agit donc de la formule [73]:

$$\text{COP} = \frac{E_U}{E_D} \quad (3.1)$$

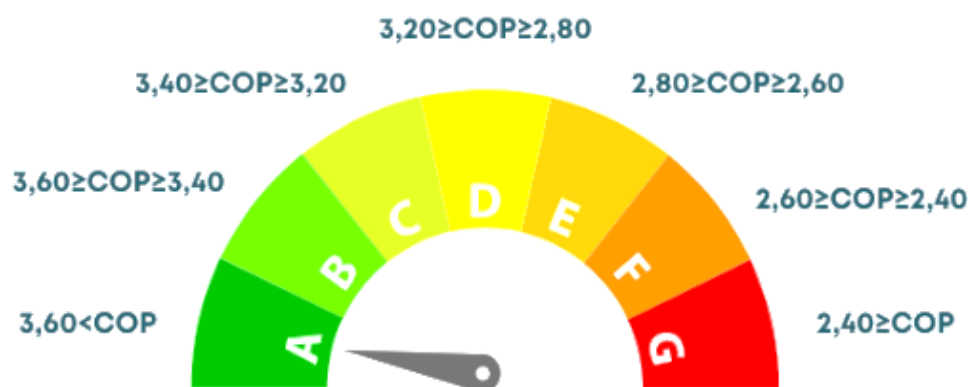


Figure 3. 12 : Classement de l'efficacité énergétique du système de chauffage[72].

### 3.4.2 Le coefficient de performance saisonnier de la pompe à chaleur

À la différence du COP, qui évalue le rendement immédiat d'une pompe à chaleur dans des conditions particulières, le coefficient de performance saisonnier (SCOP) est un indice beaucoup plus fiable qui traduit la performance effective de l'appareil tout au long de la saison de chauffe. Le coefficient de performance saisonnier prend en considération les fluctuations des températures extérieures, ce qui conduit à une estimation plus précise du rendement énergétique du système toute l'année. Deux régimes de température de fonctionnement de l'eau de chauffage sont utilisés : basse et moyenne. Le SCOP peuvent également être classées en fonction de leur efficacité énergétique, ce qui simplifie encore davantage le choix des consommateurs[72].

Le SCOP est calculé en mode chauffage selon l'équation suivante [73]:

$$\text{SCOP} = \frac{Q_{\text{HP}}}{P_e} \quad (3.2)$$

Les notations sont les suivantes :  $Q_{\text{HP}}$  correspond à la puissance thermique (capacité) de la pompe à chaleur, en W ;  $P_e$  correspond à la puissance d'entraînement de la pompe à chaleur, en W.

En mode refroidissement, le coefficient de performance saisonnier de la pompe à chaleur est obtenu par l'équation suivante[73] :

$$\text{SCOP} = \frac{\text{EER}}{3.413} \quad (3.3)$$

EER : C'est le taux d'efficacité énergétique.

### 3.4.3 L'efficacité énergétique de la pompe à chaleur

L'ETAS, également connue sous le nom d'Efficacité Thermique Annuelle Saisonnière (parfois connue sous le nom d'Efficacité Énergétique Saisonnière), joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la consommation d'énergie d'une pompe à chaleur. Créé en 2015 et mis en place dans le cadre de la directive européenne sur la conception respectueuse de l'environnement des appareils de chauffage, l'ETAS vise à sensibiliser les consommateurs et à inciter les fabricants à développer des produits plus performants. Grâce à cet indicateur, il est possible de comparer les performances énergétiques à la fois entre diverses pompes à chaleur et avec différents systèmes de chauffage, tels que les chaudières au fioul, à gaz au bois et les technologies solaires[72].

Il est assez facile de calculer l'ETAS : il faut simplement diviser le SCOP de l'appareil par 2,5. Grâce à cette formule, le SCOP, qui offre une vision de la performance saisonnière, peut

être converti en un pourcentage plus représentatif pour les consommateurs. Voici la formule [72]:

$$ETAS = \frac{SCOP}{2.5} \quad (3.4)$$

### 3.5 Conclusion

Le fonctionnement d'une pompe à chaleur est similaire à celui d'un réfrigérateur ou d'un climatiseur. Elle puise sa chaleur dans une source externe, comme l'air ambiant, l'énergie géothermique stockée dans le sol, des sources d'eau. Elle va ensuite amplifier et déplacer cette chaleur vers les endroits où elle est requise. Étant donné que la majorité de la chaleur est transmise au lieu d'être produite, les pompes à chaleur sont bien plus performantes que les technologies de chauffage traditionnelles, notamment les chauffages électriques et les chaudières. De plus, elles sont moins onéreuses à l'usage.

Les pompes à chaleur sont classées en quatre types : air/air, air/eau, pompe à chaleur géothermique et la pompe à chaleur hydrothermique.

Les pompes à chaleur géothermiques offrent une grande efficacité en matière de chauffage et de refroidissement des espaces. Ce système s'appuie sur le fait que la température de la Terre est relativement stable au niveau de sa profondeur, soit plus chaude en hiver qu'au sein de l'air, soit plus fraîche en été. Pendant l'hiver, une pompe à chaleur géothermique est capable de transporter la chaleur stockée dans la terre à l'intérieur d'un bâtiment et de la faire sortir du bâtiment pendant l'été.

Partout dans le monde, les pompes à chaleur géothermiques (PCG) sont installées dans de nombreux bâtiments résidentiels et commerciaux grâce à leurs performances énergétiques et environnementales intéressantes. Plus spécifiquement, ces pompes à chaleur représentent une technologie fiable en termes d'énergie renouvelable pour le chauffage et le refroidissement des espaces.

En choisissant une pompe à chaleur (PAC), il est essentiel de considérer son efficacité. Cette mesure permet d'évaluer l'efficacité de la PAC en comparant l'énergie produite et l'énergie consommée. Pour garantir la sélection du modèle le plus performant, il est important de prendre en compte divers critères, tels que le coefficient de performance (COP) et le coefficient de performance saisonnier (SCOP) de la pompe à chaleur. En comprenant correctement ces indicateurs, les consommateurs peuvent diminuer leur facture énergétique et contribuer à une gestion plus efficace de leurs dépenses. Plus ces indicateurs augmentent, plus la pompe à chaleur est efficace et économique en énergie.

## **Intégration des pompes à chaleur géothermiques dans les bâtiments**

---

Notre étude se concentre sur les pompes à chaleur géothermiques, qui sont installées horizontalement à une profondeur limitée. L'interaction entre le sol et l'environnement étant plus intense à faible profondeur, cela entraîne des fluctuations quotidiennes et annuelles de la température du sol. Le transfert de chaleur est affecté, ce qui a un effet sur les performances du système. Les caractéristiques du transfert de chaleur sont également influencées par d'autres facteurs, comme la pluie, la neige ou la croissance de la végétation. Au cours du chapitre suivant, nous avons donc étudié de manière approfondie l'interaction entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur de chaleur.



**Chapitre 4      Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol**



### 4.1 Introduction

Les interactions complexes entre le sol et l'atmosphère ont des répercussions dans divers domaines de la recherche scientifique et sont progressivement étudiées au moyen de mesures sur le terrain.

Les relations entre le sol et le climat permettent de mieux comprendre les systèmes environnementaux à l'échelle planétaire. Ces interactions entre des éléments du sol et des phénomènes climatiques exercent un impact sur la biodiversité, mais également sur la santé des écosystèmes et le changement climatique. Le sol joue un rôle essentiel dans les échanges entre le climat et l'environnement. Il joue un rôle crucial dans la gestion de l'eau, la sécurité alimentaire ainsi que le cycle du carbone. Parmi les éléments essentiels liés à ce rôle, on compte[74]:

- Les sols renferment environ deux à trois fois plus de carbone que l'air.
- Le type de sol a également une influence sur la chaleur stockée et permet de contrôler les températures locales.
- Ils influencent la quantité d'eau rejetée dans l'air.

Le couvert végétal du sol est un élément essentiel des interactions entre le sol et l'atmosphère. Elle influence le stockage du carbone dans les sols ainsi que la distribution des précipitations. Les plantes jouent également un rôle dans le contrôle de la température du sol en [74]:

- La présence de plantes diminue l'impact du rayonnement solaire direct.
- La transpiration entraîne la libération d'une quantité de vapeur d'eau dans l'air.
- L'établissement d'une protection contre l'érosion du sol.

Dans un contexte complexe tel que l'espace urbain, le microclimat est principalement régi par les flux d'énergie locaux. Ces échanges se produisent par rayonnement (principalement dans le domaine des courtes longueurs d'onde et de l'infrarouge), par conduction dans le sol (flux de chaleur du sol et par convection (flux de chaleur sensible) ou par évaporation[75]. La maîtrise de ces diverses formes de transfert de chaleur est donc une étape essentielle avant de s'intéresser à l'interaction complexe qui se produit entre le sol et l'atmosphère.

Le présent chapitre est donc divisé en deux parties. La première partie fournit une explication approfondie des trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), avec leurs caractéristiques respectives et l'équation de transfert de chaleur correspondante.

La deuxième partie s'appuie sur l'interaction entre l'atmosphère et le sol, et détaille l'équation de bilan hydrique et de bilan énergétique. Les différents éléments composant cette interaction

tel que, le rayonnement solaire, le flux de chaleur sensible et latente, et le phénomène d'évaporation et de transpiration sont examinés attentivement.

### 4.2 Le transfert thermique

Le transfert de chaleur représente un flux d'énergie qui varie en fonction des températures des corps ou des systèmes impliqués. L'énergie cinétique moyenne des mouvements microscopiques aléatoires des molécules ou des particules d'une substance est mesurée par la température. Elle est aussi la quantité physique qui oriente le transfert de chaleur entre deux substances en contact thermique. En effet, la chaleur se déplace des zones plus chaudes vers les zones plus froides. Selon cette perspective, la température présente une certaine similitude avec le potentiel hydrique, c'est-à-dire la grandeur physique qui influence la direction de l'écoulement fluide. Il existe trois modes de transfert de chaleur :

- ✓ Conduction ;
- ✓ Convection, ;
- ✓ Rayonnement.

Une bonne compréhension du transfert de chaleur à l'intérieur et à travers les matériaux contribue à améliorer l'efficacité énergétique et à faire progresser les technologies de pointe[76].

#### 4.2.1 Conduction

La conduction thermique désigne le transfert de chaleur induit par une variation de température entre deux parties d'un même environnement, ou entre deux environnements en contact, sans que la matière ne bouge de façon significative. En réalité, il s'agit de la transmission de l'agitation thermique à proximité, où une molécule ou un atome transfère une fraction de son énergie cinétique à son voisin, l'agitation de l'atome diminue au bénéfice de celle de son voisin[77].

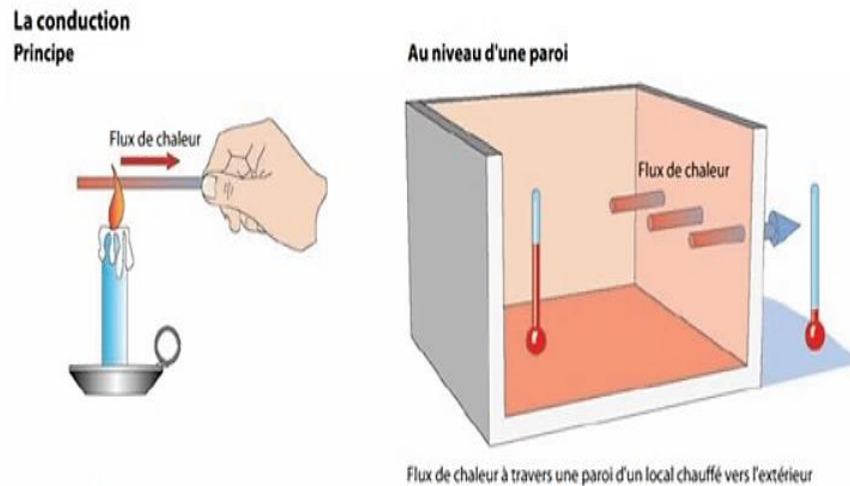


Figure 4. 1 : Le transfert thermique par conduction[78].

### 4.2.1.1 Loi de Fourier

La loi de Fourier stipule le déplacement spontané de chaleur d'une zone de température élevée à une zone de température plus basse, mathématiquement démontrée par Jean-Baptiste Biot en 1804 et expérimentalement prouvée par Fourier en 1822[77].

La densité de flux de chaleur  $\varphi$  et le gradient de température sont linéairement proportionnels.

$$\varphi = -\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \quad (4.1)$$

On appelle la conductivité thermique du matériau la constante de proportionnalité  $\lambda$ . Elle demeure toujours optimiste. Dans le système international, la conductivité thermique est mesurée en  $J.m^{-1}.K^{-1}.s^{-1}$ , ou, autrement dit, en  $W.m^{-1}.K^{-1}$ [77].

### 4.2.1.2 L'équation de la chaleur

L'équation générale de conduction de la chaleur est obtenue en utilisant un bilan d'énergie et en exprimant la loi de Fourier. C'est sous sa forme unidimensionnelle qu'elle est présentée ici[77].

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

$\rho$  : Masse volumique du matériau, exprimée en  $kg.m^{-3}$

$c$  : Chaleur massique du matériau, exprimée en  $J.kg^{-1}.K^{-1}$ .

### 4.2.1.3 L'analyse de la conduction dans un régime permanent

#### 4.2.1.3.1 Cas d'une surface plane simple

Le milieu conducteur thermique du matériau est alors restreint par deux plans parallèles (comme dans le cas d'un mur). Chacun de ces plans présente une température  $T$  uniforme sur l'ensemble de sa surface. Afin d'éliminer les effets de bord, les plans sont considérés comme ayant des dimensions infinies. Par conséquent, le débit entrant est équivalent au débit sortant, ce qui signifie que les bords ne perdent pas de chaleur. On obtient alors l'expression du flux thermique [77]:

$$\Phi = \frac{\lambda S}{e} (T_1 - T_2) \quad (4.3)$$

La densité de flux thermique par unité de surface est exprimée par :

$$\varphi = \frac{\lambda}{e} (T_1 - T_2) \quad (4.4)$$

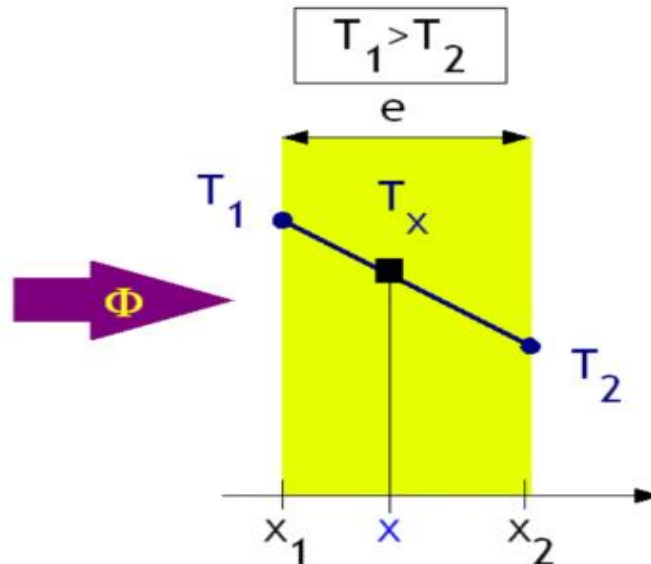


Figure 4. 2 : Exemple de répartition de la température dans un mur [77].

#### 4.2.1.3.2 Cas de surfaces planes en série

Prenons l'exemple des matériaux A, B et C qui ont respectivement une épaisseur  $e_A$ ,  $e_B$  et  $e_C$ , ainsi qu'une conductivité radiative  $\lambda_A$ ,  $\lambda_B$  et  $\lambda_C$ . Les hypothèses sont les mêmes que dans le cas d'une simple surface plane. Le contact entre chaque couche est considéré comme parfait, ce qui implique que la température à l'interface entre deux matériaux est constante pour chacun d'entre eux : il n'y a pas de variation de température lors du déplacement d'une interface [77].

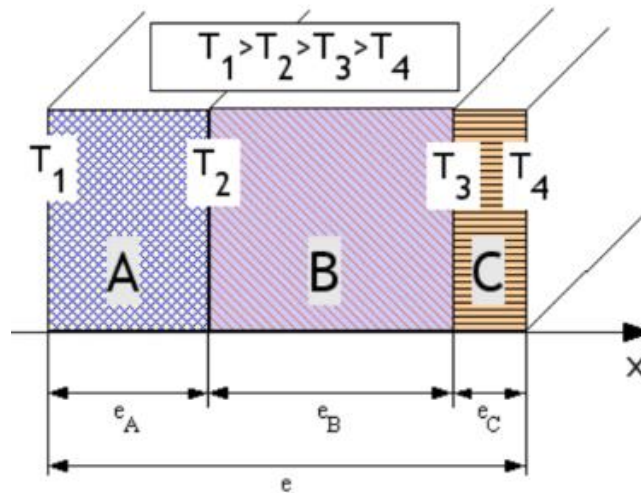


Figure 4.3 : Exemple de surfaces planes en série [77].

Pour chaque couche on a :

$$\begin{cases} \text{Couche A: } T_1 - T_2 = \frac{e_A}{\lambda_A S} \Phi \\ \text{Couche B: } T_2 - T_3 = \frac{e_B}{\lambda_B S} \Phi \\ \text{Couche C: } T_3 - T_4 = \frac{e_C}{\lambda_C S} \Phi \end{cases} \quad (4.5)$$

En prenant en compte les hypothèses, le flux ainsi que la densité de flux demeurent inchangés.

$$T_1 - T_4 = (T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) + (T_3 - T_4) \quad (4.6)$$

Donc :

$$\begin{cases} T_1 - T_4 = \left( \frac{e_A}{\lambda_A S} + \frac{e_B}{\lambda_B S} + \frac{e_C}{\lambda_C S} \right) \Phi \\ T_1 - T_4 = (R_{thA} + R_{thB} + R_{thC}) \Phi \end{cases} \quad (4.7)$$

### 4.2.1.3.3 Surfaces planes en parallèle

Les matériaux plans sont considérés comme étant placés côte à côte. L'homogénéité de chaque matériau est définie par deux plans parallèles. C'est le cas, par exemple, d'un mur comportant une fenêtre. Les hypothèses sont les mêmes que pour une simple surface plane. En outre, la température est supposée être constante en surface pour chaque zone ( $T_1$  et  $T_2$ ). Les surfaces des éléments A, B et C sont respectivement  $S_A$ ,  $S_B$  et  $S_C$ .

On suppose ensuite que le flux est perpendiculaire à la paroi constituée ; cette hypothèse est irréaliste car chaque élément de la paroi a une température de surface différente, ce qui entraîne un gradient de température latéral correspondant aux ponts thermiques. Le flux de

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

chaleur mesuré dans la paroi composée doit également être ajusté en appliquant des coefficients de déperdition linéiques spécifiques à chaque zone de jonction de paroi, ces coefficients peuvent être négligeables, conformément à la réglementation thermique TH 2000 [77].

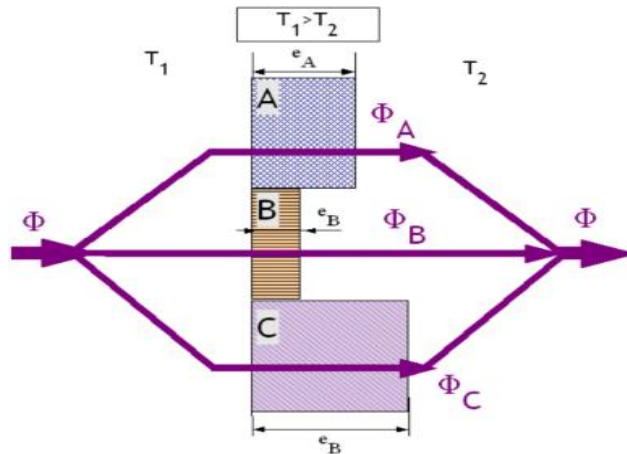


Figure 4. 4 : Exemple de surfaces planes en parallèle [77].

Les conductances thermiques sont additives :

$$C_{th} = \frac{1}{R_{th}} = \frac{1}{\frac{e_A}{\lambda_A S_A}} + \frac{1}{\frac{e_B}{\lambda_B S_B}} + \frac{1}{\frac{e_C}{\lambda_C S_C}} = \frac{1}{R_{thA}} + \frac{1}{R_{thB}} + \frac{1}{R_{thC}} \quad (4.8)$$

### 4.2.1.3.4 Cas de Surface cylindrique simple

Le tube simple est fabriqué à partir d'un matériau homogène unique. Toutes ses surfaces sont uniformes en termes de température. Pour éviter les effets de bord, la longueur du tube est considérée comme infini. Le changement de température est représenté par [77]:

$$T_1 - T_2 = \frac{\Phi}{2\pi\lambda L} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (4.9)$$

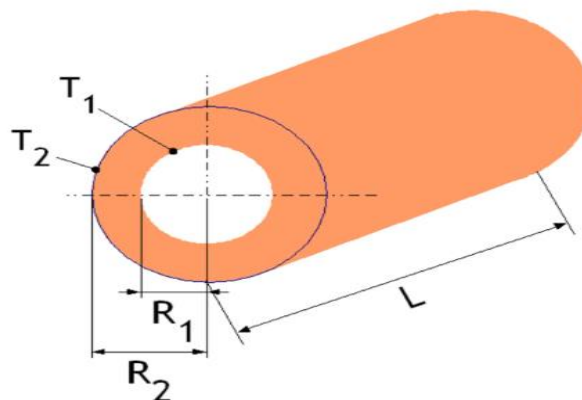


Figure 4. 5 : Exemple de Surface cylindrique simple [77].

### 4.2.2 Convection

La convection désigne en mécanique des fluides un processus de transfert d'énergie thermique impliquant le passage de la matière à l'état de fluide. Il peut s'agir d'un gaz ou d'un liquide. La convection est à l'origine d'une rotation générale de la matière. Celle-ci se déplace verticalement, soit de manière ascendante, soit de manière descendante. Les parties moins denses du fluide s'élèvent, alors que les parties plus denses descendent. La convection thermique fait référence à la transmission de chaleur entre un fluide en mouvement et une surface solide[79]. La convection intervient dans de nombreux phénomènes naturels, comme les courants atmosphériques et les mouvements des eaux[76].

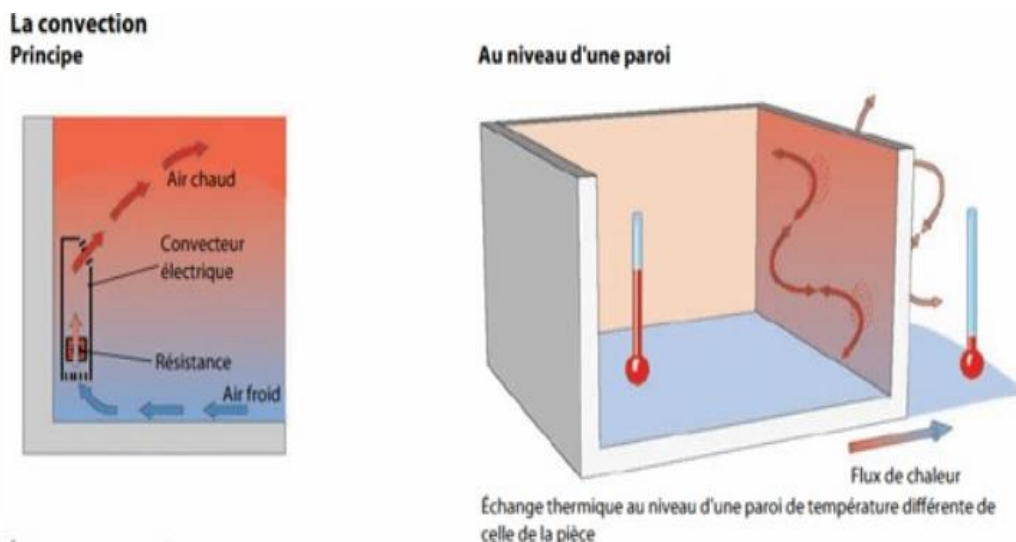


Figure 4. 6 : Le transfert thermique par convection[78].

#### 4.2.2.1 Caractéristique du transfert de chaleur par convection

Il est essentiel d'identifier plusieurs étapes essentielles lors du mécanisme de transfert thermique par convection [76]:

- **Le déplacement du fluide** : Les fluctuations de température engendrent des variations de densité, ce qui entraîne le mouvement du fluide.
- **Transmission de chaleur** : La chaleur se déplace soit d'une zone chaude à un fluide qui l'entoure, soit d'un fluide chaud vers une zone plus froide.
- **L'équilibre de la chaleur** : Grâce à la circulation continue du fluide, la chaleur est répartie uniformément.

### 4.2.2.2 Les diverses catégories de transferts thermiques

#### a) La convection libre :

La convection libre souvent appelée convection naturelle est un phénomène qui ne se produit que lorsque les mouvements du fluide sont provoqués par des variations de masse volumique. Le moteur de cet écoulement est formé par ces gradients de masse volumique, définis comme des ratios de changement spatial. Ce processus entraîne le transfert de chaleur vers l'environnement. En d'autres termes, la convection libre survient lorsque le fluide se déplace de manière autonome en raison d'une anomalie au niveau de la masse volumique à origine thermique[79].

#### b) La convection forcée :

À la différence de la convection naturelle, la convection forcée repose sur une source d'énergie externe, par exemple une turbine ou une pompe qui fait tourner un mélangeur industriel. Le mouvement du fluide dans ce cas est également artificiel. Il existe de nombreux exemples de ce type, comme les chauffages électriques équipés d'une soufflerie qui chauffe l'air en faisant passer une résistance électrique. Les sèche-cheveux et les fours à convection fonctionnent également selon ce principe. La convection forcée est employée dans divers processus industriels[79].

### 4.2.2.3 L'équation de la convection thermique

Afin d'obtenir l'équation de la convection thermique, il est nécessaire de combiner la formule de la diffusion de chaleur dans le fluide appelée « loi de Fourier » avec celle de l'advection de chaleur par le fluide[79].

La loi de Fourier pour la diffusion de la chaleur est la suivante :

$$\vec{\varphi} \text{ dif} = -\lambda \vec{\nabla} T \quad (4.10)$$

$\varphi$  : La densité du flux de chaleur.

$\lambda$ : La conductivité thermique du fluide

L'advection de la chaleur s'écrit de la manière suivante :

$$\vec{\varphi} \text{ adv} = \rho C_p T \vec{u} \quad (4.11)$$

$\varphi$  : La densité du flux de chaleur.

$\rho$  : La masse volumique du fluide.

$C_p$  : La capacité thermique massique du fluide.

$T$  : La température du fluide.

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

$u$  : La vitesse du fluide.

Finalement, l'équation de la convection thermique est la suivante :

$$\vec{\varphi} \text{ conv} = -\lambda \vec{\nabla} T + \rho C_p T \vec{u} \quad (4.12)$$

La loi de Newton gouverne le processus de transfert de chaleur par convection, dans lequel la densité de flux de chaleur transférée entre une paroi solide et un fluide soumis à un écoulement est liée à la différence de température créée. Elle s'exprime par la formule [80]:

$$\phi = h \times S \times (T_p - T_\infty) \quad (4.13)$$

Où  $h$  est une valeur positive connue sous le nom de coefficient d'échange convectif, exprimée en  $(W.m^{-2}.K^{-1})$ . La surface d'échange thermique est définie par  $S$ .  $T_p$  correspond à la température de la paroi. La température située loin de la paroi est  $T_\infty$ .

### 4.2.2.4 Le coefficient d'échange convectif

Le coefficient d'échange convectif  $h$  est influencé par divers paramètres tels que le fluide, le type d'écoulement et l'état de surface, ce qui rend sa quantification extrêmement complexe[80].

$$h = Nu \frac{k_f}{d_h} \quad (4.14)$$

$k_f$  : La conductivité thermique du tube,  $W.m^{-1}.K^{-1}$ .

$d_h$  : Le diamètre hydraulique.

$Nu$  : Le nombre de Nusselt.

#### a) Nombre de Reynolds

On peut définir un régime d'écoulement en convection forcée en recourant à un nombre nommé « nombre de Reynolds », qui représente la proportion entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Il est attribué par[80] :

$$Re = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces visqueuses}} = \frac{V \cdot L_c}{\vartheta} = \frac{\rho \cdot V \cdot L_c}{\mu} \quad (4.15)$$

Où  $V$  représente la vitesse de l'écoulement ( $m.s^{-1}$ ),  $L_c$  représente la longueur du système étudié ( $m$ ),  $\vartheta$  représente la viscosité cinématique du fluide ( $m^2/s$ ),  $\mu$  représente la viscosité dynamique du fluide ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ ) et  $\rho$  représente la masse volumique du fluide ( $kg.m^{-3}$ ).

### b) Nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est utilisé pour caractériser le comportement du fluide dans les échanges de chaleur par convection, ce qui souligne l'influence de la diffusivité de quantité de mouvement comparée à la diffusivité thermique. Il est attribué par [80]:

$$P_r = \frac{\text{diffusivité de quantité de mouvement}}{\text{diffusivité thermique}} = \frac{\vartheta}{\alpha} \quad (4.16)$$

Où  $\alpha$  représente la diffusivité thermique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) et  $\vartheta$  représente la viscosité cinématique du fluide ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Avec

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4.17)$$

Où  $\lambda$ ,  $c_p$  et  $\rho$  désigne la conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), la chaleur spécifique du fluide ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) et la masse volumique du fluide ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), respectivement.

### c) Nombre de Nusselt

Le nombre de Nusselt caractérise le rapport entre le flux thermique par convection et le flux thermique par conduction. Le nombre de Nusselt est exprimé par la formule [80]:

$$N_u = \frac{\text{flux convectif}}{\text{flux conductif}} = \frac{h \cdot L_c}{\lambda} \quad (4.18)$$

### d) Nombre de Grashof

On peut définir le régime d'écoulement en convection naturelle en recourant à un nombre appelé « nombre de Grashof », qui représente le rapport entre les forces d'Archimède et les forces visqueuses. Il est attribué par [80] :

$$G_r = \frac{\text{forces d'Archimède}}{\text{forces visqueuses}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L_c^3}{\vartheta^2} \quad (4.19)$$

La valeur de  $g$  correspond à l'accélération de la pesanteur,  $\beta$  correspond au coefficient de dilatation thermique ( $\text{K}^{-1}$ ),  $\Delta T$  est la variation de température ( $\text{K}$ ),  $L_c$  représente la longueur du système étudié ( $\text{m}$ ) et  $\vartheta$  est la viscosité cinématique du fluide est définie par la vitesse ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

#### 4.2.2.5 Transfert de chaleur par la convection laminaire et la convection turbulent

Il est essentiel d'étudier les lois d'écoulement du fluide avant de pouvoir expliquer la convection de la chaleur. Dans chaque situation particulière, il est important de considérer deux types d'écoulement : l'écoulement laminaire, où les gaz s'écoulent parallèlement sans se mélanger, et l'écoulement turbulent, où, en chaque point, la vitesse s'écoule de manière aléatoire.

### 4.2.2.5.1 *Le transfert de chaleur dans un plan soumis à un régime laminaire*

Dans le cas des gaz pour lesquels le nombre de Prandtl est similaire, proches de l'unité, il existe une analogie entre les profils des températures et des vitesses, ce qui permet de déduire la distribution des températures dans la couche limite. La quantité de chaleur apportée par unité de surface et unité de temps à la paroi au point d'abscisse  $x$  correspond à :

$$q = \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{2\lambda}{\delta} T_0 \quad (4.20)$$

$\lambda$ : La conductivité thermique.

$\delta$ : L'épaisseur de la couche limite.

L'épaisseur de la couche limite est donnée par la formule suivante :

$$\delta = 6 \sqrt{\frac{\vartheta x}{u_0}} \quad (4.21)$$

Le coefficient de convection devient alors :

$$h = \frac{q}{T_0} = \frac{2\lambda}{\delta} = \frac{\lambda}{3} \sqrt{\frac{u_0}{\vartheta x}} \quad (4.22)$$

$\vartheta$ : La viscosité cinématique

Lorsque le nombre de Prandtl est différent de l'unité, il est facile de montrer que la couche limite « thermique », similaire à la couche dynamique, possède une épaisseur  $\Delta$  qui correspond à  $\delta$  par la formule :

$$\Delta = \delta P_r^{\frac{1}{3}} \quad (4.23)$$

Le coefficient de convection s'écrit alors :

$$h = \frac{\lambda}{3} \sqrt{\frac{u_0}{\vartheta x}} P_r^{1/3} \quad (4.24)$$

La relation entre le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl devient alors :

$$Re = \frac{h x}{\lambda} = \frac{1}{3} Re^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}} \quad (4.25)$$

### 4.2.2.5.2 *Le transfert de chaleur dans un plan soumis à un régime turbulent*

Lorsque le nombre de Reynolds d'un conduit excède une certaine valeur critique proche de

2 000, son écoulement passe alors de laminaire à turbulent.

### a) Régime turbulent dans un conduit

Pour établir le régime dynamique, il faut suivre le parcours  $l$  qui est exprimée par :

$$\frac{l}{d} = 0.8Re^{1/4} \quad (4.26)$$

Avec un Reynolds égal à 10 000, cette distance correspond à 8 diamètres.

Le coefficient de convection dans un conduit est déterminé par la formule de Reynolds-Stanton.

$$h = \frac{Q}{T_0} = \frac{fC}{u_0} \quad (4.27)$$

$f$ : Le frottement unitaire local.

### b) Régime turbulent dans un plan

Le coefficient de convection correspondant à un écoulement turbulent le long d'un plan est exprimé par :

$$\frac{h}{C \rho u_0} = \frac{0.029 Re^{-0.20}}{1 + \left(\frac{u''}{u_0}\right) \left(P_r^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (4.28)$$

Avec une approche approximative suffisante, ce coefficient de convection moyen ( $h_m$ ) peut donc s'écrire :

$$\frac{h_m}{C \rho u_0} = \frac{0.0017}{1 + (u''/u_0) (P_r^{2/3} - 1)} \quad (4.29)$$

### c) Régime turbulent qui ne se définit pas dans un conduit

La situation la plus courante est représentée par un cylindre circulaire de diamètre  $D$ , pour lequel l'axe est normal à la vitesse  $u_0$ . L'expression du coefficient de convection devient :

$$\frac{h_m d}{\lambda} = 0.53Re^{1/2}P_r^{1/3} \quad (4.30)$$

### 4.2.3 Rayonnement

L'énergie émise par un corps chauffé est un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement dit « thermique » a la particularité de pouvoir se propager dans le vide. En physique classique, ce phénomène n'est pas expliqué au niveau microscopique. Il est toutefois important de noter que plus la température corporelle est importante, plus l'agitation thermique qui engendre l'émission est importante. Le rayonnement thermique, qui est comme tout rayonnement électromagnétique, se distingue par sa densité d'énergie et son spectre, c'est-à-dire la distribution de l'énergie en fonction de la longueur d'onde. Lorsque la température du corps augmente, le rayonnement thermique se dirige vers les longueurs d'ondes plus courtes.

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

Il est nécessaire d'établir une distinction entre la nature des récepteurs du rayonnement thermique car les uns le reflètent, les autres l'absorbent et le convertissent en énergie interne afin de rayonner eux-mêmes[81].

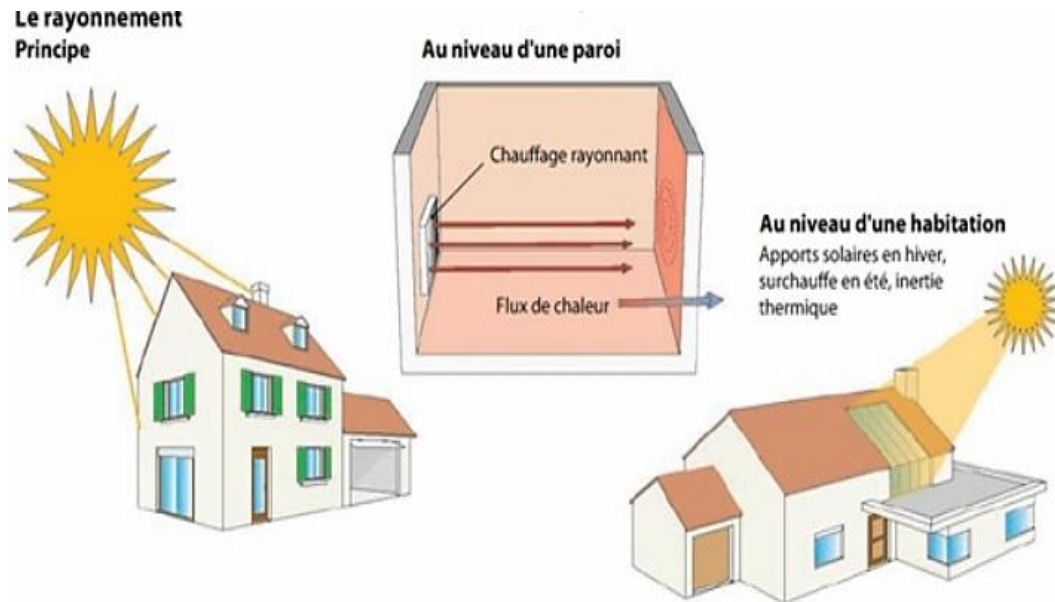


Figure 4. 7 : Le transfert thermique par rayonnement[78].

### 4.2.3.1 Éléments caractéristiques du rayonnement thermique

Voici les différentes caractéristiques du rayonnement thermique [81]:

**Émission :** À une certaine température, le corps convertit son énergie interne appelée énergie microscopique en rayonnement thermique. On appelle flux d'émission la quantité d'énergie émise par une unité de surface d'un corps durant une unité de temps. Cette quantité d'énergie est notée  $F_{emi}$ .

**Absorption :** C'est le contraire de l'opération. Lorsqu'une surface accueille un flux d'énergie, une partie de ce flux est convertie en énergie interne, connue également sous le nom de flux absorbé ( $F_{abs}$ ).

**La réflexion et la diffusion :** Plutôt que d'être absorbé, la paroi peut renvoyer directement le rayonnement incident sur elle. Dans ces circonstances, on peut distinguer deux scénarios.

- **Scénario 1 :** Les ondes peuvent être renvoyées dans toutes les directions ; même s'il n'existe qu'une direction incidente. Il s'agit donc de diffusion. La fréquence de l'onde diffusée ou émise est identique à celle de l'onde incidente. On appelle  $Ref$  la combinaison de ces deux flux.

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

- **Scénario 2 :** Le renvoi est alors soumis au principe de l'optique géométrique, « un angle d'incidence, un angle de réflexion ». Dans ce cas, il faut parler de réflexion.

**La transparence et l'opacité :** Un milieu transparent est un milieu capable de transmettre la totalité de l'onde incidente. Le vide illustre un environnement transparent. Le verre peut également être considéré comme un environnement transparent pour des longueurs d'ondes dans le spectre visible. Un corps opaque est un corps dont aucune onde incidente n'est transmise.

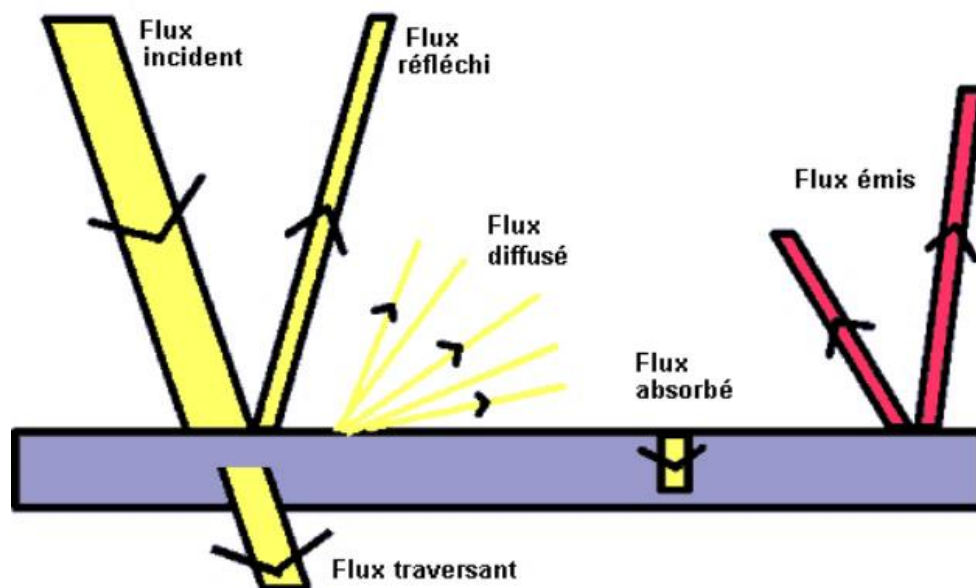


Figure 4. 8 : Le cheminement des différents flux à la surface d'un corps opaque[82].

### 4.2.3.2 La loi du Corps Noir

On définit généralement un corps noir comme un corps qui absorbe entièrement les radiations qu'il réceptionne. Dans ces circonstances, le flux réfléchi est inexistant et le flux partant ne se compose que du flux émis. En d'autres termes, nous avons [81]:

$$F_{\text{ref}} = 0 \quad \text{et} \quad F_p = F_{\text{emi}} \quad (4.31)$$

#### 4.2.3.2.1 La loi de Planck

La loi de Planck explique comment le flux émis d'un corps noir à la température  $T$  est réparti en fonction de la longueur d'onde. Le flux émis a la forme suivante dans un court intervalle de longueur d'onde [81]:

$$df_{\text{emi}}^{\text{CN}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{k_B \lambda T} - 1} d\lambda \quad (4.32)$$

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

$h$  : Constante de Planck,  $6,63 \times 10^{-34}$  J.s

$k_B$  : Constante de Boltzmann,  $1,38 \times 10^{-23}$  J/s

$\lambda$  : Longueur d'onde.

$T$  : Température du corps opaque.

$c$  : Vitesse de la lumière,  $3,00 \times 10^8$  m/s.

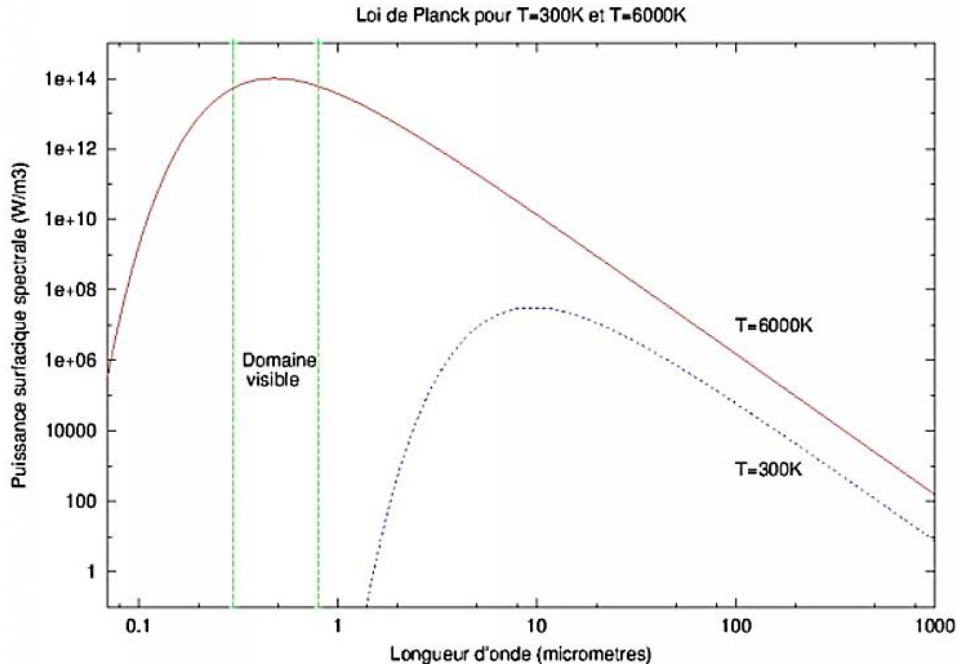


Figure 4. 9 : La courbe de Planck correspond à la température du Soleil ( $T = 6\ 000\ K$ ) et celle de la Terre ( $T = 300\ K$ ) [81].

### 4.2.3.2.2 Loi de Wien

La loi de Wien, également appelée « déplacement de Wien », est dérivée de la formule de Planck. Elle permet d'obtenir une valeur de la longueur d'onde,  $\lambda_m$ , où le flux est maximal pour une température définie [81] :

$$\lambda_m T = C = 3000 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (4.33)$$

En utilisant la figure ci-dessus (figure 4.9) qui présente les courbes de Planck pour les deux températures, il est possible de visualiser au moyen de graphiques que :

- Selon  $T = 6\ 000\ K$ ,  $\lambda_m$  correspond à  $0,6\ \mu\text{m}$ , ce qui se situe au milieu du spectre visible.
- Lorsque la température est de  $300\ K$ ,  $\lambda_m = 10\ \mu\text{m}$  dans l'infrarouge.

### 4.2.3.2.3 Loi de Stefan

La loi de Stefan consiste à intégrer la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde. Il s'agit en fait d'un simple calcul qui propose [81] :

$$F_{\text{emi}}^{\text{CN}} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{k_B \lambda T} - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (4.34)$$

Avec  $\sigma$  est la constante de Stefan,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

## 4.3 Évaluation de bilan énergétique à la surface et de l'évapotranspiration

Le système climatique est influencé par le bilan énergétique de la surface terrestre, qui contrôle les processus hydrométéorologiques se déroulant près de la zone critique de la Terre, où le sous-sol est fortement lié à l'atmosphère[83].

L'équation du bilan énergétique « dite équation de budget » est utilisé afin de d'écrire les fluctuations annuelles et diurnes de la température du sol[84]. Cette équation du bilan énergétique englobe l'échange d'énergie convective entre l'air et le sol, l'absorption du rayonnement solaire par la surface du sol, la grande longueur d'onde du rayonnement et le flux de chaleur latente provoqué par l'évaporation de surface[85].

La formule du bilan énergétique de la surface terrestre est basée sur le principe de conservation d'énergie peut être rédigée par l'approche suivante [86]:

$$R_n = G + H + L.E \quad (4.35)$$

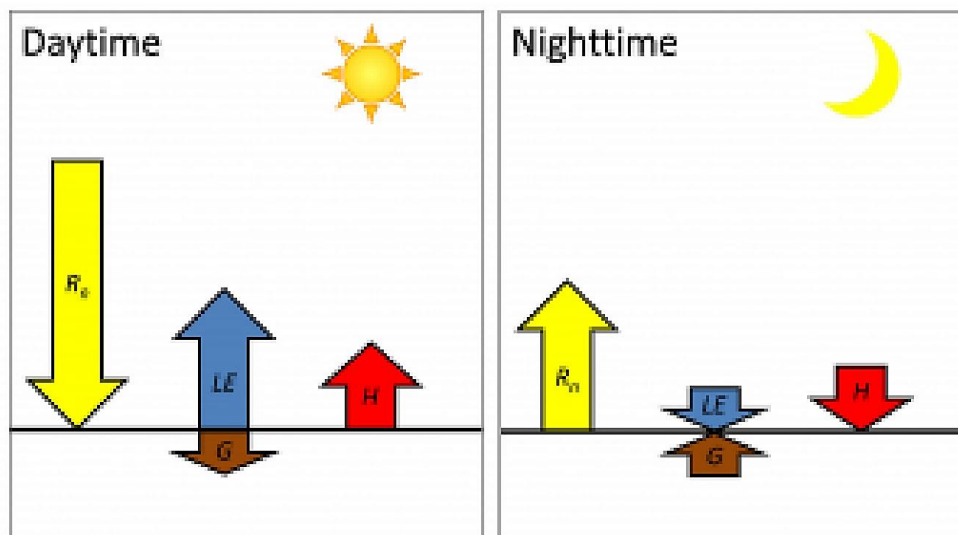


Figure 4. 10 : L'orientation supposée du jour et de la nuit pour chaque flux du bilan énergétique d'une surface terrestre humide pendant l'été[87].

$R_n$  : Le rayonnement net,

$G$  : Le flux de chaleur du sol,

$H$  : Le flux de chaleur sensible,

$L.E$  : Le flux de chaleur latente.

### 4.3.1 Rayonnement net

Une partie du rayonnement solaire direct et diffus à ondes courtes est réfléchi par la surface terrestre lorsque celui-ci atteint la surface. On nomme albédo la partie du rayonnement à ondes courtes entrant qui est réfléchi par la surface. L'albédo des surfaces sombres est généralement faible, tandis que celui des surfaces claires est élevé. L'albédo de la neige fraîche peut atteindre 0.9, ce qui signifie qu'une partie importante du rayonnement à ondes courtes entrant est reflétée. Par contre, le taux d'albédo de l'eau est habituellement assez faible, inférieur à 0.1, mais plus important si l'angle du soleil est faible. Les valeurs d'albédo des sols et de la végétation ont un taux situé entre 0.1 et 0.4. En général, les sols humides sont plus foncés et présentent des valeurs d'albédo plus basses que les sols secs. La présence de matière organique dans le sol influence également sa couleur, une teneur plus élevée en matière organique conduisant à une couleur plus foncée et donc à un albédo plus faible[87].

Outre les ondes courtes, il est également essentiel de prendre en considération les ondes longues à la surface de la Terre. L'atmosphère reçoit un rayonnement à ondes longues provenant de la surface terrestre. Cependant, il est important de noter que l'atmosphère émet également un rayonnement à ondes longues dans toutes les directions : vers le haut dans l'espace et vers le bas en direction de la surface de la planète. L'intensité de ce rayonnement à ondes longues vers le bas varie en fonction de la température et de l'émissivité de l'air. Le taux d'émission atmosphérique peut fluctuer entre 0.5 et environ 1[87].

L'émissivité de l'atmosphère est grandement augmentée par la présence de nuages, si bien que les nuits d'hiver nuageuses apparaissent souvent comme étant plus chaudes comparées aux nuits d'hiver sans nuages. L'émissivité atmosphérique est également influencée par la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, affichant des valeurs d'émissivité relativement plus hautes dans des environnements plus humides[87].

Dans le bilan énergétique de surface, le rayonnement net est le point le plus crucial. Il correspond à la totalité des flux de rayonnement de courte et de grande longueur d'onde qui pénètrent et qui sortent de la surface de la Terre. Du point de vue mathématique, le rayonnement net,  $R_n$ , s'exprime par [88]:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + RL_{down} - RL_{up} - (1 - \epsilon_0)RL_{down} \quad (4.36)$$

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

$R_s$ : Le rayonnement de courte longueur d'onde,  $W/m^2$ .

$RL_{down}$ : Le rayonnement de grande longueur d'onde entrant,  $W/m^2$ .

$RL_{up}$ : Le rayonnement de grande longueur d'onde sortant,  $W/m^2$ .

$\alpha$ : L'albédo de la surface du sol,  $\alpha = [0-1]$ .

$\varepsilon_0$ : L'émissivité de la surface.

### 4.3.1.1 Rayonnement extraterrestre

On appelle « constante solaire », le rayonnement qui atteint une surface située perpendiculairement aux rayons du soleil au sommet de l'atmosphère terrestre, d'une intensité d'environ  $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ . Cependant, en raison de l'angle entre la direction des rayons solaires et la normale à la surface de l'atmosphère, l'intensité du rayonnement local est influencée. Cet angle évolue au cours de la journée et varie en fonction des latitudes et des saisons. Le rayonnement extraterrestre (solaire,  $R_a$ ) désigne le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère terrestre sous une surface horizontale.

La position du soleil, la durée du jour et, corrélativement, et donc  $R_a$  évoluent également avec les saisons. La latitude, la date et l'heure influencent donc le rayonnement extraterrestre. La Figure 4.11 présente les valeurs moyennes quotidiennes de  $R_a$  pour différentes latitudes au cours d'une année[89].

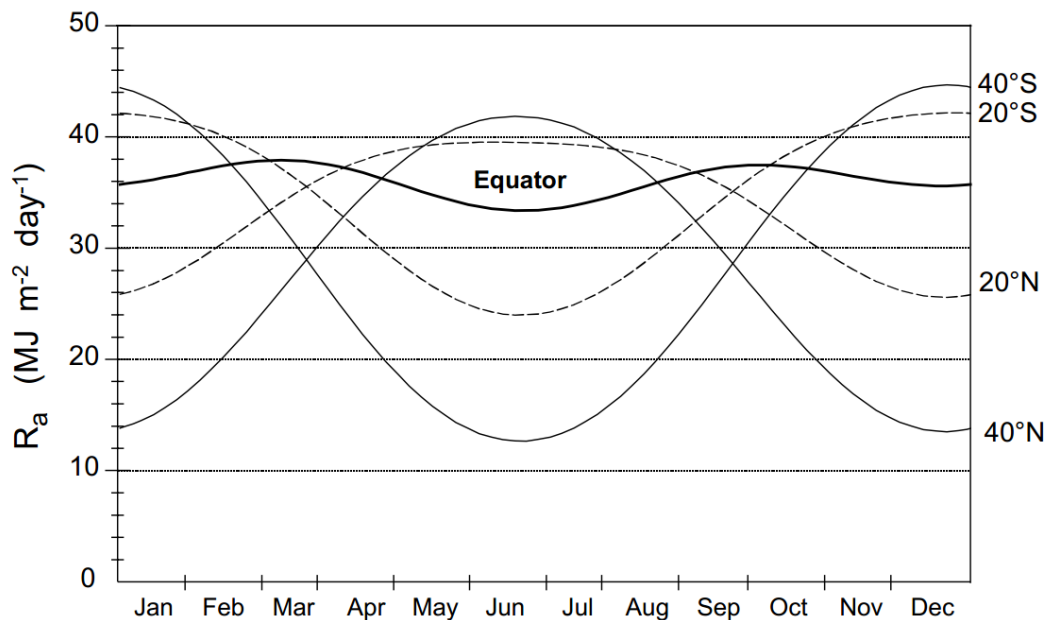


Figure 4. 11 : Les moyennes quotidiennes de rayonnement extraterrestre pour diverses latitudes pendant une année[89].

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

L'équation suivante permet d'estimer le rayonnement extraterrestre,  $R_a$ , journallement et selon différentes latitudes, en utilisant la constante solaire, la déclinaison solaire et la période de l'année.

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} \times d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (4.37)$$

$R_a$ : Le rayonnement extraterrestre, MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>

$G_{sc}$ : La constante solaire, 0.0820 MJ m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>.

$d_r$ : La distance relative inverse Terre-Soleil,

$\omega_s$ : L'angle de l'heure de coucher du soleil, rad.

$\varphi$  : Latitude, rad.

$\delta$  : La déclinaison solaire, rad.

Les formules suivantes permettent d'estimer les termes de distance relative inverse Terre-Soleil, de déclinaison solaire et d'angle de coucher du soleil :

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \left[ \frac{2\pi}{365} J \right] \quad (4.38)$$

$$\delta = 0.409 \sin \left[ \frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right] \quad (4.39)$$

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (4.40)$$

J est le nombre du jour de l'année.

### 4.3.1.2 Rayonnement de courte longueur d'onde

Une partie du rayonnement est diffusée, réfléchi ou absorbée par les gaz atmosphériques, les nuages et la poussière lors de son entrée dans l'atmosphère. On désigne par le terme de « rayonnement solaire » la quantité de rayonnement qui parvient à une surface horizontale. Étant donné que le soleil émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques à ondes courtes, le rayonnement solaire est aussi connu sous le nom de rayonnement à ondes courtes.

Approximativement 75 % du rayonnement extraterrestre est représenté par  $R_s$ , lors d'une journée sans nuages. Le rayonnement est réparti dans l'atmosphère en temps nuageux, et même avec une densité de nuages très élevée, environ 25 % du rayonnement extraterrestre continue d'atteindre la surface de la Terre, notamment sous forme de radiation diffusée céleste. Aussi appelé rayonnement global, il est la résultante du rayonnement direct à ondes

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

courtes du soleil avec celle du rayonnement diffus céleste issu des différents angles ascendants.

On peut évaluer le rayonnement à courte longueur d'onde en utilisant la formule d'Angstrom, qui associe le rayonnement solaire à la quantité de rayonnement extraterrestre et au temps d'ensoleillement effectif [89] :

$$R_s = \left[ a_s + b_s \frac{n}{N} \right] R_a \quad (4.41)$$

$R_s$  : Le rayonnement à onde courte (solaire), MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

$R_a$  : Le rayonnement extraterrestre.

$a_s$  : Constante de régression représentant la proportion du rayonnement extraterrestre arrivant sur la Terre pendant les journées couvertes ( $n = 0$ ).

$a_s + b_s$  : Partie du rayonnement extraterrestre arrivant sur la Terre durant un jour clair ( $n=N$ ).

$n$  : Durée d'ensoleillement effective, heure

$N$  : Durée maximale d'ensoleillement possible, heure.

$\frac{n}{N}$  : Durée relative d'ensoleillement.

Dans le cas où les données météorologiques réelles ne sont pas accessibles et qu'aucun calibrage n'a été effectué sur les paramètres  $a_s$  et  $b_s$ , les valeurs  $a_s = 0,25$  et  $b_s = 0,50$  sont conseillées.

Le nombre d'heures de clarté,  $N$ , est fourni par :

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (4.42)$$

L'enregistrement de la durée d'ensoleillement réelle,  $n$ , est effectué à partir d'un enregistreur Campbell Stokes.

### 4.3.1.2.1 Rayonnement d'une courte longueur d'onde : cas du ciel clair

Dans le cas où le niveau mesuré est près du seuil de la mer ou si les mesures étalonnées de  $a_s$  et  $b_s$  sont accessibles :

$$R_{s0} = (a_s + b_s) R_a \quad (4.43)$$

$R_{s0}$  : Rayonnement de courte longueur d'onde dans un ciel clair, MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

Dans le cas où les mesures étalonnées de  $a_s$  et de  $b_s$  ne sont pas accessibles :

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5}z) R_a \quad (4.44)$$

$z$  : L'altitude du site par rapport au niveau de la mer, en mètres.

### 4.3.1.2 Rayonnement net d'ondes courtes

En effet, l'équilibre qui existe entre le rayonnement solaire entré et celui réfléchi définit le rayonnement net d'ondes courtes :

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (4.45)$$

$R_{ns}$  : Rayonnement net d'ondes courtes, MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

$\alpha$  : L'albédo, également appelé indice de réflexion de la couverture,

$R_s$  : Rayonnement solaire incident, MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

### 4.3.1.3 Le rayonnement à ondes longues

Le rayonnement solaire est transformé en énergie thermique par la Terre. Selon différentes méthodes, telles que l'émission de rayonnement, elle perd cette énergie. L'énergie radiative émise par la Terre, dont la température est bien inférieure à celle du Soleil, a des longueurs d'onde qui sont plus longues que ceux du Soleil. C'est la raison pour laquelle on nomme le rayonnement terrestre « rayonnement à ondes longues ». Les ondes longues émises ( $RL_{up}$ ) sont soit absorbées par l'atmosphère, soit dissipées dans l'espace. La température de l'atmosphère est augmentée par le rayonnement à ondes longues reçu ( $RL_{down}$ ) ; de ce fait, l'atmosphère émet sa propre énergie, ce qui est visualisé sur la figure 4.12. Le rayonnement retourne en partie à la surface de la Terre. La couche terrestre diffuse et absorbe ainsi un rayonnement à ondes longues.

Le rayonnement de grande longueur d'onde sortant et entrant peuvent être estimés à l'aide de l'équation de (Bastiaanssen 1995), respectivement exprimées comme suit [88], [90]:

$$RL_{up} = \varepsilon_0 \times \sigma \times T_s^4 \quad (4.46)$$

$$RL_{down} = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (4.47)$$

$\sigma$  : Constant de Stefan-Boltzmann ,  $\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9}$  MJ K<sup>-4</sup> m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup> ou  $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup> / K<sup>4</sup>.

$T_a$  : Température de l'air à la surface, en K

$T_s$  : Température du sol, en K.

$\varepsilon_a$  : L'émissivité de l'atmosphère.

$\varepsilon_0$  : L'émissivité de la surface.

L'émissivité atmosphérique peut être calculée selon la formule de Bastiaanssen[88], [90].

$$\varepsilon_a = 0.85 \times (-\ln\tau_{sw})^{0.09} \quad (4.48)$$

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

$\tau_{sw}$ , c'est la transmissivité atmosphérique en fonction de l'altitude qui peut être estimée par la formule d'Allen[89].

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} \times Z \quad (4.49)$$

Z : L'altitude, en m.

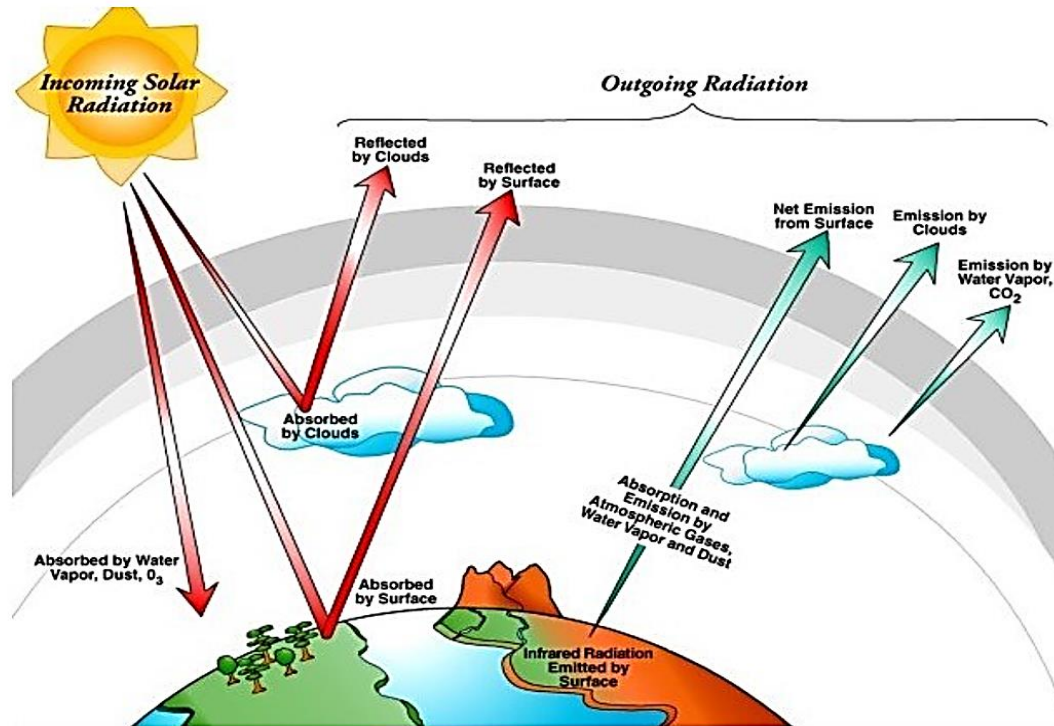


Figure 4. 12 : Bilan radiatif entre la surface de la Terre et l'atmosphère[91].

### 4.3.1.3.1 Le rayonnement à ondes longues net

On nomme « rayonnement à ondes longues net » la distinction énergétique entre le rayonnement à ondes longues sortant et entrant. Étant donné que le rayonnement sortant à ondes longues est généralement plus élevé que le rayonnement entrant à ondes longues, ce phénomène entraîne une perte de l'énergie.

La quantité d'énergie rayonnée à grande longueur d'onde est linéaire avec la température absolue de la surface à la puissance quatre. Cette relation est connue sous le nom de loi de Stefan-Boltzmann. Cependant, l'énergie nette provenant de la surface terrestre est plus faible que l'énergie émise et définie selon la loi de Stefan-Boltzmann, dû aux phénomènes d'absorption et de radiation descendante du ciel. Le rayonnement à ondes longues est en effet absorbé et émis par la vapeur d'eau, la poussière, les nuages et le dioxyde de carbone. Il est essentiel de prendre en compte leurs concentrations lors de l'évaluation du flux net sortant. Du

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

fait de l'importance de l'humidité et de la nébulosité dans la correction de la loi de Stefan-Boltzmann pour évaluer le flux net de rayonnement à ondes longues. Les taux d'absorption des autres absorbeurs sont donc supposés être constants [89].

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left( 1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (4.50)$$

$R_{nl}$  : Le rayonnement net à onde longue sortant, MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

$\sigma$  : Constant de Stefan-Boltzmann ,  $\sigma = 4,903 \cdot 10^{-9}$  MJ K<sup>-4</sup> m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

$T_{\max,K}^4$  ;  $T_{\min,K}^4$  : Température absolue maximale et minimale sur une durée de 24 heures, en K

$e_a$  : Pression de vapeur réelle , en kPa.

$R_s$  : Le rayonnement à onde courte (solaire), MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

$R_{so}$  : Le rayonnement du ciel clair, MJ m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup>.

$\frac{R_s}{R_{so}}$  : Le rayonnement de courte longueur d'onde relatif ( inférieur ou égal à 1).

### 4.3.2 Le flux de chaleur sensible

Concernant la représentation du flux de chaleur sensible au niveau des zones végétalisées, il est généralement difficile de comprendre la complexité du transfert de chaleur de la surface vers l'atmosphère. Cette complexité est causée par l'écoulement turbulent tridimensionnel ainsi que par les rugosités dans le mouvement des structures turbulentes situées à l'intérieur et au-dessus du couvert végétal.

La technique de fermeture du premier ordre est utilisé pour les modèles de flux de chaleur sensible mis en œuvre dans les approches du bilan énergétique de surface actuelles, selon laquelle la corrélation scalaire-vitesse est proportionnelle à la moyenne du gradient de température de l'air en fonction de l'altitude (Wilson, 1989). On peut également associer le coefficient de fermeture à la diffusivité des tourbillons, un concept qui peut être relié à la conductance ou à la résistance. Cette approche est connue sous le nom de résistance aérodynamique du flux de chaleur sensible[92].

Le flux de chaleur sensible est le taux de transfert de chaleur par convection et par conduction résultant de la différence de température de l'air entre la canopée et la zone environnante, qui peut être représenté par l'équation suivante :

$$H = \rho \times C_p \times \frac{T_s - T_a}{r_{ah}} \quad (4.51)$$

$\rho$  : La masse volumique de l'air, en kg/m<sup>3</sup>.

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

$C_p$ : La capacité thermique spécifique de l'air, en J/kg/K.

$T_s, T_a$ : La température du sol et de l'air respectivement, en K.

$r_{ah}$ : La résistance aérodynamique, en s/m.

La détermination initiale de la résistance aérodynamique est effectuée sous des conditions atmosphériques neutres, telles que [92]:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_u-d}{z_{0m}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_u-d}{z_{0h}}\right)}{U k^2} \quad (4.52)$$

$z_{0m}$ : Longueur de rugosité pour le transfert de quantité de mouvement, en m.

$z_{0h}$ : Longueur de rugosité pour le transfert de chaleur et de vapeur, en m.

$d$ : Hauteur du déplacement zéro.

$U$ : Vitesse moyenne horizontale du vent mesurée à la hauteur  $z_u$ , en m/s.

$k$ : Constante de von Karman, égale à  $k = 0.41$ .

Cependant, cette équation n'est applicable qu'en atmosphère neutre, en l'absence de stratification thermique, autrement dit en conditions adiabatiques. Lorsque la température de l'air au-dessus de la canopée varie en fonction de la hauteur, on détermine le  $r_{ah}$  en ajustant la stabilité atmosphérique[92].

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_u-d}{z_{0h}}\right) - \psi_h}{u_* k} \quad (4.53)$$

$u_*$ : La vitesse de frottement de la surface, en m/s.

$\psi_h$ : La fonction d'ajustement pour la stabilité atmosphérique lors du transfert de chaleur.

- Pour les conditions atmosphériques neutres

$$u_* = \frac{U k}{\ln\left(\frac{z_u-d}{z_{0m}}\right)} \quad (4.54)$$

- Pour les conditions de stratification thermique de l'atmosphère

$$u_* = \frac{U k}{\ln\left(\frac{z_u-d}{z_{0m}}\right) - \psi_m} \quad (4.55)$$

$\psi_m$ : La fonction d'ajustement atmosphérique lors du transfert de la quantité de mouvement.

Les deux équations ci-dessous fournissent les coefficients de correction de stabilité pour le transfert de chaleur dans des conditions atmosphériques instables et stables, respectivement.

$$\begin{cases} \psi_h = 2 \times \ln\left(\frac{1+x_1^2}{2}\right) - 2 \times \ln\left(\frac{1+x_2^2}{2}\right) \\ \psi_h = 6 \times \left(\frac{z_u - d - z_{om}}{L_{MO}}\right) \times \ln\left(1 - \frac{z_u}{L_{MO}}\right) \end{cases} \quad (4.56)$$

Où :

$$\begin{cases} x_1 = \left[1 - 16 \left(\frac{z_u - d}{L_{MO}}\right)\right]^{0.25} \\ x_2 = \left[1 - 16 \left(\frac{z_{oh} - d}{L_{MO}}\right)\right]^{0.25} \end{cases} \quad (4.57)$$

$$L_{MO} = -\frac{u_*^3 T_a \rho_a C_{Pa}}{g k H} \quad (4.58)$$

$L_{MO}$ : La longueur de stabilité de Monin-Obukhov.

$g$ : L'accélération de la pesanteur,  $g \approx 9,81$  m/s.

Les équations suivantes mettent en évidence les mesures de stabilité de l'atmosphère concernant le transfert de quantité de mouvement pour deux conditions atmosphériques différentes : instable et stable, respectivement.

$$\begin{cases} \psi_m = \psi_{m1} - \psi_{m2} \\ \psi_m = \psi_h = 6 \times \left(\frac{z_u - d - z_{om}}{L_{MO}}\right) \times \ln\left(1 - \frac{z_u}{L_{MO}}\right) \end{cases} \quad (4.59)$$

Avec :

$$\begin{cases} \psi_{m1} = 2 \ln\left(\frac{1+x_1}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x_1^2}{2}\right) - 2 \arctan(x_1) + \frac{\pi}{2} \\ \psi_{m2} = 2 \ln\left(\frac{1+x_3}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x_3^2}{2}\right) - 2 \arctan(x_3) + \frac{\pi}{2} \\ x_3 = \left[1 - 16 \left(\frac{z_{om} - d}{L_{MO}}\right)\right]^{0.25} \end{cases} \quad (4.60)$$

Les formules de Maha Chalhoub [93] permettent de calculer la hauteur de déplacement, la longueur de rugosité pour le transfert de quantité de mouvement et la longueur de rugosité pour le transfert de chaleur et de vapeur.

La hauteur de déplacement est calculée à partir de la hauteur de la végétation  $h_c$  [m].

$$d = \frac{2h_c}{3} \quad (4.61)$$

La longueur de rugosité pour le transfert de quantité de mouvement est donnée par :

$$z_{om} = 0.123h_c \quad (4.62)$$

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

La longueur de rugosité pour le transfert de chaleur et de vapeur peut être calculée comme suit :

$$z_{0h} = 0.1z_{0m} \quad (4.63)$$

### 4.3.3 Le flux de chaleur latente

L'évapotranspiration (ET) est le résultat de la fusion de deux mécanismes différents par lesquels l'eau est évaporée à la surface du sol et transpirée à la surface de la culture. L'évaporation correspond à la transformation de l'eau liquide en vapeur d'eau (vaporisation) et à l'élimination de la vapeur de la surface d'évaporation. L'évaporation de l'eau se produit sur différentes surfaces, comme les sols et la végétation humide[89].

Il est nécessaire d'utiliser de l'énergie pour transformer les molécules d'eau liquides en vapeur. Cette énergie est produite par le rayonnement solaire direct et, plus faiblement, par la température ambiante de l'air.

Dans le cas où la surface d'évaporation correspond à la surface du sol, il faut également prendre en compte le niveau d'ombrage de la canopée des cultures ainsi que la disponibilité en eau à cette même surface. L'évaporation du sol est essentiellement déterminée par les conditions météorologiques si le sol peut fournir de l'eau à une vitesse suffisante pour répondre à la demande d'évaporation. Toutefois, si la période entre les précipitations et l'irrigation est longue et que le sol n'a pas une grande capacité à transporter l'humidité jusqu'à la surface, la couche arable perd de son eau et la surface du sol devient sèche. Dans ce contexte, la rareté de l'eau joue un rôle essentiel dans l'évaporation du sol. Si aucun apport d'eau n'est effectué à la surface du sol, l'évaporation s'affaiblit rapidement et peut s'arrêter presque totalement en quelques jours.

La transpiration est le processus par lequel l'eau liquide présente dans les tissus végétaux est vaporisée et la vapeur est évacuée vers l'air. Tout comme l'évaporation directe, la transpiration est notamment influencée par l'apport d'énergie, soit la différence de pression de vapeur, et le vent. Il est donc nécessaire de prendre en considération le rayonnement, la température et l'humidité de l'air ainsi que le vent lorsque l'on estime la transpiration. Le taux de transpiration dépend également de la teneur en eau du sol, de sa capacité à drainer l'eau jusqu'aux racines, ainsi que de l'engorgement et de la salinité de l'eau du sol. Il est également influencé par les particularités des cultures, les facteurs environnementaux et les pratiques culturales[89].

Les processus d'évaporation et de transpiration se déroulent en même temps et il est difficile de les différencier. En plus de la quantité d'eau disponible dans la couche arable, le taux d'évaporation d'un sol cultivé dépend largement de la proportion de rayonnement solaire

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

pénétrant à la surface du sol. À mesure que la culture se développe et que le couvert végétal recouvre de plus en plus la surface du sol, cette fraction diminue pendant la période de croissance. L'eau est principalement évaporée par le sol lorsque la culture est jeune, mais lorsque celle-ci est développée et couvre entièrement le sol, le processus principal devient la transpiration[89].

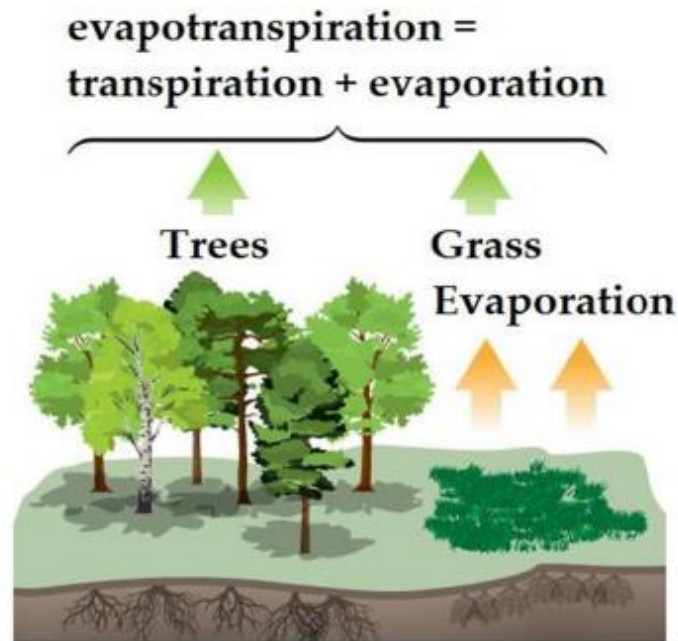


Figure 4. 13 : Illustration graphique du bilan de l'évaporation et de la transpiration[94].

La quantité d'énergie utilisée par l'eau à la surface pendant que la température reste constante en raison de la transpiration ou de l'évaporation est connue sous le nom de flux de chaleur latente. Le flux de chaleur latente est déterminé par la chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $L$ ) et l'évaporation réelle ( $E$ ), qui peuvent être calculées de la manière suivante [93].

$$E = P. \left[ 1 + \left( \frac{E_p}{P} \right)^{-2} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.64)$$

$P$  : Le taux de précipitations, en mm/s.

$E_p$ : Le potentiel d'évaporation, en  $\text{Kg/m}^2/\text{s}$  ou mm/s.

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

La formule de Penman-Monteith permet d'obtenir le potentiel d'évaporation, qui est exprimé comme suit [89]:

$$E_p = \frac{1}{L} \left[ \frac{\Delta \cdot R_n + \rho_a \cdot \frac{C_{p-a}(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \right] \quad (4.65)$$

$\Delta$ : La pente de la courbe de pression de vapeur saturante kPa/K,

$e_s$  et  $e_a$ : La pression de vapeur saturante et de vapeur réelle respectivement, en kPa.

$\gamma$ : Constante psychrométrique, en kPa/K.

$r_c$ : La résistance du couvert végétal, en s/m.

On peut calculer la pente de la pression de vapeur saturante selon la formule suivante [93], [95]:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T_a - 35.85)^2} \quad (4.66)$$

Il existe une corrélation entre la pression de vapeur saturante et la température de l'air :

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27(T_a - 273.15)}{T_a - 35.85}\right) \quad (4.67)$$

$T_a$ : La température ambiante, exprimé en K.

Afin de déterminer la pression de vapeur réelle, on emploie [93], [95]:

$$e_a = RH \cdot \frac{e_s}{100} \quad (4.68)$$

RH : L'humidité relative.

On calcule la constante psychrométrique en utilisant [93], [95]:

$$\gamma = C_{p-a} \cdot \frac{P_{at}}{L \cdot r_{mw}} \quad (4.69)$$

$P_{at}$ : La pression atmosphérique, en Pa.

$r_{mw}$ : Le poids moléculaire de la vapeur d'eau par rapport à l'air sec.

On peut évaluer la résistance de la végétation en utilisant l'expression suivante [93], [95]:

$$r_c = \frac{r_1}{0.5 \cdot LAI} \quad (4.70)$$

$r_1$ : La résistance stomatique dépend également d'une seule feuille, exprimée en s/m.

LAI : L'indice de la surface foliaire.

- Pour les herbes coupées dont la hauteur de végétation  $h_c$  est comprise entre 0.05 et 0.15 m :

$$LAI = 24 \cdot h_c \quad (4.71)$$

- Pour toute autre culture :

$$LAI = 5.5 + 1.5 \ln(h_c) \quad (4.72)$$

### 4.4 Le cycle d'eau dans le sol

#### 4.4.1 L'eau et le sol

Dans nos conditions climatiques, l'eau parvient au sol par la pluie, la neige, la rosée ainsi que par le brouillard. Toutefois, l'eau des précipitations n'est pas entièrement absorbée par le sol : en effet, pendant et après la pluie, une partie de l'eau est évaporée directement tandis qu'une autre partie peut être interceptée par le feuillage. L'eau qui pénètre dans le sol s'infiltre, puis atteint la surface et hydrate le sol. Cette eau est absorbée par les racines, puis évaporée par la transpiration de la tige et des feuilles. Enfin, une fraction plus petite s'infiltre et atteint la nappe phréatique. La quantité d'eau présente dans une coupe du sol et du sous-sol est généralement croissante avec la profondeur.

La quantité d'eau dépend de la porosité et de la capacité du sol à être perméable. La capacité de rétention d'eau maximale d'un sol est appelée "capacité au champ" et dépend principalement de sa granulométrie. Le sol n'est pas saturé à proximité de la surface : il contient des espaces vides renfermant de l'eau et de l'air sous l'effet des forces de gravité et de capillarité. La teneur en eau du sol n'augmente plus au-delà d'une profondeur donnée : il est alors saturé, tous ses pores étant remplis d'eau. On appelle cette zone saturée une nappe ; dans ce cas, les forces de gravité sont les plus importantes. Le sol ne contient que 0.064 % de l'eau douce totale, mais son rôle est crucial, car c'est l'eau que les racines des végétaux utilisent[96].

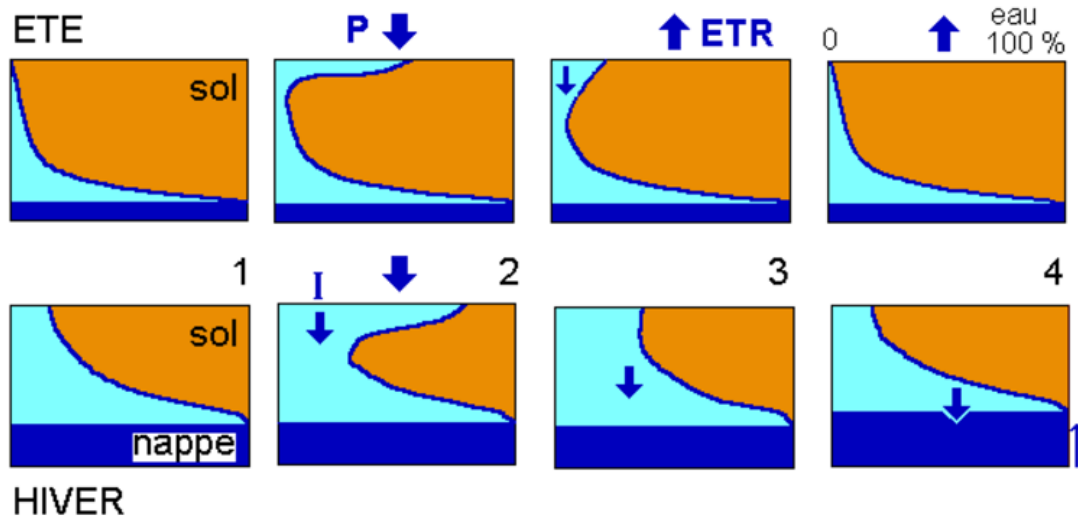


Figure 4. 14 : Exemple des profils de la teneur en eau dans le sol et le sous-sol durant la période estivale et hivernale[96].

### 4.4.2 La pression de succion et l'évaporation

La quantité d'eau qui infiltrée dans le sol est à nouveau évaporée dans l'atmosphère, de manière directe ou par le biais des plantes : l'évapotranspiration correspond à l'ensemble de ces pertes d'eau. La majeure partie de l'évaporation se produit à la surface du sol. Une partie de l'eau de pluie est à nouveau évaporée immédiatement, puisque l'atmosphère n'est pas remplie d'eau. L'eau de surface remonte des couches plus profondes lorsque l'eau s'écoule. Avec la portion d'eau retenue dans le sol, la quantité évaporée diminue. En effet, les forces de capillarité les empêchent de s'échapper et l'énergie requise pour extraction de l'eau est d'autant plus importante que le sol contient peu d'eau. Le potentiel de la matrice a été défini par les forces de capillarité qui s'exercent entre les grains et la pression superficielle du film d'eau autour d'eux. Ce potentiel peut être mesuré avec un tensiomètre. Selon la texture du sol et la taille des pores, ainsi que la quantité d'eau, la succion du sol varie. Il faut également noter que les conditions météorologiques jouent un rôle crucial[96].

Il est possible de mesurer la tension de succion du sol en unités de pression ou en hauteur d'eau. Les spécialistes de la pédologie utilisent souvent un symbole spécifique, le pF, qui correspond au logarithme de la pression négative P, donnée en centimètres d'eau[96].

$$pF = \log P \quad (4.73)$$

On appelle « tension de succion du sol » le potentiel matriciel engendré par les processus de capillarité ainsi que par l'absorption et l'adsorption de l'eau dans le sol. La loi de Jurin permet d'estimer la hauteur de montée capillaire de l'eau dans un tube[96].

$$h = \frac{2\gamma}{r d g} \quad (4.74)$$

Le terme h fait référence à la hauteur de l'eau à l'intérieur du tube, tandis que  $\gamma$  correspond à la tension superficielle du liquide, r représente le rayon du tube, d représente la densité du liquide et g représente l'accélération de la pesanteur.

### 4.4.3 Le bilan hydrique dans le sol

Le bilan hydrique est une approche simple permettant de surveiller l'évolution de la réserve d'eau utile du sol. Elle prend en considération les besoins en eau de la culture ainsi que les apports naturels provenant des précipitations ou de l'irrigation[97].

Les sols à nappes phréatiques peu profondes présentent un cycle de l'eau où des interactions complexes se produisent entre des processus hydrologiques et écologiques. Les éléments du

## Les modes de transfert et l'interaction atmosphère-sol

---

bilan hydrique, qui sont affectés par des variations journalières, peuvent être évalués plus précisément à l'aide de lysimètres souterrains. Toutefois, le seuil critique plus bas de ces lysimètres a un impact significatif sur la majorité des variables hydrologiques, surtout lorsqu'on tient compte d'échelles de temps courtes, d'où la nécessité de les définir aisément pour pouvoir mener des simulations réalistes.

En général, le bilan hydrique du sol est représenté par un système hydrologique classique [98].

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S \quad (4.75)$$

$\Delta S$ : La variation du stockage de l'eau.

P: La précipitation.

ETR: L'évapotranspiration réelle.

I : L'infiltration de l'eau.

R : Le ruissellement de l'eau.

### 4.5 Conclusion

La compréhension approfondie du transfert de chaleur à l'intérieur et à travers les matériaux contribue à améliorer l'efficacité énergétique et à développer les technologies de pointe.

Les relations complexes entre le sol et les conditions climatiques sont appelées interactions sol-atmosphère, un terme qui désigne des mécanismes tels que l'humidité, la température et le vent, ainsi que la composition du sol. L'équilibre des écosystèmes terrestres et la gestion de l'échange de carbone sont influencés par ces interactions, ce qui a un impact sur la biodiversité et la productivité agricole. Une meilleure compréhension de ces dynamiques permettra d'anticiper plus efficacement les conséquences du changement climatique et de développer des stratégies d'adaptation durables.

Les phénomènes naturels tels que l'infiltration des eaux de pluie, la distribution de l'eau dans les sols non saturés en profondeur ainsi que la réponse des sols peu profonds aux conditions atmosphériques ont des répercussions sur différents aspects de l'hydrologie, de l'écologie, de la géologie, et de l'agronomie. Sur le plan géotechnique, par exemple, l'infiltration des eaux de pluie risque d'entraîner la rupture des sols non saturés au niveau des zones superficielles. Ce phénomène est principalement dû à une diminution de la succion matricielle du sol ou du potentiel hydrique, qui est elle-même liée à une baisse de la résistance au cisaillement. Une surveillance des caractéristiques hydrauliques du sol est cruciale pour optimiser la fiabilité des prévisions d'instabilité.



**Chapitre 5**

**Modélisation et simulation numérique**



### 5.1 Introduction

L'objectif principal de ce travail de recherche est de quantifier et de valoriser l'énergie géothermique superficielle, tout en établissant les performances thermiques des échangeurs de chaleur peu profonds pour les besoins de chauffage et de rafraîchissement des bâtiments de la ville de Mostaganem. Dans ce contexte, nous avons examiné numériquement l'énergie exploitée du sous-sol par l'intermédiaire des échangeurs de chaleur géothermiques horizontaux installés à faible profondeur combinés à un système de pompe à chaleur dans un circuit fermé.

Dans ce cinquième chapitre, nous établissons un modèle numérique transitoire à trois dimensions qui repose sur la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Ce modèle numérique prend en compte le transfert d'humidité dans les sols non saturés et l'interaction entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur de chaleur, en incluant l'équation de bilan énergétique (rayonnement net, flux de chaleur sensible, le flux de chaleur latent et le flux de chaleur du sol) ainsi que le bilan hybride (basé principalement sur la précipitation). Les différentes conditions climatiques et hydrologiques (la température ambiante, les précipitations, vitesse du vent, l'ensoleillement, l'absence ou la présence du nuage et l'humidité relative) de la région de Mostaganem seront intégrées à ce modèle.

L'approche numérique prend en compte le couplage de trois paramètres indépendants : la succion dans un sol non saturé, la température du sol et les températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur.

### 5.2 Le modèle mathématique

#### 5.2.1 Description du modèle proposé

Le modèle proposé comprend les éléments suivants :

- ✓ Le transfert d'humidité dans les sols non saturés ;
- ✓ Les propriétés hydraulique et thermiques du sol ;
- ✓ Le transfert de chaleur dans les sols non saturés ;
- ✓ Le transfert de chaleur dans les échangeurs de chaleur.

Dans un premier temps, un modèle de bilan hydrique est simulé afin de prédire les variations de la succion et du contenu volumétrique en eau du sol en fonction de la profondeur et du temps, pour deux cas de sol : un sol argileux et un sol sableux. Ensuite, nous calculons les fluctuations temporelles des caractéristiques thermiques du sol en ajustant l'humidité du sol. Par la suite, on déduit la température du sol à la surface et à différentes profondeurs en utilisant l'interaction sol-atmosphère comme condition limite à la surface du sol, qui prend en

compte : le rayonnement net ( $R_n$ ) généré par les ondes courtes et longues qui se déplacent sur la surface du sol, le transfert de chaleur par convection entre la surface du sol et l'air environnant ( $H$ ), la chaleur latente ( $L.E$ ) et le flux de chaleur par le sol ( $G$ ). Enfin, le processus de transfert de chaleur dans les canalisations est étudié afin d'évaluer les performances des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux couplé à un système pompe à chaleur géothermique pour les besoins du chauffage ou du rafraîchissement d'un bâtiment situé à Mostaganem, en Algérie. La figure suivante illustre les différents processus de transfert de chaleur et de masse qui se produisent au niveau de la surface, à l'intérieur du sol et autour de l'échangeur de chaleur.

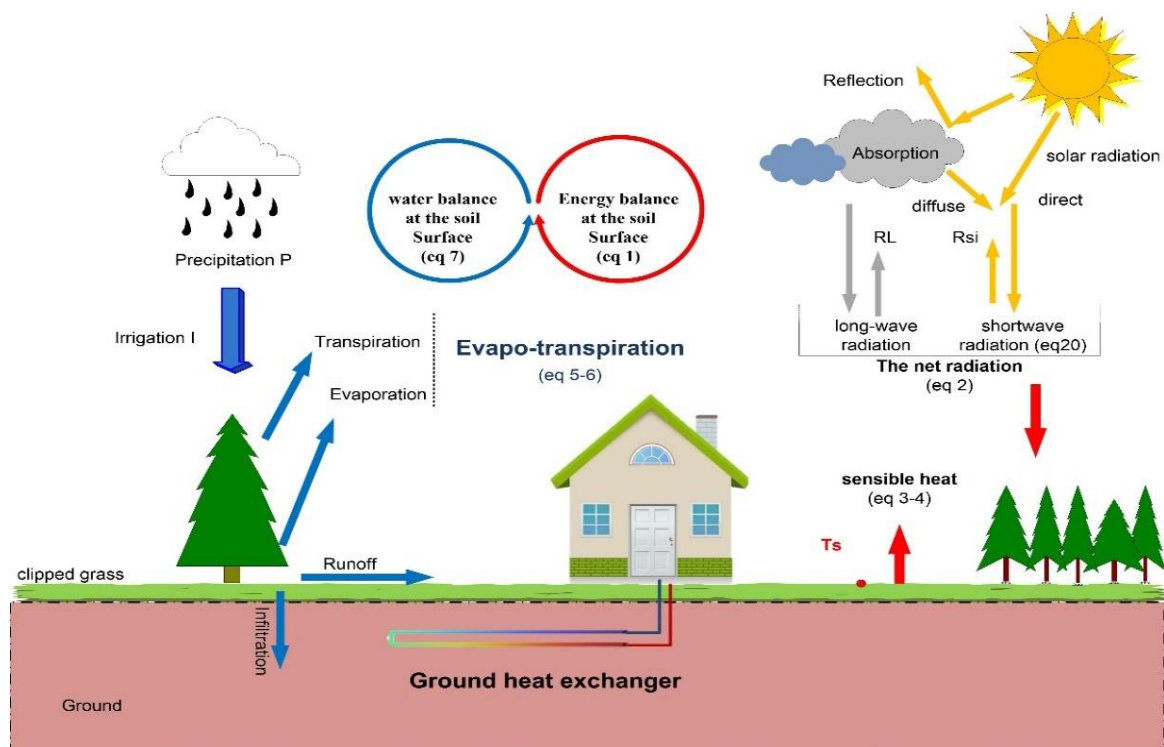


Figure 5. 1 : les différents processus de transfert de chaleur et de masse qui se produisent au niveau de la surface, à l'intérieur du sol et autour de l'échangeur de chaleur.

### 5.2.2 Équations fondamentales du modèle mathématique :

#### 5.2.2.1 Transfert d'humidité dans les sols non saturés

L'eau se déplace principalement dans le sol en fonction de la conductivité hydraulique  $K$  du matériau, cette dernière étant influencée par le contenu en eau. Il est facile de calculer le flux d'eau dans une zone saturée, puisque  $K$  reste une constante. En revanche, dans un environnement non saturé,  $K$  fluctue constamment en fonction des apports d'eau, ce qui rend

## Modélisation et simulation numérique

---

le flux très instable. Le niveau d'eau initial, les précipitations (fréquence et intensité) ont donc un impact direct sur le déplacement et la durée de séjour de l'eau dans le sol[99].

La formule de Richards décrit le mouvement de l'humidité dans les sols non saturés dans la zone située au-dessus de la nappe phréatique[100].

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot K(h) \nabla h - \frac{\partial K}{\partial z} = 0 \quad (5.1)$$

$h$  : La succion du sol

$K(h)$ : La conductivité hydraulique non saturée

$C(h)$ : La capacité spécifique d'humidité, déterminée par :

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad (5.2)$$

$\theta$ : La teneur en eau volumétrique.

La courbe de rétention d'eau du sol, ou approche de Van Genuchte, a été employée pour établir la relation entre la succion du sol  $h$  et la répartition de l'eau dans la zone non saturée au-dessus de la nappe phréatique.

Les formules suivantes sont utilisées pour calculer les propriétés hydrauliques du sol  $K(h)$  et  $\theta(h)$ , élaborées par Mualem et Genuchten [101], [102].

$$\begin{cases} \theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (ah^n)]^m} \\ K(h) = K_s S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \\ S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \end{cases} \quad (5.3)$$

$n$ ,  $m$ , et  $l$  : Les caractéristiques de la forme de la courbe caractéristique correspondant à l'eau du sol.

$\theta_s$ : La teneur en eau saturée, en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

$\theta_r$ : La rétention d'eau, en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

$h$  : La pression négative, en m.

$a$ : Le paramètre d'échelle inverse qui est proportionnel au diamètre moyen des pores,  $\text{cm}^{-1}$ .

$S_e$ : Degré de saturation.

$K_s$ : La conductivité hydraulique saturée.

$$m = 1 - 1/n \quad (5.5)$$

L'écoulement de l'eau dans les sols non saturés est décrit par la loi de Darcy [103].

$$v = - \frac{k(\theta)}{\mu} \nabla \psi \quad (5.6)$$

$v$ : La vitesse de Darcy (m/s), en m/s.

$k(\theta)$ : Le coefficient de perméabilité, variant en fonction de la fraction volumique de l'eau,

$\mu$ : La viscosité dynamique du fluide, en Pa.s.

$\nabla\psi$ : La variation du potentiel de l'eau entre deux points.

$$\nabla\psi = \psi_0 + \nabla\psi_g \quad (5.7)$$

$\nabla\psi_g$ : Le potentiel de gravité.

$\psi_0$ : Le potentiel capillaire.

### 5.2.2.2 Transfert de chaleur dans le sol

Le transfert de chaleur dans le sol est représenté par l'équation suivante :

$$\rho_s C_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T_s) + \nabla(\rho_w C_{pw} u_w T_s) + Q_s \quad (5.8)$$

$\rho_s$ : La masse volumique du sol, en kg/m<sup>3</sup>.

$C_{ps}$ : La capacité thermique du sol, en J/ (kg. K).

$\lambda$ : La conductivité thermique du sol, en W/(m.K).

$\rho_w$ : La masse volumique de l'eau, en kg/m<sup>3</sup>.

$C_{pw}$ : La capacité thermique spécifique de l'eau, en J/ (kg. K).

$u_w$ : La vitesse de l'eau, en m/s.

$Q_s$  : La source de chaleur du sol, en W/m<sup>3</sup>.

$T_s$ : La température du sol, en K.

#### 5.2.2.2.1 Propriétés thermiques du sol

Kersten (1949) a effectué des tests méthodologiques pour évaluer la conductivité thermique des sols. Il a fourni des formules empiriques pour deux types de sols (non gelés) : l'argile et le limon et le sable, en fonction de leur teneur en eau et de leur densité sèche[104].

- Pour les argiles et les limons :

$$\lambda = 0.1442 \times (0.9 \log \theta - 0.2) \times 10^{0.6243 \cdot \rho_d} \quad (5.9)$$

- Pour les sables :

$$\lambda = 0.1442 \times (0.7 \log \theta + 0.4) \times 10^{0.6243 \cdot \rho_d} \quad (5.10)$$

La capacité thermique volumétrique du sol est prédite par l'équation suivante [105] :

$$C_v = \rho_s \cdot C_{ps} \quad (5.11)$$

$C_{ps}$ : La chaleur spécifique du sol déterminée par :

$$C_{ps} = (C_s + \theta C_w) / (1 + \theta) \quad (5.12)$$

## Modélisation et simulation numérique

---

$C_s$ : La chaleur spécifique des particules sec du sol, en  $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ .

$C_w$ : La chaleur spécifique de l'eau du sol, en  $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ .

### 5.2.2.3 Transfert de chaleur dans les conduites

La modélisation de l'écoulement des fluides et du transfert de chaleur à l'intérieur du l'échangeur de chaleur souterrain est réalisée en utilisant l'équation de conservation d'énergie suivante :

$$A \rho_f C_{Pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} + A \rho_f C_{Pf} u_f \cdot \nabla T_f = \nabla \cdot A k_f \nabla T_f + f_D \frac{\rho_f A}{2d_h} |u_f| u_f^2 + Q_{wall} \quad (5.13)$$

$A$  : La section transversale interne de la conduite, en  $m^2$ .

$\rho_f$ : La densité du fluide, en  $kg/m^3$ .

$C_{Pf}$ : La capacité thermique spécifique du fluide, en  $J/(kg.K)$ .

$T_f$ : La température du fluide, en  $K$ .

$u_f$ : La vitesse d'écoulement du fluide, en  $m/s$ .

$k_f$ : La conductivité thermique du fluide, en  $W/(m.K)$ .

$f_D$ : Le coefficient de perte de charge.

$d_h$ : Le diamètre hydraulique, en  $m$ .

$Q_{wall}$ : L'énergie du milieu environnant, en  $W/m$ .

On peut illustrer le transfert de chaleur entre les tubes de l'échangeur de chaleur et l'environnement environnant de la manière suivante [106]:

$$Q_{wall} = h_{eff} \cdot Z (T_{ext} - T_f) \quad (5.14)$$

$h_{eff}$ : Le coefficient équivalent de transfert de chaleur par convection du film, en  $W/(m^2.K)$ .

$Z$  : Le périmètre intérieur de la conduite, en  $m$ .

$T_{ext}$ : La température extérieure de la zone entourant la conduite, en  $K$ .

On peut établir le coefficient équivalent de transfert de chaleur par convection en utilisant la formule ci-dessous.

$$h_{eff} = \frac{2\pi}{1/r_i h_i + \ln(r_0/r_i)/k_p} \quad (5.15)$$

$r_0$ : Le rayon extérieur du tuyau

$r_i$ : Le rayon intérieur du tuyau

$k_p$ : La conductivité thermique du tuyau, en  $W/(m.K)$ .

$h_i$ : Le coefficient de convection, en  $(W/m^2.K)$ .

Le coefficient de convection ( $h_j$ ) est correspondant au nombre de Nusselt,  $Nu$  :

- Pour les conditions laminaires et transitoires,  $Nu = 3,66$  ( $Re < 2000$ ).
- En conditions turbulentes,  $Nu$  peut être déterminé à l'aide de la formule suivante de la corrélation de Gnielinski ( $Re > 2000$ ).

$$Nu = \frac{f_D(Re - 1000)Pr}{8 + 101.6(f_D/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (5.16)$$

$Re$ : Le nombre de Reynolds.

$f_D$ : Le coefficient de perte de charge.

$Pr$ : Le nombre de Prandtl, déterminé par :

$$Pr = \frac{C_{pf} \mu}{\lambda_f} \quad (5.17)$$

$\mu$  : La viscosité dynamique du fluide, en  $N.s.m^{-2}$ .

$\lambda_f$  : La conductivité thermique du fluide, en  $W/(m.K)$ .

$C_{pf}$  : La capacité thermique spécifique du fluide  $J/(kg. K)$ .

### 5.3 Vérification et validation du modèle numérique

La validation du modèle mathématique et numérique nécessite une vérification avant toute simulation. À cette fin, nous avons utilisé l'étude expérimentale de Yoon [107] ainsi que le modèle numérique de Hang Zou [108] afin de vérifier l'exactitude de notre modèle.

#### 5.3.1 Validation du modèle numérique

Une étude expérimentale menée par Yoon [107] a permis de valider et d'assurer la fiabilité du modèle développé. Yoon [107] a étudié le taux de transfert de chaleur d'un échangeur de chaleur horizontal GHE de type U en polybutylène, d'une longueur de 8 mètres, installé dans une boîte en acier de  $5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  le centre des GHE a été positionné à une profondeur de 50 cm, avec un diamètre interne de 16 mm et un diamètre externe de 20 mm. Le fluide caloporteur utilisé dans cette expérience est l'eau.

La boîte en acier contenait du sable sec commercial "Joomunjin". Le Joomunjin désigne un sable coréen à gros grains normalisé qui a été employé lors de l'essai. Yoon [107] a utilisé la technique de drainage du sable, consistant à déplacer une couche de sable presque homogène dans le caisson en acier. La méthode du fil chaud transitoire a été utilisée pour évaluer les caractéristiques thermiques du sable, dont les valeurs ont été ajustées selon la densité unitaire et le taux de vide contenus dans le caisson en acier. Yoon a procédé à des tests de réponse

## Modélisation et simulation numérique

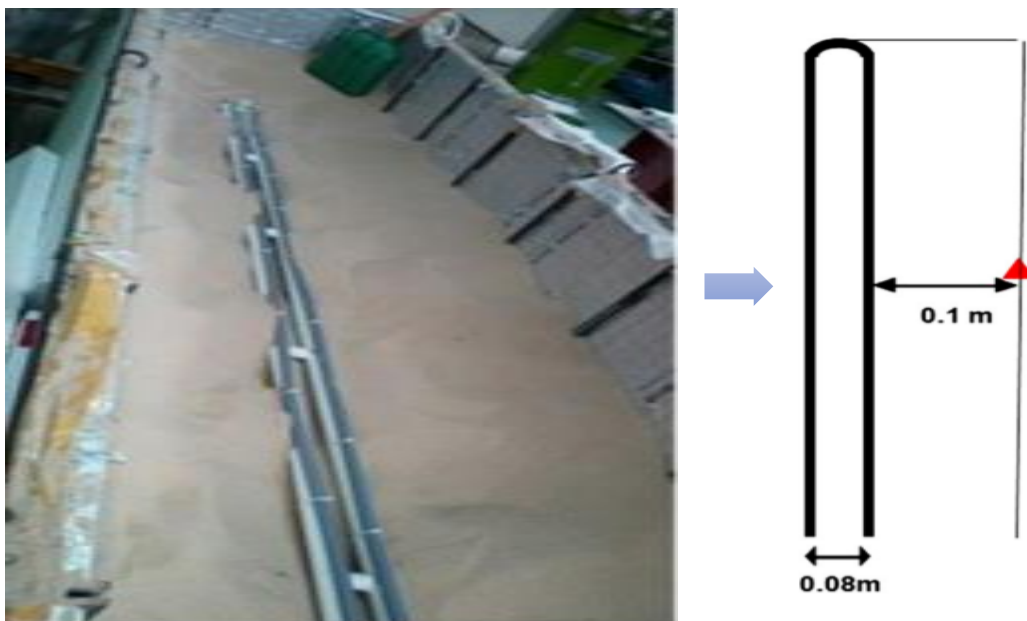
thermique (TRT) pendant une période de 30 heures. La température d'entrée a été maintenue constante, tandis que la température de départ du sable était de 17 à 18 °C.

Les différentes propriétés physiques et thermiques du sol utilisé par Yoon sont répertoriées dans le tableau suivant.

**Tableau 5. 1 : Les différentes propriétés physiques et thermiques du sol utilisé dans l'étude expérimental de Yoon.**

Paramètre	Valeur
Poids volumique à sec maximale	16.17 kN/m <sup>3</sup>
Poids volumique à sec minimale	13.49 kN/m <sup>3</sup>
Coefficient d'uniformité	2.06
Coefficient de courbure	1.05
Poids spécifique	2.65
Teneur en eau	0 %
Conductivité thermique	0.26 W/(m.K)
Capacité thermique spécifique	785 J/(kg.K)
Diffusivité thermique	2.57.10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s

La figure suivante donne un aperçu de l'essai expérimental de Yoon pour un échangeur de chaleur horizontal en forme de U.



**Figure 5. 2 : Essai expérimental de Yoon pour un échangeur de chaleur horizontal en forme de U [107]**

### Les limites de l'étude expérimentale de Yoon

- ✓ L'interaction entre l'atmosphère et le sol n'est pas prise en considération dans l'étude expérimentale de Yoon, bien que les échangeurs de chaleur soient installés à faible profondeur, étant donné que le sol à faible profondeur est plus sensible aux fluctuations atmosphériques.
- ✓ Le transfert d'humidité dans le sol n'est pas pris en considération lors de l'étude expérimentale de Yoon, bien que ce soit un paramètre important susceptible d'affecter les performances des systèmes qui sont en contact avec le sol.

La figure 5.3 représente la fluctuation de la température du fluide le long de l'échangeur de chaleur souterrain en fonction du temps. Cette variation a été obtenue à partir de l'étude expérimentale de Yoon et de notre modèle numérique.

En comparant les résultats de ce modèle avec ceux de l'expérience de Yoon, on constate que le modèle numérique permet d'estimer la température de sortie de l'eau avec une valeur RMSE de 1,2 °C. Cela suggère que les résultats obtenus par le modèle informatisé correspondent étroitement à l'expérience de Yoon.

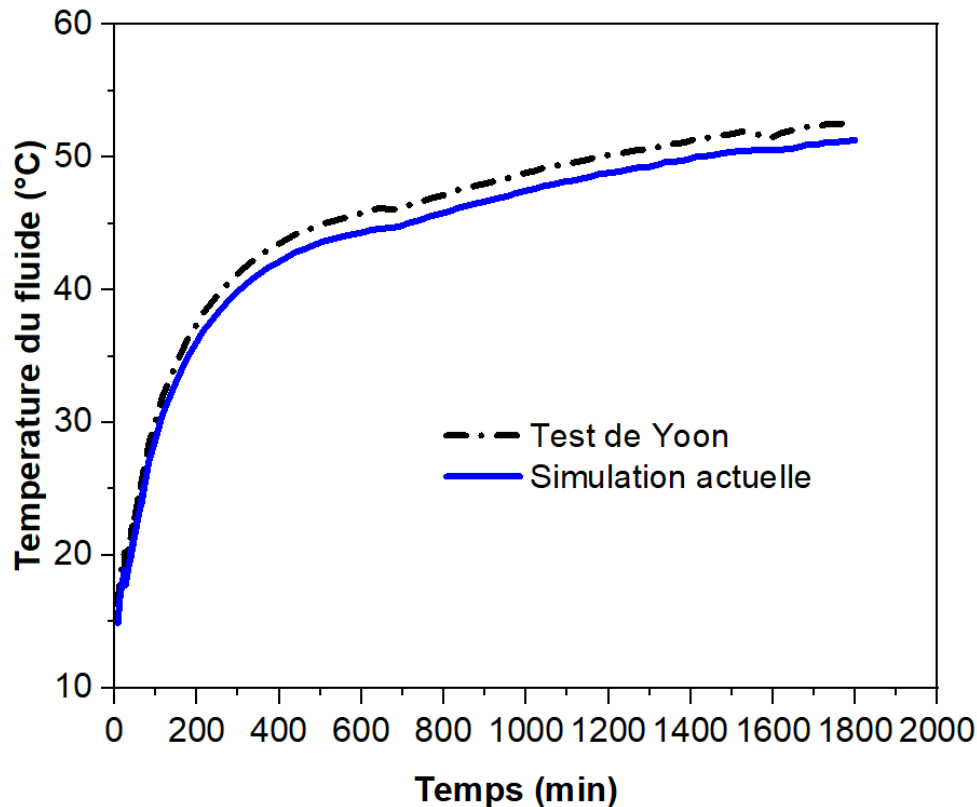


Figure 5. 3 : Température du fluide de sortie, calculée par le modèle numérique proposé et rapportée par l'expérience de Yoon [107].

### 5.3.2 Vérification du modèle numérique

Notre modèle numérique a été vérifié à l'aide du modèle numérique de Hang Zou [108]. Hang Zou a élaboré un modèle de transfert de chaleur en 3D permettant de simuler les performances d'une source linéaire du divers type d'échangeurs de chaleur souterrains horizontaux HGHE (spirale, slinky et linéaire). Le tableau 5.2 présente les différents paramètres géométriques et thermiques utilisés dans ce modèle numérique. Le sol est considéré comme un limon non saturé, les HGHE sont enfouis à 2 mètres de profondeur et la nappe phréatique se situe à 6 mètres de profondeur. Dans le modèle, la limite supérieure est fixée à une température de surface constante de 20 °C, sans évacuation d'eau. Concernant le fond, les limites à distance sont fixées à la même valeur que la température initiale de 15 °C.

Une tranchée horizontale de 2 m de large, 2 m de profondeur et 30 m de long est utilisée pour installer les échangeurs de chaleur. Elle correspond à la surface effective disponible pour l'installation des échangeurs de chaleur. Les différents types d'échangeurs de chaleur sont étudiés en fonction de cette même surface disponible pour leur disposition.

Tableau 5. 2 : les paramètres du modèle de vérification de Hang Zou.

## Modélisation et simulation numérique

Paramètres	Valeur
Diamètre intérieur des HGHE	20 mm
Rayon des HGHE en Spirale et Slinky	0.5 m
Longueur axiale des spirales	30 m
Distance au centre des Spirales et Slinky	0.4 m
Coefficient de conductivité thermique de la paroi	$0.5 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Température d'entrée du fluide de travail	35 °C

Le tableau suivant énumère les paramètres du modèle de van Genuchten utilisés dans cette étude afin de construire la courbe de rétention d'eau.

**Tableau 5. 3 : Les caractéristiques hydraulique du sol du modèle de vérification de Hang Zou.**

Paramètre	Valeur
Teneur en eau résiduelle, $\theta_r$	0.052
Teneur en eau saturée, $\theta_s$	0.434
Paramètre de forme, $n$	1.232
Paramètre d'échelle, $a$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	0.058

### Les limites du modèle numérique de Hang Zou

- ✓ À l'inverse de l'étude expérimentale de Yoon, Hang Zoo a pris en considération le transfert d'humidité dans le sol non saturé. Cependant, l'effet de l'interaction entre l'atmosphère et le sol n'a pas été pris en compte, bien que les différents types d'échangeurs de chaleur soient enterrés à seulement 2 mètres sous la surface du sol.

Les figures 5.4 et 5.5 présentent les températures de sortie du fluide et le coefficient de performance pour les divers types d'échangeurs de chaleur souterrains horizontaux calculés à l'aide du modèle numérique proposé et rapportés par Hang Zou.

L'analyse des résultats obtenus par notre modèle et le modèle de Hang Zou [108] révèle que notre modèle numérique est capable de prédire la température de sortie de l'eau avec une valeur RMSE de 0.17 °C. En effet, les résultats obtenus par notre modèle numérique de transfert de chaleur sont en agrément avec les résultats de Hang Zhou [108], ce que montrent les figures 5.4 et 5.5.

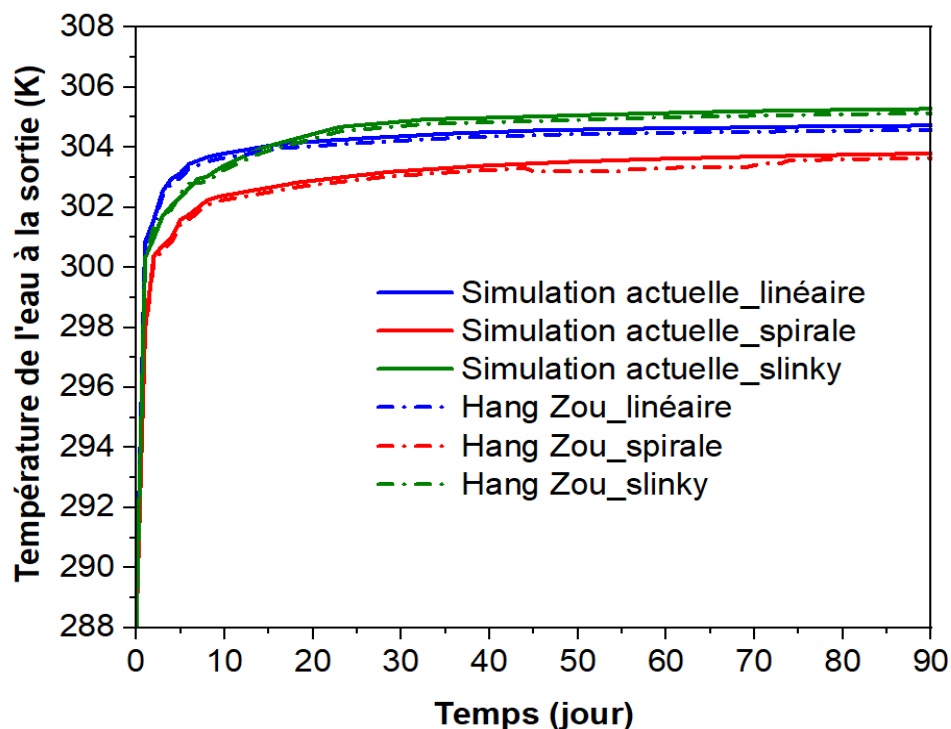


Figure 5. 4 : La température du fluide de sortie pour différents types d'échangeurs de chaleur calculée par le modèle numérique proposé et rapportée par Hang Zou [108].

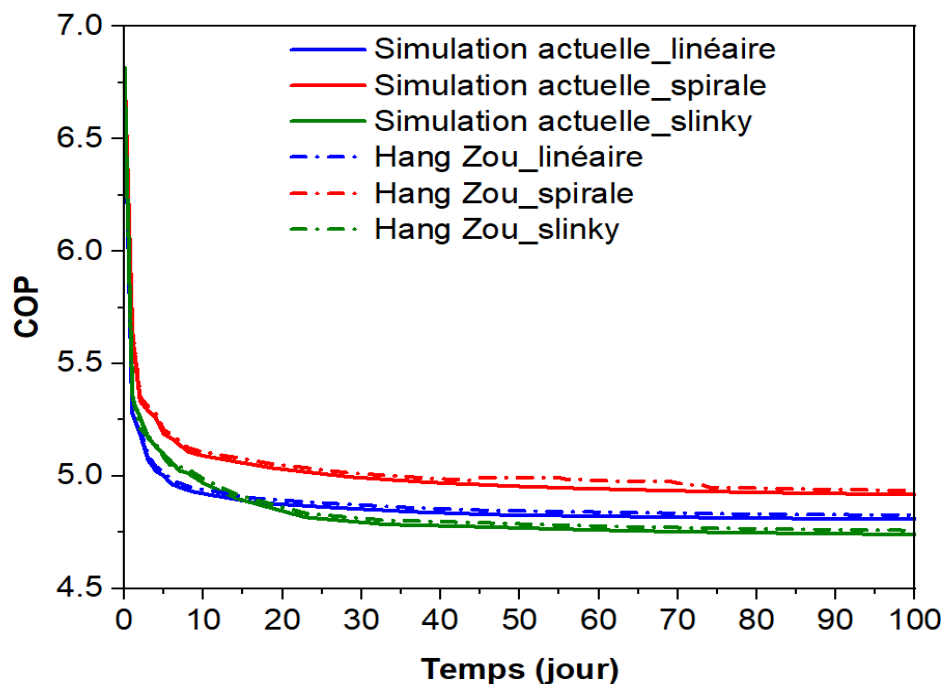


Figure 5. 5 : Le coefficient de performance pour les différents types d'échangeurs de chaleur obtenus à l'aide du modèle numérique proposé et rapporté par Hang Zou [108].

### 5.4 Description de la région de l'étude

#### 5.4.1 Situation géographique

Mostaganem est une ville côtière située au nord-ouest de l'Algérie. Elle se trouve à l'est de Chlef, au sud-est de Relizane, à l'est d'Oran et au sud-ouest de Mascara. Elle s'étend sur environ 2 269 km<sup>2</sup> et un littoral d'environ 120 km.

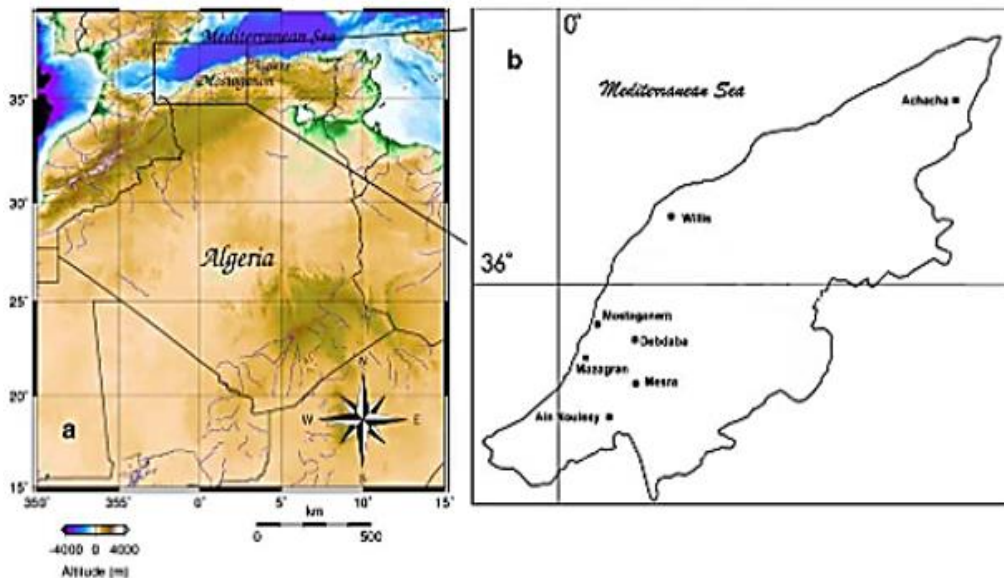


Figure 5. 6 : Localisation de la Mostaganem en Algérie[109].

Les coordonnées géographiques de la région sont : latitude 35°55'52" Nord, longitude 0°05'21" Est à une altitude de 85 m[110], ce qui est indiqué dans la figure 5.6. Le climat y est semi-aride, agréable en hiver et légèrement humide au-dessus de 500 mètres d'altitude[109].

#### 5.4.2 Conditions climatiques

Les conditions météorologiques sont considérées comme douces et modérées à Mostaganem.

Il est classé de type "Csa" par Köppen-Geiger[111].

##### ▪ La température moyenne enregistrée à Mostaganem (2000-2023) :

La période chaude se déroule sur une période de 2,9 mois, entre le 21 juin et le 17 septembre, durant laquelle la température moyenne quotidienne maximale dépasse 28 °C. Durant l'année, c'est en août que Mostaganem enregistre les températures les plus élevées, À titre d'exemple, en 2023 atteignant une température moyenne maximale de 31 °C et minimale de 22 °C.

La période fraîche s'étend sur 4,0 mois, allant du 21 novembre au 23 mars, et la température moyenne journalière est en dessous de 18 °C. Le mois de janvier est le mois le plus frais de

l'année 2023, enregistrant une température moyenne de 8 °C et une température maximale de 15 °C[112].

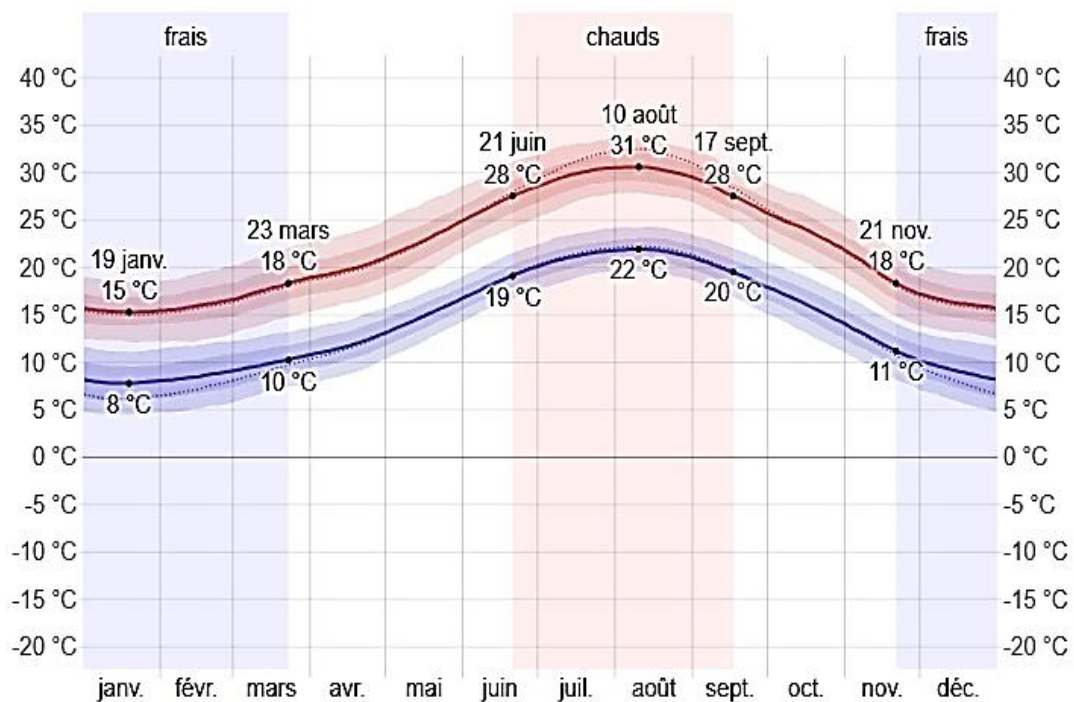


Figure 5. 7 : La température moyenne enregistrée à Mostaganem[112].

### ▪ Précipitations enregistrées mensuellement à Mostaganem :

On parle d'un jour pluvieux lorsque la quantité de précipitations liquides ou équivalentes est d'au moins 0,04 pouce. La prévalence des précipitations à Mostaganem présente des fluctuations tout au long de l'année. La période de pluie s'étend sur 7,8 mois, soit du 25 septembre au 19 mai, durant lesquels il pleut avec une probabilité de plus de 12 % chacun de ces jours. Le mois de novembre est le plus pluvieux, affichant une moyenne de 6,1 jours [112].

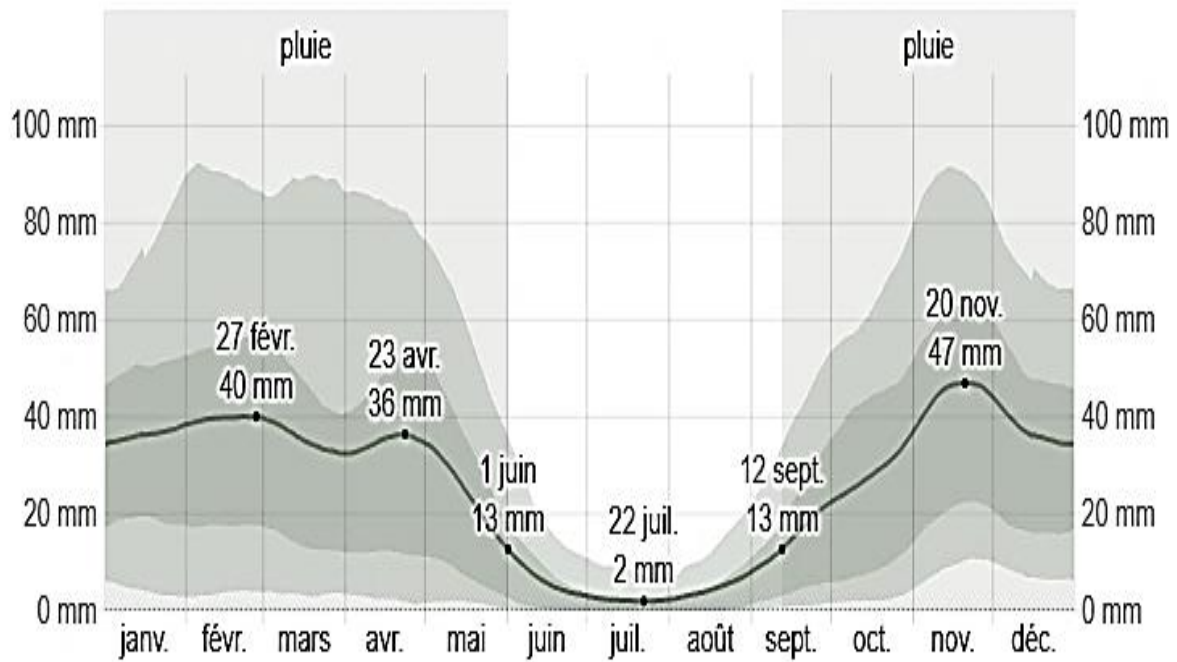


Figure 5. 8 : Pluviométrie mensuelle moyenne enregistrée à Mostaganem[112].

### ▪ L'humidité à Mostaganem

Le point de rosée est essentiel pour déterminer le niveau de confort hygrométrique, puisqu'il indique si la transpiration va s'évaporer et refroidir le corps. Plus le point de rosée est bas, plus la sensation est sèche. Inversement, plus le point de rosée est élevé, plus la sensation est humide. La variation saisonnière de l'humidité ressentie à Mostaganem est extrême. La durée de la période la plus humide de l'année s'étend sur 4,0 mois (année 2023), allant du 12 juin au 11 octobre. Le confort est lourd, étouffant ou désagréable pendant au moins 16 % du temps durant cette période. Le mois le plus humide à Mostaganem est août, qui compte en moyenne 18,7 jours humides ou plus. Le 11 février est le jour le moins humide dans l'année, avec des conditions presque inhabituellement sèches[112].

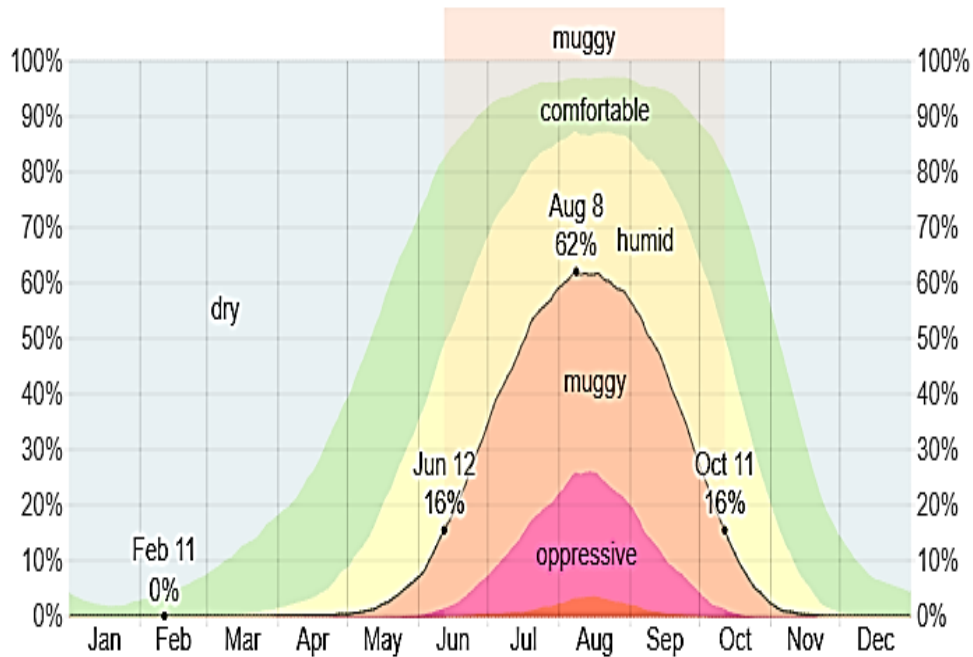


Figure 5. 9 : Représentation du pourcentage d'humidité en fonction du point de rosée, classé par niveaux de confort[112].

### ▪ Vitesse moyenne du vent à Mostaganem

La vitesse et la direction instantanées du vent à un endroit donné sont très influencées par la topographie locale et d'autres facteurs, et ils diffèrent fortement des moyennes horaires.

La moyenne horaire du vent à Mostaganem varie légèrement selon les saisons tout au long de l'année. Le plus fort vent de l'année 2023 s'étend sur une période de 6,5 mois, du 3 novembre au 19 mai, en présence des vitesses de vent moyennes dépassant 15,6 km/h. Le mois de février enregistre les vitesses moyennes de vent les plus élevées à Mostaganem, avec 17,4 km/h. Le mois de février enregistre les vitesses moyennes de vent les plus élevées à Mostaganem, avec 17,4 km/h. Le temps le plus calme s'étend sur une période de 5,5 mois, du 19 mai au 3 novembre. Août est le mois le plus calme de l'année à Mostaganem, avec une vitesse moyenne du vent de 13,8 km/h[112].

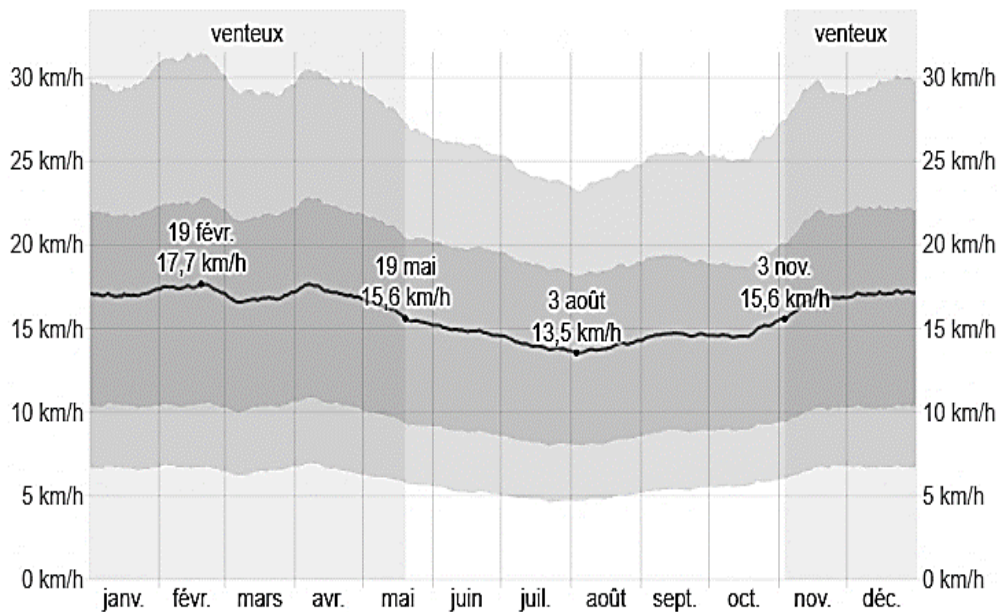


Figure 5. 10 : Les vitesses horaires moyennes du vent à Mostaganem[112].

### ▪ La couverture nuageuse à Mostaganem

Le taux moyen de nuages dans le ciel de Mostaganem varie considérablement selon les saisons tout au long de l'année. La saison la plus lumineuse de Mostaganem débute autour du 13 juin et s'étend sur 2,6 mois, jusqu'au 1<sup>er</sup> septembre. Le mois de juillet est le plus clair de l'année à Mostaganem, affichant un ciel globalement clair, ou partiellement nuageux pendant 90 % du temps. La saison la plus nuageuse débute le 1<sup>er</sup> septembre et s'étend sur 9,4 mois, jusqu'au 13 juin. Le mois d'octobre est le plus nuageux de l'année à Mostaganem, avec 42 % du temps couvert ou en majorité nuageux en moyenne[112].

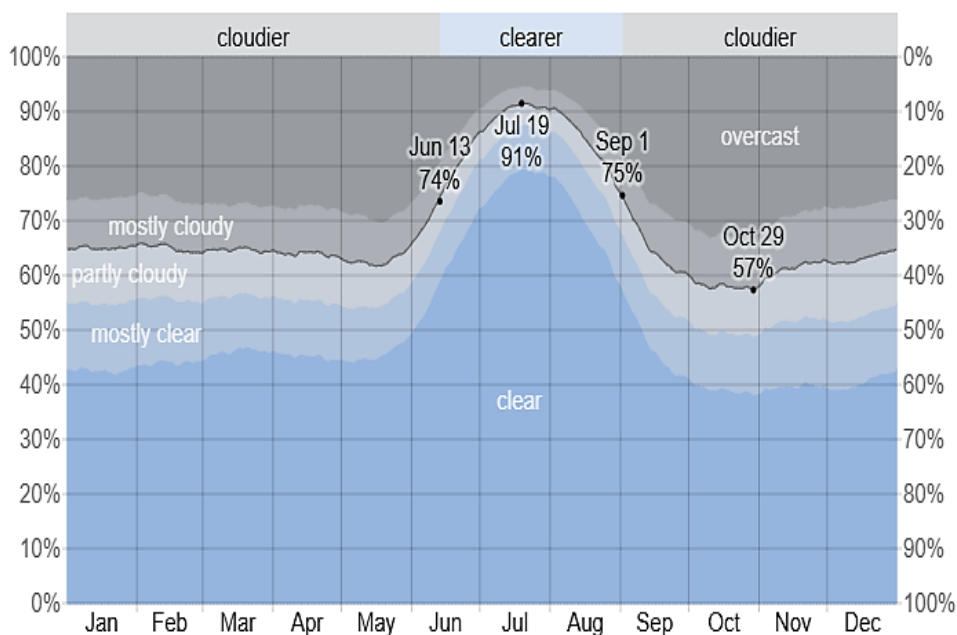


Figure 5. 11 : La répartition de la couverture nuageuse en fonction du pourcentage de ciel nuageux[112].

### 5.5 La modélisation numérique

#### 5.5.1 Description du logiciel solveur

##### 5.5.1.1 Présentation du logiciel Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics est un logiciel commercial conçu pour l'analyse en éléments finis. Offrant la possibilité de modéliser et de simuler une multitude d'applications dans le domaine de la physique et de l'ingénierie, il se distingue par sa capacité à prendre en charge les phénomènes couplés ou multiphysiques. Ce programme dispose d'une interface comprenant divers éléments, comme la création de géométrie, la sélection des matériaux, le maillage, le post-traitement, les modèles physiques et le solveur. Il peut fonctionner sur divers systèmes d'exploitation, comme Windows, Linux et Mac.

Les équations aux dérivées partielles sont habituellement utilisées pour illustrer mathématiquement les phénomènes relatifs aux lois de la physique dans le cadre de problématiques liées à l'espace et au temps. En effet, le logiciel Comsol Multiphysics utilise la méthode des éléments finis pour résoudre ces équations. Cette méthode de calcul est une méthode numérique qui consiste à séparer le champ d'étude en un réseau d'éléments distincts, dans l'objectif de résoudre les problèmes relatifs aux valeurs limites de ces équations. Elle met en œuvre plusieurs techniques permettant de réduire les erreurs liées et de générer des solutions constamment plus stables. Cette technique d'analyse numérique est adaptée lorsqu'il s'agit d'utiliser des modèles mathématiques complexes dans des situations géométriques compliquées[113].

##### 5.5.1.2 Les phases de la création d'un calcul :

Pour réaliser une modélisation numérique au moyen du logiciel Comsol Multiphysics, il faut successivement effectuer trois étapes principales : le pré-traitement, puis la résolution des équations, et enfin le post-traitement. La sélection de la géométrie du domaine de calcul est donc un pas crucial dans l'élaboration d'un modèle. Selon les dimensions du domaine, cette géométrie peut se décomposer en 1D, 2D et 3D. Après avoir finalisé la création de la structure géométrique, nous identifions les caractéristiques des matériaux du domaine, soit en se basant sur une grande variété de caractéristiques des matériaux présents dans la bibliothèque Comsol, soit en optant pour un matériau inexploré. Par la suite, on détermine les éléments physiques du système examiné en incorporant la physique fondamentale ou la multi-physique au modèle analysé. Chaque modèle physique dans le logiciel comporte déjà des formules d'équations mathématiques et d'éléments finis, qui sont incorporées au système analysé en fonction du choix de la discipline physique. Après avoir sélectionné la physique du modèle, on détermine

les conditions aux limites des sous-domaines et des frontières du domaine, ainsi que les points qui les relient. De plus, on peut déterminer le degré de discrétisation requis pour l'équation matricielle régissant le modèle. Par la suite, si le modèle analysé comporte des couplages multiphysiques, cette interface peut être incorporée depuis l'interface composante du modèle qui contient l'équation de couplage entre les multiples physiques. La phase finale du pré-traitement d'un modèle consiste à créer le maillage destiné à résoudre les équations physiques sélectionnées par le procédé des éléments finis. Le choix du type de maillage est basé sur les dimensions géométriques. Dans le domaine de la géométrie 2D, on distingue deux catégories d'éléments : les triangles et les rectangles. En géométrie 3D, le maillage se compose de divers éléments tels que tétraédrique, hexaédrique, pyramidal et prismatique. Le maillage se compose de plusieurs cellules. Plus ces cellules sont petites, et le problème est résolu plus précisément. Le second stade du pré-traitement consiste à résoudre toutes les équations algébriques à l'aide de solveurs numériques stationnaires ou temporels. Les solutions de ces équations sont alors obtenues aux nœuds du modèle. Lorsque la solution de la physique atteint son état d'équilibre, le solveur du calcul se termine. La phase post-traitement débute alors pour examiner les résultats des équations algébriques à l'aide d'instruments de suivi et d'exportation d'informations. Par conséquent, les méthodes de calcul utilisant la méthode des éléments finis dans Comsol Multiphysics se présentent comme un processus mathématique, chaque étape est connectée à la prochaine[113].

### 5.5.2 Description du modèle numérique

Dans le cadre de la simulation des problèmes transitoires d'extraction de chaleur conjuguée en 3D d'un échangeur de chaleur horizontal linéaire couplé à un système de pompe à chaleur géothermique, le solveur « COMSOL Multiphysics » dérivé du temps a été utilisé dans le but de résoudre les équations différentielles partielles couplées qui ont été développées précédemment dans ce document. Ce solveur repose sur la méthode des éléments finis avec des multiplicateurs de Lagrange. L'approche utilisée pour définir les équations a consisté à élaborer des modèles constitutifs pour les conditions initiales et limites.

La géométrie de l'étude présente un domaine 3D contenant un sol non saturé, a une longueur de 40 m, une largeur de 20 m et une hauteur de 20 m. Une excavation horizontale de 5 m de large, 4 m de profondeur et 32 m de longueur destinée à accueillir les échangeurs de chaleur est réalisée. L'ensemble des processus et opérations calculées dans cette simulation est récapitulé dans le diagramme 5.12.

## Modélisation et simulation numérique

---

Pour simuler les échangeurs de chaleur souterrains, nous avons considéré le transfert de dans le tuyau qui comprend sa couche de paroi, son film interne et le fluide incompressible transporté.

Le modèle numérique développé permet de prédire en temps réel les températures du sol à la surface et à différent profondeur, les températures des fluides à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur, ainsi que le coefficient de performance (COP) de la pompe à chaleur et le taux d'échange de chaleur avec l'environnement dans le mode de chauffage et de rafraîchissement.

Les différentes études réalisées dans le cadre de ce projet de recherche sont répertoriées comme suit :

- Dans un premier temps, nous avons installé un échangeur horizontal linéaire en polyéthylène à haute densité, enterré à 2 m de profondeur, afin de tester l'impact de la négligence des interactions atmosphériques lors de l'application des sols peu profonds. Deux recherches ont donc été menées : la première ne prend pas en compte l'interaction entre l'atmosphère et le sol, la seconde la prend en compte.
- Après avoir mis en évidence l'importance de la pris en compte de l'interaction atmosphérique et le transfert d'humidité dans le sol, une analyse approfondie de la géométrie des échangeurs de chaleur a été réalisée, portant sur deux types d'échangeurs horizontaux : linéaire et spirale. Il sera tenu compte de l'influence de la longueur, du rayon de l'échangeur de chaleur et le Profondeur d'installation.
- Nous étudions finalement l'impact de la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur sur la performance énergétique des échangeurs de chaleur.

## Modélisation et simulation numérique

La figure suivante illustre l'ensemble des processus, de la méthode de calcul et des opérations simulés dans le cadre de cette étude.

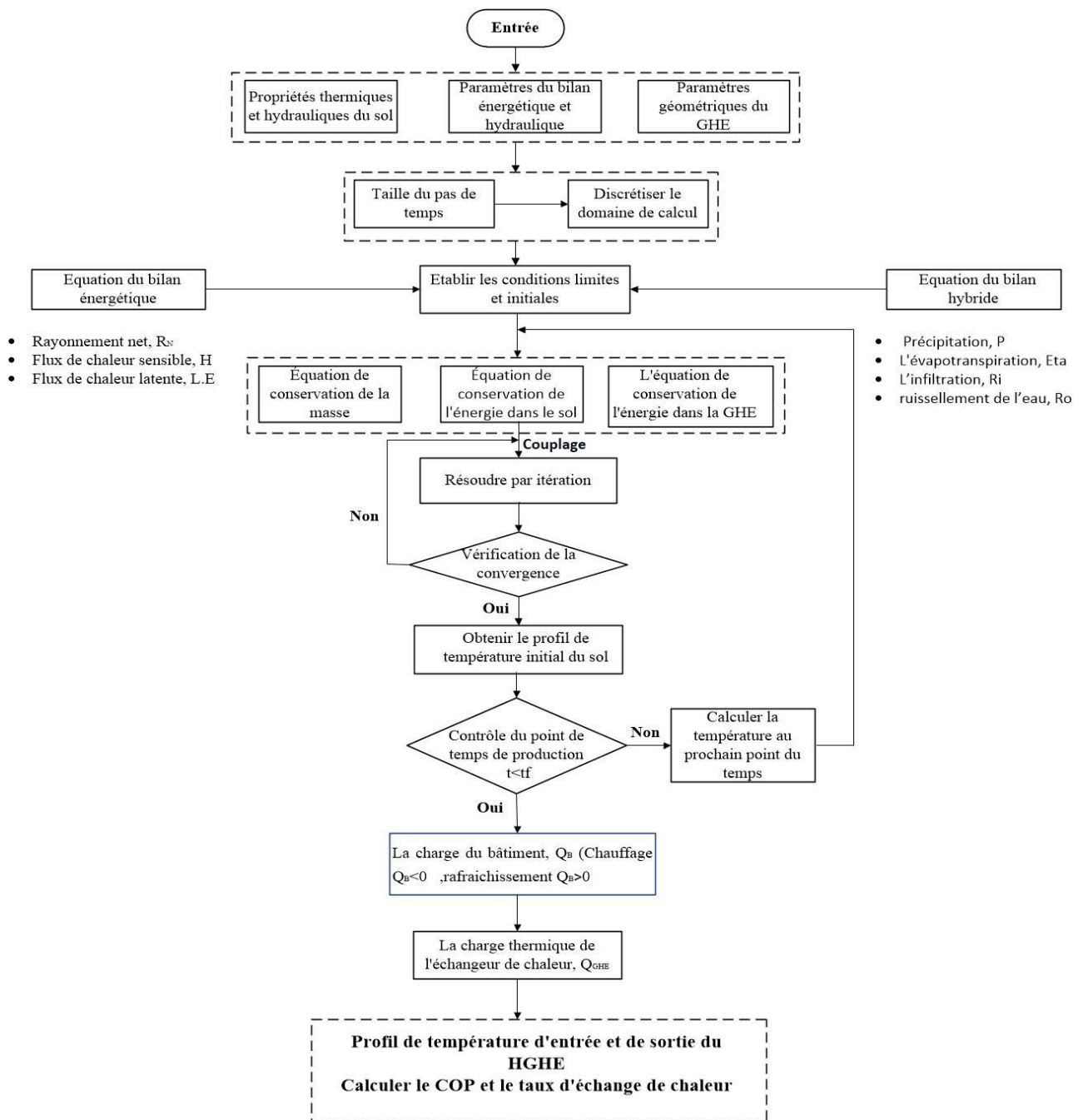


Figure 5. 12 : Diagramme d'organisation de tous les processus et opérations simulés dans cette étude.

### 5.5.3 Le maillage par élément finis

Étant donné que les sols à faible profondeur sont plus vulnérables aux variations atmosphériques et hydrothermiques, cette simulation génère deux types de mailles : des mailles extra-fines sont érigées au niveau des échangeurs de chaleur et du sol environnant (sol d'excavation) dans le but de détecter avec une grande précision les fluctuations de la température dans la zone proche de la surface du sol, et des mailles denses pour le reste du domaine. Le maillage tétraédrique libre a été sélectionné pour cette tâche. Le nombre total d'éléments est de 119110 pour la configuration en spirale et 25883 pour l'échangeur de chaleur linéaire.

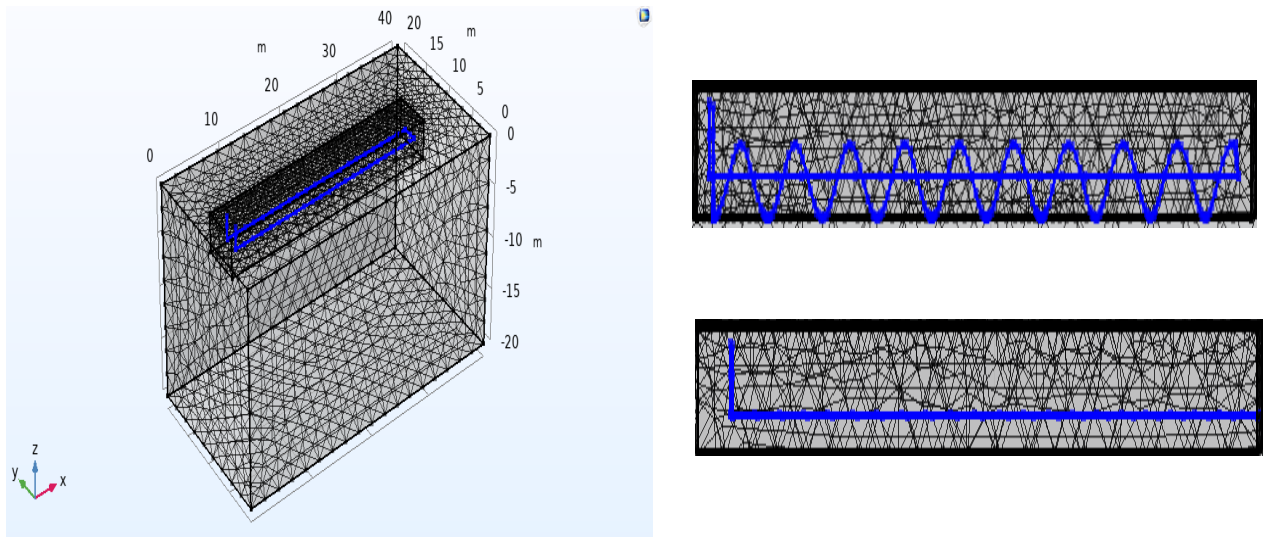


Figure 5. 13 : Domaine géométrie et maillage par élément finit.

### 5.5.4 Les conditions initiales et limites du modèle numérique

On suppose que les conditions initiales du sol et de l'échangeur de chaleur sont constantes, avec une température de 16 °C. Cette simulation numérique est limitée par deux conditions.

#### 5.5.4.1 Les conditions aux limites du sol

Du fait de la faible profondeur des échangeurs de chaleur géothermiques horizontaux, la frontière de la surface du sol associée à l'échange de chaleur et d'humidité entre le sol et l'atmosphère doit être prise en compte. Par conséquent, nous avons supposé un bilan énergétique et hydrique au niveau de la surface du sol, exprimé par les équations 4.36 et 4.76, respectivement. Nous établirons deux cas d'étude sur les conditions limites (la négligence et la prise en compte de l'interaction atmosphérique), que nous détaillerons dans le chapitre suivant.

### 5.5.4.2 Les conditions limites des tuyaux (échangeurs de chaleur)

La pompe à chaleur et l'échangeur de chaleur souterrain sont associés en prenant en considération les températures d'entrée et de sortie du fluide. Les températures d'entrée et de sortie du fluide ont été combinées en fonction de la charge thermique de l'échangeur de chaleur souterrain,  $Q_{GHE}$ . La température du fluide d'entrée  $T_{i,f}$  et la température du fluide de sortie  $T_{o,f}$  sont alors liées de la manière suivante[114].

$$T_{i,f}(t) = \begin{cases} T_{o,f} - \frac{Q_{GHE}(t)}{\rho_f C_{pf} V} & \text{Chauffage} \\ T_{o,f} + \frac{Q_{GHE}(t)}{\rho_f C_{pf} V} & \text{rafraichissement} \end{cases} \quad (5.18)$$

$$T_{i,f}(t) = \begin{cases} T_{o,f} - \frac{Q_{GHE}(t)}{\rho_f C_{pf} V} & \text{Chauffage} \\ T_{o,f} + \frac{Q_{GHE}(t)}{\rho_f C_{pf} V} & \text{rafraichissement} \end{cases} \quad (5.19)$$

$Q_{GHE}(t)$  : La charge thermique de l'échangeur de chaleur.

$\rho_f$  : La densité du fluide.

$C_{pf}$  : La capacité thermique spécifique du fluide.

$V$  : Le taux de circulation volumétrique du fluide de travail.

$$Q_{GHE}(t) = \begin{cases} Q_{GHE}^{\text{Chauffage}} = Q_{\text{Building}} \left(1 - \frac{1}{COP_{\text{chauf}}}\right) \\ Q_{GHE}^{\text{Rafraichi}} = Q_{\text{Building}} \left(1 + \frac{1}{COP_{\text{rafraichi}}}\right) \end{cases} \quad (5.20)$$

$$Q_{GHE}(t) = \begin{cases} Q_{GHE}^{\text{Chauffage}} = Q_{\text{Building}} \left(1 - \frac{1}{COP_{\text{chauf}}}\right) \\ Q_{GHE}^{\text{Rafraichi}} = Q_{\text{Building}} \left(1 + \frac{1}{COP_{\text{rafraichi}}}\right) \end{cases} \quad (5.21)$$

$Q_{\text{Building}}$  : La charge du bâtiment.

$COP$  : Le coefficient de performance de la pompe à chaleur.

## 5.6 Conclusion :

Les performances thermiques des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux installés dans une zone située au nord-ouest de l'Algérie (Mostaganem) sont examinées dans cette étude. Un modèle transitoire numérique en 3D basé sur la méthode des éléments finis a été créé à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. Le modèle développé évalue tout d'abord l'impact de l'interaction entre le sol et l'atmosphère, en prenant en compte l'ensemble des conditions climatiques et géologiques de la région. Il examine ensuite le couplage entre le transfert hydraulique et thermique dans un sol non saturé. Enfin, l'interaction entre le sol et l'échangeur de chaleur est évaluée afin de déterminer les performances des pompes à chaleur géothermiques horizontales. Les principaux résultats obtenus sont détaillés dans le chapitre suivant.



**Chapitre 6      Analyse et interprétation des résultats**



### 6.1 Introduction

Ce chapitre expose en détail les principales découvertes issues de la modélisation mathématique et numérique précédemment développée. La première section examine tout d'abord le bilan hydrologique et énergétique de la surface du sol, en se concentrant sur la ville de Mostaganem. La seconde partie consiste à mettre en évidence le couplage entre les caractéristiques hydrauliques et thermiques dans un sol non saturé, afin d'estimer la température réelle de la surface du sol et à diverses profondeurs. Enfin, la dernière section examine l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur horizontaux. Plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la performance énergétique du système sont analysés, comme l'impact de la négligence sur l'interaction atmosphérique, la configuration des conduites (linéaire ou spirale), la profondeur d'installation, le rayon interne et la longueur axiale, ainsi que la vitesse d'écoulement du fluide caloporteur, afin d'optimiser les performances de système.

### 6.2 Le bilan énergétique et hydrologique de la surface du sol

#### 6.2.1 Evaluation du bilan hydrologique à Mostaganem

L'analyse du bilan hydrologique offre la possibilité d'apprécier la distribution des volumes d'eau entre diverses composantes du cycle hydrique dans un bassin versant (infiltration, écoulement et évaporation), au cours d'une période d'observation adéquatement étendue (au minimum 25ans). Dans cette section, nous allons résoudre la formule classique du bilan hydrologique présentée au chapitre 4, dont les différentes composantes seront évaluées séparément.

Les tableaux 6.1 et 6.2 répertorient les températures et les précipitations moyennes mensuelles, respectivement, pour une période s'étendant de 1987 à 2023 (36 ans)[115].

**Tableau 6. 1 : les températures moyennes mensuelles à Mostaganem de 1987 à 2023 [115].**

Moyenne	Jan.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>T<sub>moy</sub></b> (°C)	11.2	12	13.9	16	19.1	23	26.2	26.6	23.7	20.2	15.3	12.7

**Tableau 6. 2 : les précipitations moyennes mensuelles à Mostaganem de 1987 à 2023 [115].**

Moyenne	Jan.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Pluie</b> (mm)	51.7	70	44.4	33.9	75	4	1.5	3.7	18.5	35.8	61	57.2

## Analyse et interprétation des résultats

### 6.2.1.1 Evapotranspiration

Il s'agit d'un critère crucial pour le calcul du bilan hydrologique. Néanmoins, son estimation demeure complexe puisqu'elle comprend plusieurs processus, comme l'évaporation directe et la transpiration des végétaux. L'évapotranspiration est principalement influencée par la température, l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, le vent ou encore la pression atmosphérique. L'évapotranspiration se compose de deux éléments : l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR).

#### 6.2.1.1.1 L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Il s'agit de la quantité d'eau qui pourrait être évaporée par une surface aquatique libre ou un revêtement végétal, sans que l'approvisionnement en eau ne soit pas un obstacle. L'estimation de l'ETP est réalisée à l'aide d'une approche qui ne prend en compte que la température. Cette méthode est appelée « méthode de Thornthwaite », peut s'écrire comme suit[116] :

$$ETP_c = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^a K \quad (6.1)$$

ETP<sub>c</sub> : Evapotranspiration potentielle ajustée en millimètres,

T : Moyenne de la température du mois en (°C),

K : Le coefficient de correction est lié à la position géographique de la station hydroclimatique,

I : Indicateur thermique annuel,  $I = \sum_i^{12} i$

$$i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1.514} \quad (6.2)$$

$$a = 6.75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7.71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1.79 \cdot 10^{-2} I + 0.49239 \quad (6.3)$$

Les résultats obtenus grâce à la méthode de Thornthwaite sont synthétisés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 6. 3 : L'évapotranspiration potentielle corrigée calculée par la méthode de Thornthwaite.**

Mois	Jan.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Annuel
Pluie (mm)	51.7	70	44.4	33.9	75	4	1.5	3.7	18.5	35.8	61	57.2	456.7
T <sub>moy</sub> (°C)	11.2	12	13.9	16	19.1	23	26.2	26.6	23.7	20.2	15.3	12.7	18.3
i	3.39	3.76	4.70	5.76	7.61	10.08	12.20	12.56	10.54	8.28	5.38	4.10	<b>88.38</b>
K	0.87	0.86	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84	/
<b>ETP<sub>c</sub> (mm)</b>	<b>112.8</b>	<b>77.8</b>	<b>39.6</b>	<b>27.2</b>	<b>22</b>	<b>24.9</b>	<b>39.8</b>	<b>55.3</b>	<b>87</b>	<b>126</b>	<b>163.9</b>	<b>159.1</b>	<b>935.4</b>

## Analyse et interprétation des résultats

---

### 6.2.1.1.2 L'évapotranspiration réelle

Il s'agit du volume d'eau réellement évaporé provenant des surfaces aquatiques et souterraines, puis transpiré par les plantes, pour une zone spécifique et une durée déterminée. Des formules empiriques telles que la formule de Turc ou la méthode du bilan simplifié de Thornthwaite sont également utilisées pour réaliser ces estimations.

#### a) La formule de Turc

On peut déterminer l'évapotranspiration réelle en utilisant la formule de Turc, qui se présente comme suit[117] :

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (6.4)$$

ETR : Évapotranspiration réelle mesurée en millimètres,

P : Moyenne annuelle de la précipitation, en millimètres,

L : Capacité d'évaporation.

$$L = 300 + 25 T + 0.05 T^3 \quad (6.5)$$

T : Moyenne annuelle de la température en (C°).

Par application numérique, on obtient :

$$T = 18.3 \text{ °C} \quad P = 456.7 \text{ mm} \quad L = 1063.92 \quad ETR = 438.6 \text{ mm}$$

Selon Turc, l'ETR annuel est de 440.9 mm.

#### b) La méthode du Coutagne

L'expression de Coutagne est donnée par la formule suivante[118] :

$$ETR = P - \lambda T^2 \quad (6.6)$$

Une condition est requise pour son utilisation. Formulée comme suit :

$$\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda} \quad (6.7)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.145 T} \quad (6.8)$$

T : c'est la température moyenne annuelle, en °C.

L'utilisation de ces formules, basées sur une précipitation moyenne de 456.7mm et une température moyenne de 18.3 °C, a conduit aux résultats ci-dessous :

$$0.4316 < 0.4567 < 1.7265$$

Il est observé que la condition prévue de la formule de Coutagne a été respectée et que l'ETR annuel atteint 362.7 mm.

## Analyse et interprétation des résultats

### c) La méthode du bilan simplifié de Thornthwaite

Cette technique consiste à établir initialement une ETP mensuelle qui est ensuite liée à la capacité d'évaporation de l'atmosphère sur le bassin concerné. On considère que le sol est saturé lorsque sa réserve disponible « RFU » atteint 100 mm, un seuil généralement situé entre 50 mm et 200 mm[117].

- 1) Si  $P \geq ETP$ , on établit que  $ETR = ETP$ , le surplus des précipitations sur ETR est stocké dans l'humidité du sol, ce qui accroît les réserves jusqu'à sa saturation et le reste se dissipe.
- 2) Si  $P \leq ETP$ , ETR fait appel à toutes les réserves de sol jusqu'à atteindre la valeur de l'ETP.
  - Si  $P + RFU > ETP$ ,  $ETR = ETP$
  - Si  $P + RFU \leq ETP$ ,  $ETR = P + RFU$
- 3) Si  $P = ETR$ , Après l'épuisement de la réserve d'humidité du sol, l'ETR se transforme en proportion des précipitations, ce qui conduit à un déficit dans le bilan.

Le tableau ci-dessous illustre le bilan hydrologique moyen calculé selon la méthode de Thornthwaite pour la ville de Mostaganem (1987-2023).

**Tableau 6. 4 : Le bilan hydrologique moyenne de la ville de Mostaganem établi selon la méthode de Thornthwaite (1987-2023).**

Mois	Sep	oct	Nov	Des	Jan.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout.	Annuel
Pluie (mm)	18.5	35.8	61	57.2	51.7	70	44.4	33.9	75	4	1.5	3.7	456.7
ETPc (mm)	112.8	77.8	39.6	27.2	22	24.9	39.8	55.3	87	126	163.9	159.1	935.4
P-ETPc (mm)	-94.3	-42	21.4	30	29.7	45.1	4.6	-21.4	-12	-122	-	-155.4	/
<b>ETR (mm)</b>	<b>18.5</b>	<b>35.8</b>	<b>39.96</b>	<b>27.2</b>	<b>22</b>	<b>24.9</b>	<b>39.8</b>	<b>55.3</b>	<b>87</b>	<b>4</b>	<b>1.5</b>	<b>3.7</b>	<b>359.66</b>
RFU (mm)	0	0	21.04	51.04	80.74	100	100	87.6	66.6	0	0	0	/
Excédent	0	0	0	0	0	25.84	4.6	0	0	0	0	0	30.4
Déficit	94.3	42	0	0	0	0	0	21.4	12	122	162.4	155.4	609.5

## Analyse et interprétation des résultats

L'examen du tableau précédent du bilan hydrologique révèle que l'ETP est plus important de mai à septembre, atteignant un pic de 163,9 mm en juillet. Une reconstitution du stock est observée dès le mois de novembre, marquée par une hausse de la RFU. Elle s'établit à son niveau le plus élevé entre février et mars, puis diminue à partir du mois d'avril, indiquant ainsi une réduction du stock.

Le tableau du bilan énergétique de Thornthwaite met en évidence les observations ci-dessous :

- Dans la zone d'étude, l'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son seuil le plus élevé en juillet, enregistrant 163,9 mm, tandis qu'elle est la plus faible au mois de janvier où elle s'établit à 24 mm.
- S'il y a suffisamment de réserve d'eau facilement exploitable (RFU), un excès d'eau se produit, provoquant ainsi le phénomène de ruissellement. Lorsque la RFU commence à baisser, le stock est effectivement épuisé et sa valeur atteint 0, provoquant ainsi un déficit agricole qui persistera depuis le début du avril de mai jusqu'à la fin de Janvier. Ce qui signifie qu'il y a un grave déficit d'eau dans la ville de Mostaganem (609,5 mm au total), en raison des changements climatiques survenus ces dernières années.

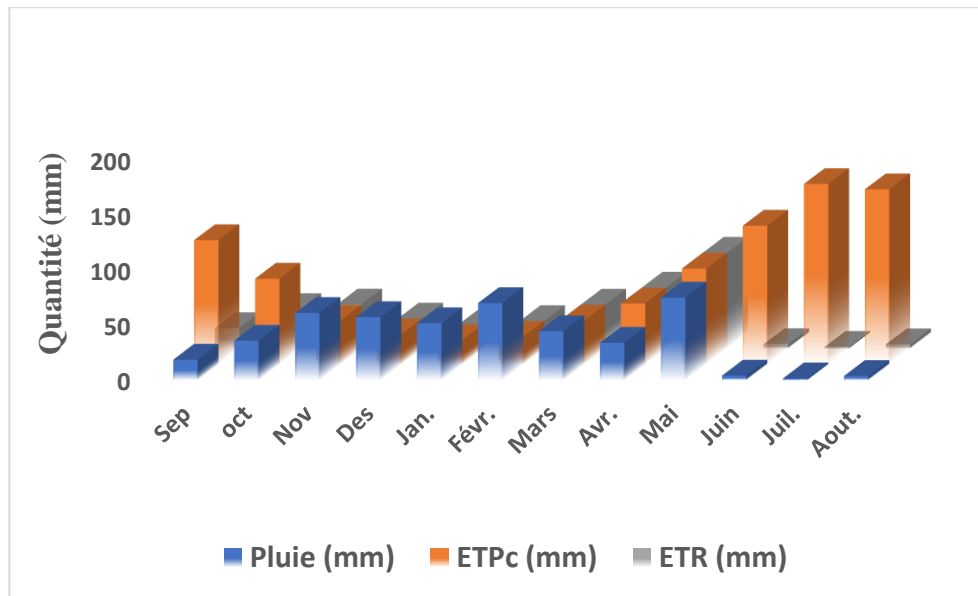


Figure 6. 1 : L'évaporation et l'évapotranspiration obtenus par la méthode de Thornthwaite.

Puisque la formule de Turc donne une valeur extrêmement haute, l'ETR choisie pour le calcul du bilan hydrologique est la moyenne des résultats obtenus grâce aux formules de Coutagne et Thornthwaite.

## Analyse et interprétation des résultats

Tableau 6. 5 : L'évaporation réelle moyenne à Mostaganem.

Méthode	Turc	Coutagne	Thornthwaite
ETR (mm)	438.6	362.7	359.7
La moyenne	/	361.2	

### 6.2.1.2 Ruissellement d'eau

Le ruissellement désigne la quantité d'eau qui, pendant une saison pluvieuse, échappe au processus d'infiltration et d'évapotranspiration. Pour calculer cette lame d'eau ruisselée, la formule suivante de Tixeront-Berkaloff sera utilisée [119] :

$$\begin{cases} R = \frac{P^3}{3ETP_c^2} & \text{si } P < 600\text{mm} \\ R = \frac{P^3}{3} & \text{si } P > 600\text{mm} \end{cases} \quad (6.9)$$

P : La précipitation moyenne annuelle, en millimètres,

ETP<sub>c</sub> : L'évapotranspiration potentielle, en millimètres,

R : Ruissellement annuel, en millimètres.

En appliquant la première formule, comme les précipitations annuelles à Mostaganem sont inférieures à 600 mm, on trouve : R = 36.3 mm

### 6.2.1.3 La lame d'eau infiltrée

Il est particulièrement complexe d'établir ce paramètre lorsque l'on ne dispose pas de mesures directes par le biais d'un lysimètre. On a déterminé la valeur de l'infiltration en se basant sur l'équation du bilan hydrologique [98] :

$$P = ETR + R + I \pm \Delta S \quad (6.10)$$

Pour une durée d'observation suffisamment étendue, la fluctuation de la réserve «  $\Delta S$  » est quasi nulle.

Donc :

$$I = P - (ETR + R) \quad (6.11)$$

On obtient alors : I = 64.7 mm

L'évaluation du bilan hydrologique, fondée sur les données climatiques et géologiques de la ville de Mostaganem, fournit des informations détaillées sur ses composantes : précipitations, infiltration, évapotranspiration réelle et ruissellement. Toutes ces données ont été utilisées dans notre simulation numérique. Tableau 2 Récapitulatif des résultats du bilan hydrologique établi pour la ville de Mostaganem.

## Analyse et interprétation des résultats

Tableau 6. 6 : Récapitulatif des résultats du bilan hydrologique établi pour la ville de Mostaganem.

	Précipitations	Évapotranspiration	Infiltration	Ruissellement
<b>Terminologie en mm</b>	456.7	361.2	64.7	36.3
<b>Terminologie en %</b>	100	79.09	14.2	7.9

L'analyse du bilan hydrologique a montré que plus de 79.01 % des précipitations sont renvoyées à l'atmosphère par évapotranspiration, que ce soit depuis les surfaces d'eau libre, les végétaux ou le sol. Les précipitations restantes tombent en surface dans le réseau hydrographique et provoquent l'infiltration de 14.2 % dans la nappe.

### 6.2.2 Bilan énergétique

#### 6.2.2.1 L'équation de la température ambiante et le rayonnement à courte longueur d'onde dans la région d'étude (Mostaganem)

D'après les figures 6.2 et 6.3, l'analyse des tendances sinusoïdales observées sur le temps  $t$  permet de conclure que les températures moyennes journalière de l'air  $T_a$  et les radiations d'ondes courtes  $R_s$  varient de manière cyclique. Les relations suivantes peuvent ainsi être établies pour les corrélations des températures ambiantes du site et les radiations d'ondes courtes :

$$T_a = 20 + 6.68 \times \sin \left( \pi \times \frac{(365 \times 24 \times 3600).t - 128.75}{182.36} \right) \quad (6.12)$$

$$R_s = 196.48 + 91.78 \times \sin \left( \pi \times \frac{(365 \times 24 \times 3600).t - 73.70}{195.09} \right) \quad (6.13)$$

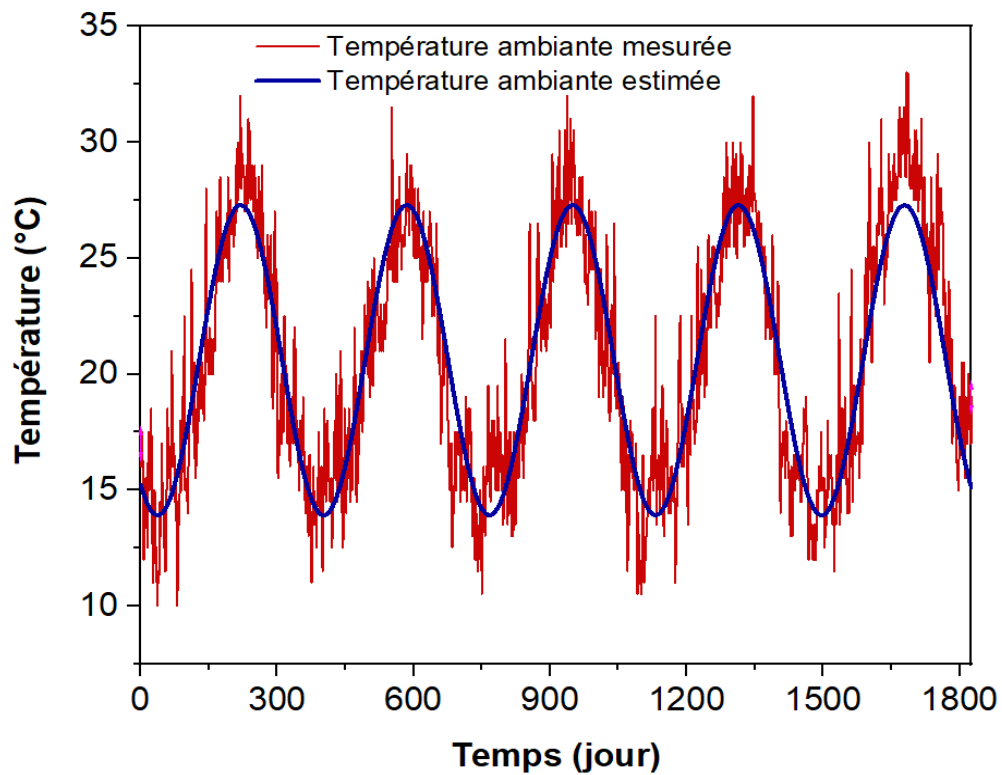


Figure 6. 2 : Température ambiante dans la région de Mostaganem (2019-2023).

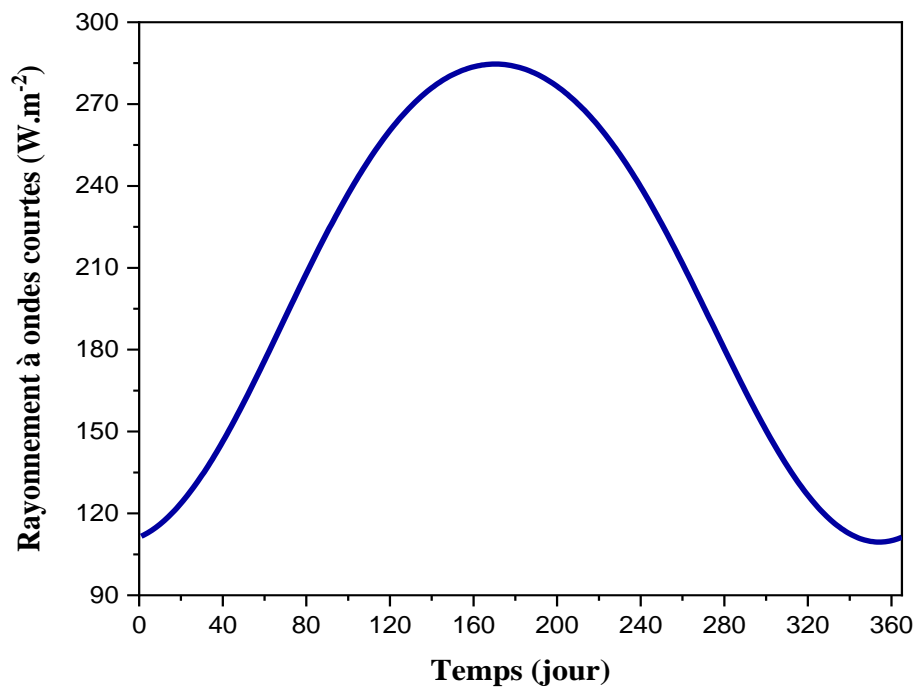


Figure 6. 3 : Le rayonnement à courte longueur d'onde à Mostaganem en 2023.

## Analyse et interprétation des résultats

### 6.2.2.2 Evaluation du bilan énergétique à la surface du sol

Afin de représenter les variations annuelles et quotidiennes de la température du sol et le flux de chaleur du sol, nous avons utilisé l'équation 4.36 du bilan d'énergie présentée dans le chapitre 4. Cette formule prend en compte le transfert d'énergie convective entre l'air et la terre, l'absorption du rayonnement solaire par la surface du sol, ainsi que la chaleur latente engendré par le phénomène d'évaporation superficielle. Paramètres utilisés pour évaluer le bilan énergétique de la surface du sol sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 6. 7 : Paramètres utilisés pour évaluer le bilan énergétique de la surface du sol.

Paramètre	Description	Valeur
$\alpha$	Albedo de la surface	0.2 [-]
$\varepsilon_a$	Emissivité de l'air	0.66 [-]
$\varepsilon_0$	Emissivité de la surface	0.97 [-]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman	$5.67 \times 10^{-8}$ [W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup> ]
Z	L'altitude	85 [m]
$\rho$	La densité de l'air	1.25 [kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	La capacité thermique spécifique de l'air	1003[J/kg/K]
$h_c$	La hauteur de la végétation	0.05 [m]
$z_m$	Hauteur des mesures de vent	2 [m]
$z_h$	Hauteur de la mesure de l'humidité	2 [m]
k	Constante de von Karman	0.41 [-]
$U_z$	Vitesse du vent à la hauteur z	2.5[m/s]
$\lambda$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	2.6 [kJ/kg]

La figure 6.4 met en évidence le flux de chaleur sensible et latente à Mostaganem en 2023, qui sont strictement influencés par les précipitations, la vitesse du vent et l'humidité. Montrant les valeurs les plus élevées de flux de chaleur sensible ont été observées à la fin de la saison humide, avec 130 W/m<sup>2</sup>, et commencent à diminuer à la fin de la saison sèche, en raison des températures ambiantes et du sol plus élevées durant cette période.

La fluctuation du flux de chaleur latente est lente et atteint son maximum au début du mois de février, puis diminue jusqu'à la fin du mois de mars. On observe la même tendance du mois d'août au mois de décembre.

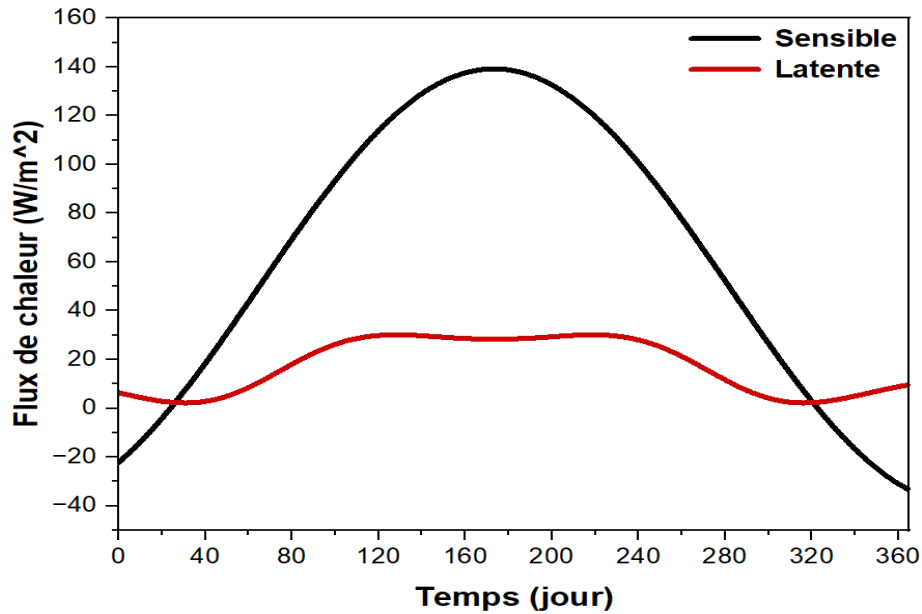


Figure 6. 4 : Le flux de chaleur sensible et latente à Mostaganem en 2023.

La figure 6.5 illustre le rayonnement net et le flux de chaleur du sol à Mostaganem en 2023.

Des niveaux de rayonnement nets importants sont constatés durant la période estivale (de juin à septembre), atteignant un pic de  $120 \text{ W/m}^2$ . Au cours de cette période, le climat est sain, caractérisé par des journées longues, une forte insolation et un albédo superficiel relativement bas, ce qui explique les niveaux de rayonnement élevés observés. On note cependant que la période hivernale est marquée par une diminution importante du rayonnement net par rapport à la saison sèche, avec un minimum de  $25 \text{ W/m}^2$ . Les fluctuations observées durant la saison des pluies (d'octobre à décembre) s'expliquent par la présence de nuages.

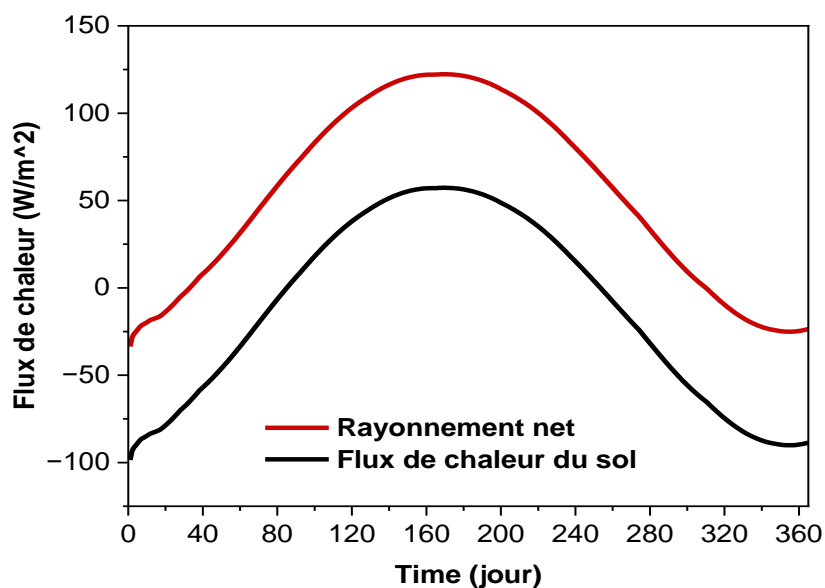


Figure 6. 5 : Le rayonnement net et le flux de chaleur du sol à Mostaganem en 2023.

### 6.3 Le profil de la température du sol

Cette partie analyse le couplage hydrothermique des caractéristiques du sol pour identifier les fluctuations réelles de la température du sol en surface et sous diverses profondeurs, tout en examinant l'impact de la nature du sol sur le transfert thermique et le stockage d'énergie. Les caractéristiques hydrothermiques du sol (argile) sont exposées dans le tableau ci-dessous, en considérant également l'interaction entre l'atmosphère et le sol.

Dans cette recherche, les propriétés thermiques et hydrauliques du sol dépendent de la profondeur et du temps. Ces caractéristiques sont dérivées des équations (5.3), (5.9) et (5.12), et les paramètres correspondants sont énumérés dans le tableau 6.8.

Tableau 6. 8 : Les caractéristiques hydrothermiques du sol étudié.

Matériau	k [m/s]	$\theta_r$	$\theta_s$	a[1/m]	l	n	$\rho_d$	$C_s$ [J/(kg.K)]	$\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Argile	8.68E-6	0.102	0	3.35	0.5	2	1.2	1100	1500

#### 6.3.1 Les propriétés hygrothermiques du sol

##### a) Les courbes de rétention d'eau

La courbe de rétention d'eau est une caractéristique cruciale pour l'analyse et la mise en œuvre des sols. La figure 6.6 montre la courbe caractéristique reliant la teneur en eau à la pression ( $\theta(h)$ ) pour un sol argileux non saturé. La figure montre que la pression hydraulique d'un sol non saturé, qui varie entre -24 000 Pa et -12 000 Pa dans le cadre de la présente étude, augmente avec la teneur en eau, fluctuant entre 0,145 et 0,215.

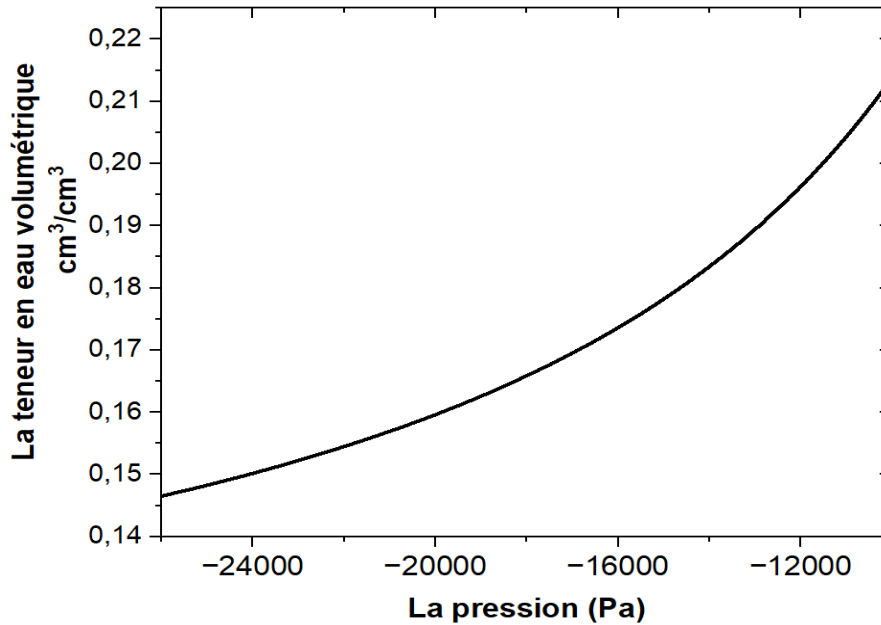


Figure 6. 6 : Courbes caractéristiques reliant la teneur en eau à la pression pour un sol argileux

Le profil vertical de la conductivité hydraulique dans la zone examinée est illustré dans la figure 6.7. Dans la zone proche de la surface, le coefficient de conductivité hydraulique atteint  $0,51 \text{ E}^{-6} \text{ m/s}$ . Ce gradient augmente à mesure que l'on s'éloigne de la surface du sol jusqu'à une profondeur de 8 mètres, où il demeure relativement constant à  $8,86\text{E}^{-6} \text{ m/s}$ , correspond à la conductivité hydraulique saturée.

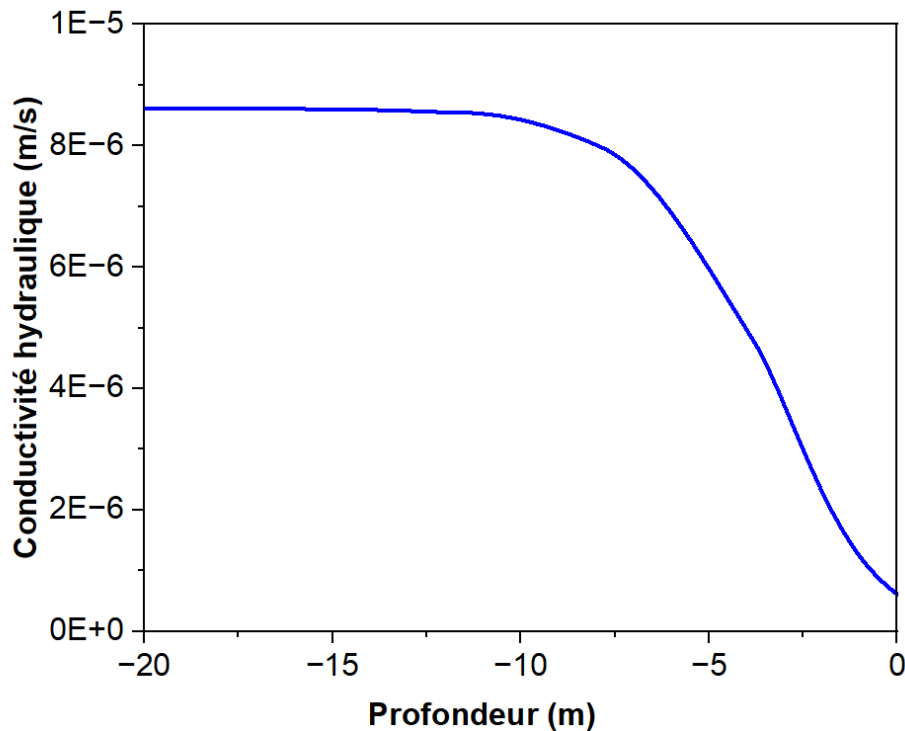


Figure 6. 7 : Le profil vertical de la conductivité hydraulique.

### b) Les propriétés thermiques du sol

La figure 6.8 illustre les profils verticaux de la conductivité thermique et de la capacité thermique volumétrique pour la zone étudiée. Le gradient de ces deux profils dans la zone proche de la surface est de 0,92 W/m. K et 2,12 J/m<sup>3</sup>. K pour la conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique, respectivement. Ce gradient augmente ensuite à mesure que l'on s'éloigne de la surface du sol, atteignant une profondeur de 8 mètres où la conductivité thermique et la capacité thermique volumétrique stabilisent respectivement à 1.01 W/m. K et 2,32E6 J/m<sup>3</sup>. K.

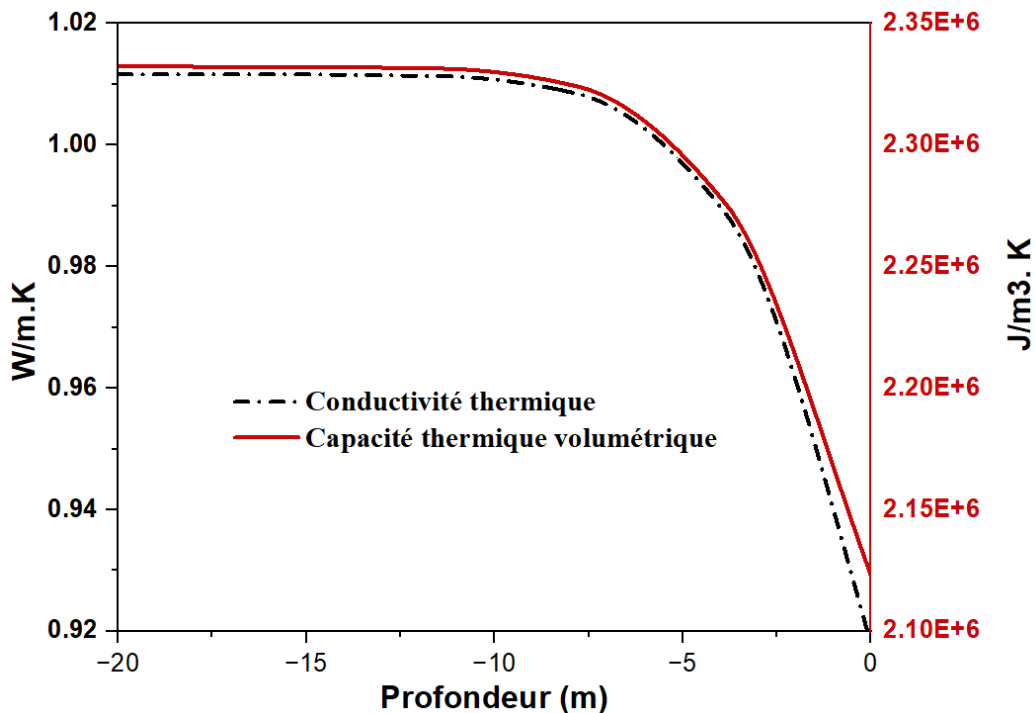


Figure 6. 8 : les profils verticaux des propriétés thermiques.

### 6.3.2 Température du sol

Les figures 6.9 et 6.10 mettent en évidence l'évolution de la température du sol pour différents jours de la saison hivernale et estivale.

Durant l'hiver, la température du sol se situe dans une fourchette de 11.5 à 16 °C. Elle augmente avec l'augmentation de la profondeur et s'étend jusqu'à 8 mètres de profondeur, où elle se stabilise à 16 °C. En revanche, en été, la température du sol se situe dans une fourchette 28.5 °C et 16 °C, elle baisse en fonction de l'augmentation de la profondeur jusqu'à 8 mètres, avant de se stabiliser autour de 16 °C. Cette stabilité est attribuée à la stabilité des propriétés hydraulique et thermique du sol à cette profondeur, comme le montrent les figures précédentes. Cela permet d'assurer une chaleur ou un rafraîchissement permanent des bâtiments sur le long terme.

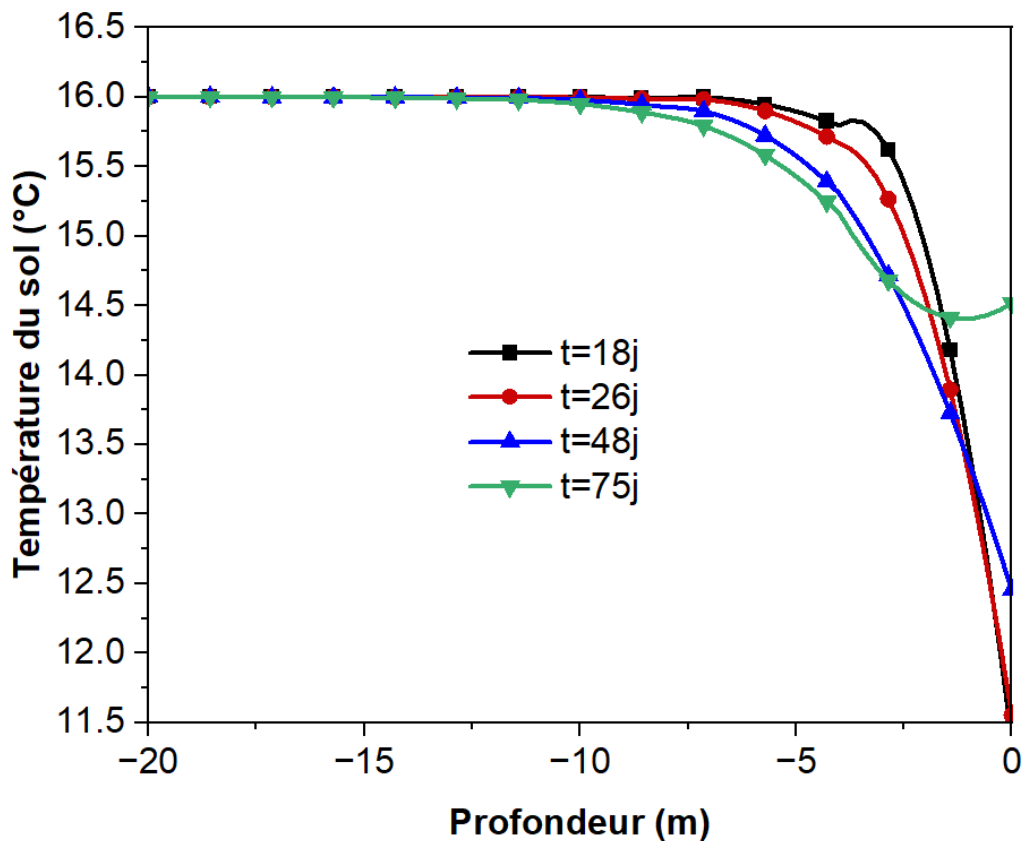


Figure 6. 9 : l'évolution de la température du sol pour différents jours de la saison hivernale.

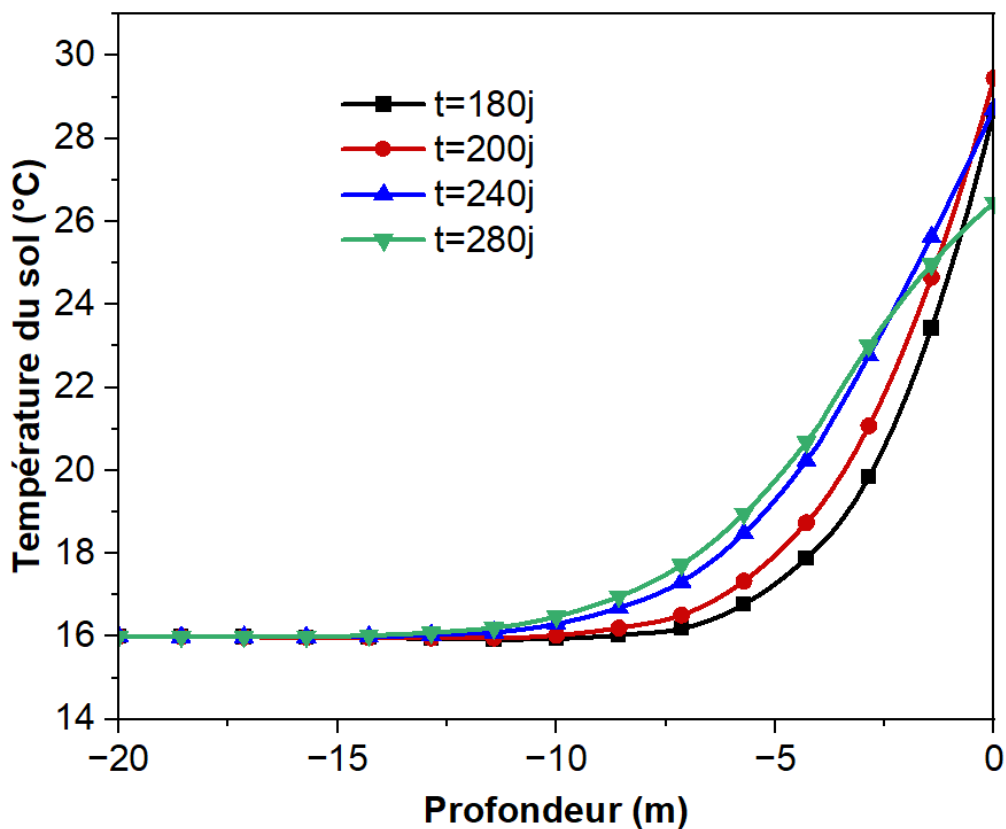


Figure 6. 10 : l'évolution de la température du sol pour différents jours de la saison estivale.

### 6.4 La performance thermique des échangeurs de chaleur

Dans cette partie, nous avons examiné les performances thermiques des échangeurs de chaleur horizontaux installés à faible profondeur. Tous les paramètres susceptibles d'affecter l'efficacité énergétique du système y seront détaillés.

#### 6.4.1 L'effet de la négligence de l'interaction atmosphérique

Un échangeur de chaleur horizontal (HGHE) en polyéthylène haute densité de forme linéaire, avec un rayon intérieur de 20 mm et un rayon extérieur de 24 mm, a été installé à 2 m de profondeur sous la surface du sol afin d'examiner l'effet de négligence de l'interaction entre l'atmosphère et le sol. Les paramètres géométriques et thermiques utilisés dans cette section sont déterminés dans le tableau suivant :

**Tableau 6. 9 : Les paramètres thermiques et géométriques de HGHE employées pour examiner les conséquences négligées de l'interaction atmosphérique.**

Paramètres	Valeur
Coefficient de conductivité thermique de la paroi du tuyau	0.5 [W/ (m.K)]
Vitesse du fluide à l'intérieur de HGHE	0.4 [m/s]
Epaisseur de la paroi du tuyau	1 [Mm]
Longueur axiale de HGHE	30 [m]
Conductivité thermique du fluide	0.5 [W/ (m.K)]
Capacité thermique spécifique du fluide	4200 [J/ (kg.K)]

Le tableau suivant récapitule les conditions limites applicables aux deux cas d'étude, avec et sans interaction atmosphérique.

**Tableau 6. 10 : Les conditions limites pour les deux scénarios d'étude, en présence et en l'absence d'interaction atmosphérique.**

Surface		Haut	Latéral	Bas
Cas 1	Conditions thermiques	Neumann, Eq 4.36	Adiabatique	Dirichlet 16°C
	Conditions hydrauliques	Neumann Eq 4.76	Adiabatique	Dirichlet 100 cm
Cas 2	Conditions thermiques	Dirichlet Eq 6.12	Adiabatique	Dirichlet 16°C
	Conditions hydrauliques	Neumann P	Adiabatique	Dirichlet 100 cm

## Analyse et interprétation des résultats

La figure 6.11 compare les températures de fluide à la sortie de l'échangeur de chaleur installé à 2 mètres de profondeur, testé dans les deux scénarios avec et sans interaction atmosphérique.

En été, la température du fluide de sortie est plus élevée dans le cas avec interaction atmosphérique que dans le cas sans interaction atmosphérique, où la différence de température est de l'ordre de 2 °C. Cependant, en hiver, la température du fluide de sortie dans le scénario d'interaction atmosphérique est plus basse que dans le cas sans interaction atmosphérique avec une différence de température de 1.2 °C.

Toutefois, d'après ces résultats, il apparaît que la température du fluide est sous-estimée en été et surestimée en hiver lorsque l'interaction entre l'atmosphère et le sol est ignorée.

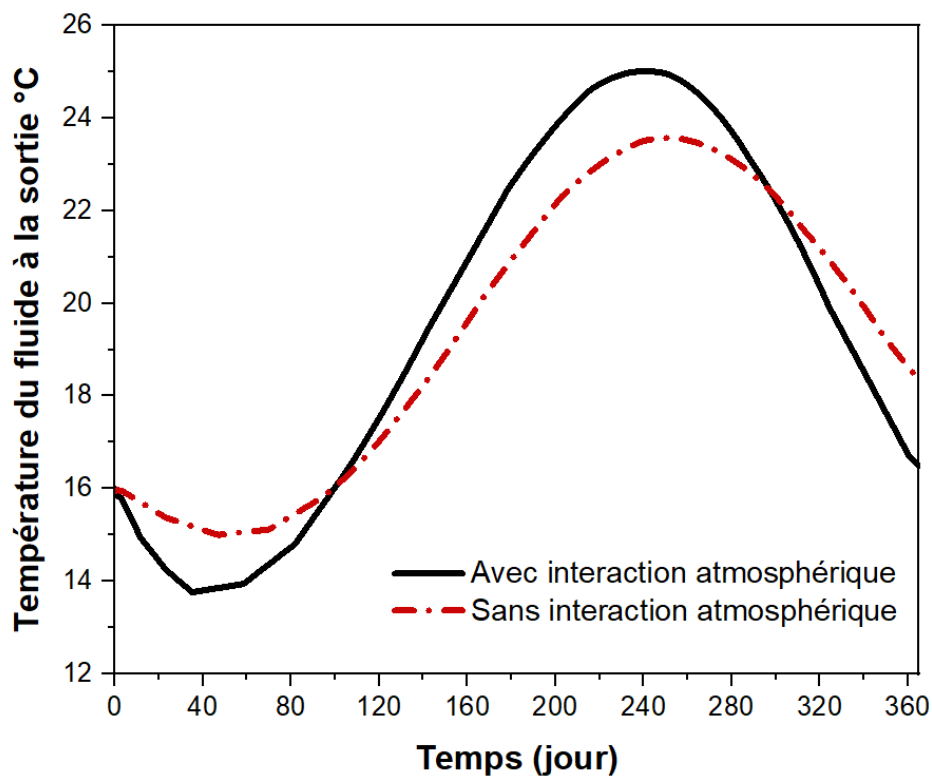


Figure 6. 11 : la temperature du fluide pour les deux scénarios avec et sans interaction atmosphérique.

### 6.4.2 L'effet de la profondeur d'installation

Cette analyse examine les performances d'un échangeur de chaleur horizontal (HGHE) en polyéthylène haute densité de forme linéaire fonctionnant sous différentes profondeurs : 2 m, 3 m, 5 m et 8 m. Les paramètres géométriques et thermiques de l'HGHE sont identiques à ceux utilisés pour la section précédente.

La figure 6.12 met en comparaison les températures du fluide à différentes profondeurs d'installation.

## Analyse et interprétation des résultats

La température de sortie du fluide du système HGHE augmente avec la profondeur d'installation, passant de 12 °C lorsque la profondeur d'installation est de 1 m à 16 °C pour une profondeur d'installation de 8 m en hiver, et diminue avec l'augmentation de la profondeur d'installation en été, descendant de 27 °C à 16 °C pour une profondeur de 8 m. À 8 mètres de profondeur, la température devient presque constante pour les deux saisons. Cela peut s'expliquer notamment par la température du sol, qui diminue avec l'augmentation de la profondeur en été et augmente avec l'augmentation de la profondeur en hiver jusqu'à ce qu'elle atteigne 8 mètres de profondeur ou que la température devienne relativement stable, ce qui est illustré par les figures 9 et 10.

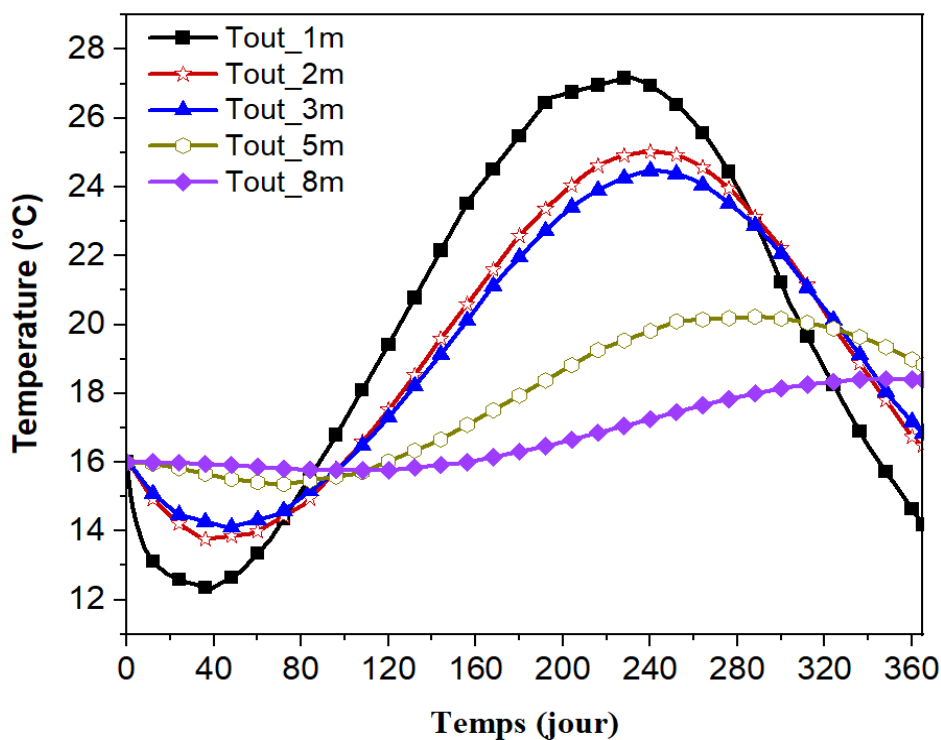


Figure 6. 12 : Les températures du fluide à différentes profondeurs d'installation : 1 m, 2 m, 3 m et 8 m.

### 6.4.3 L'effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur

Dans cette section, nous avons examiné l'effet de la géométrie de l'échangeur de chaleur. Nous avons sélectionné deux types de géométrie : un échangeur de chaleur linéaire et un échangeur de chaleur de forme spirale. Les deux types d'échangeurs sont construits en polyéthylène haute densité et installés à 2,5 mètres sous le niveau du sol. Le tableau suivant résume l'ensemble des paramètres géométriques et thermiques des échangeurs de chaleur.

## Analyse et interprétation des résultats

Tableau 6. 11 : Les paramètres géométriques et thermiques des deux types d'échangeurs de chaleur.

Paramètres	Valeur
Diamètre intérieur du tuyau	0.03 [m]
Diamètre extérieur du tuyau	0.036 [m]
Distance entre l'entrée et la sortie	1 [m]
Longueur axiale des deux types	30 [m]
Conductivité thermique du fluide	0.5 [W/ (m.K)]
Capacité thermique spécifique du fluide	4200 [J/ (kg.K)]
Coefficient de conductivité thermique de la paroi du tuyau	0.5 [W/ (m.K)]
Vitesse du fluide à l'intérieur de HGHE	0.4 [m/s]
Epaisseur de la paroi du tuyau	1 [Mm]

Les figures 6.13 et 6.14 présentent le contour de la température du sol et environnant des échangeurs de chaleur, en hiver et en été respectivement. Les échangeurs de chaleur exploitent cette différence de température afin de produire le chauffage en hiver et le rafraîchissement en été.

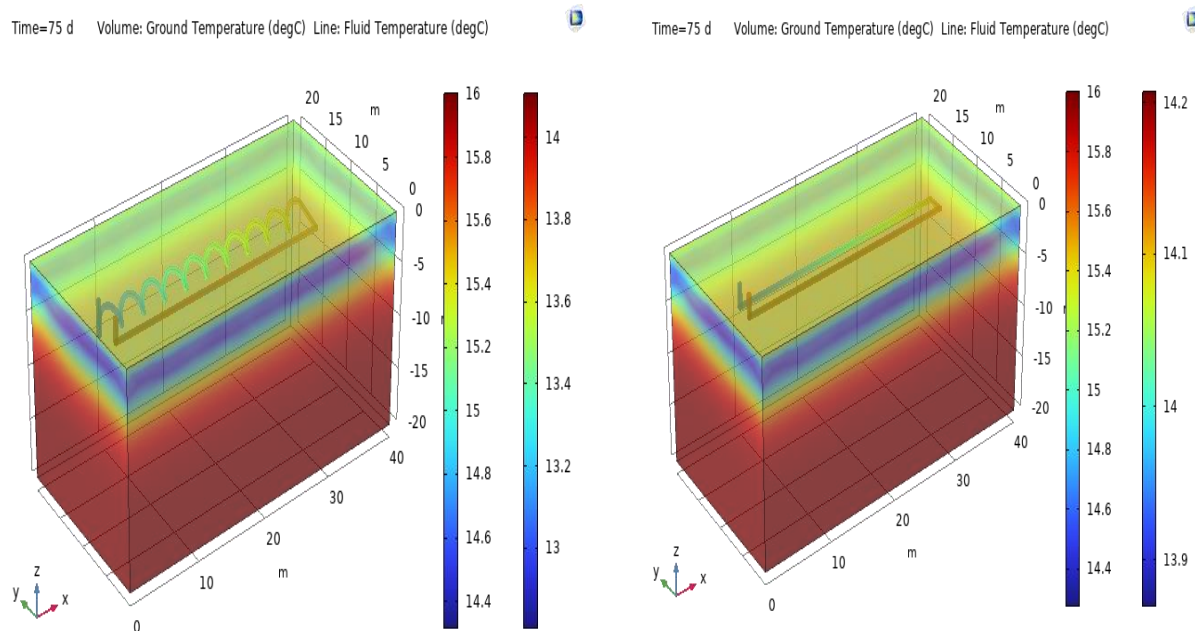
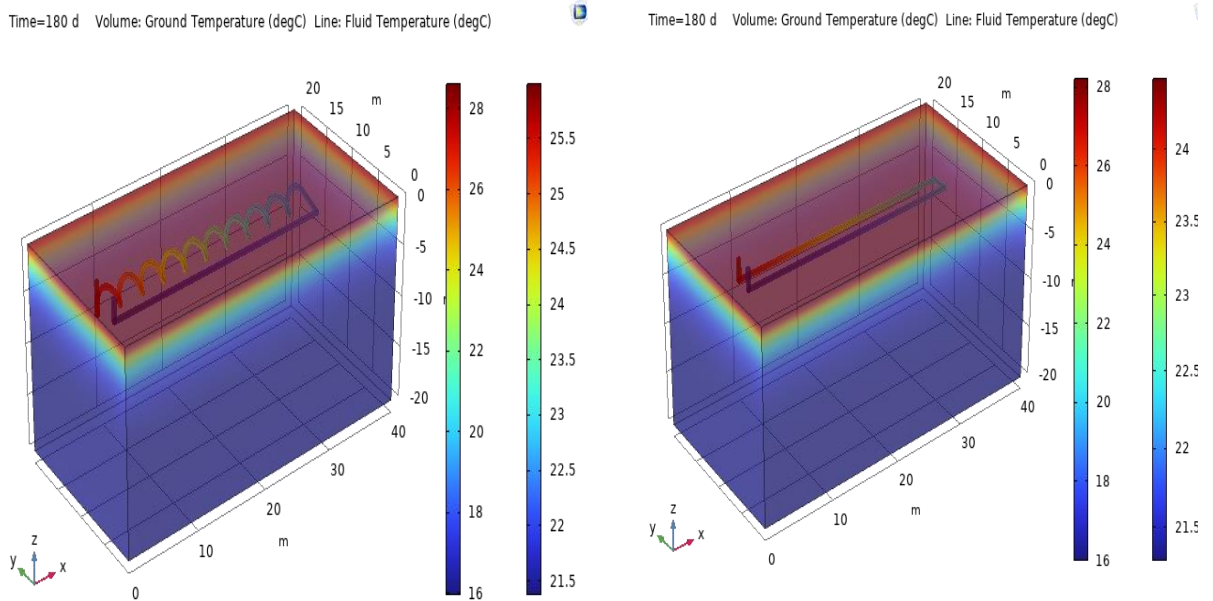


Figure 6. 13 : le contour de la température du sol et environnant des échangeurs de chaleur, en hiver.



**Figure 6. 14 : le contour de la température du sol et environnant des échangeurs de chaleur, en été.**

La figure 6.15 affiche les températures d'entrée et de sortie du fluide pour les deux conceptions d'échangeurs de chaleur horizontaux (spirale et linéaire).

Les valeurs de la température d'entrée du fluide  $T_{i,f}$  sont comprises entre 12,78 °C et 26,17 °C pour la boucle linéaire et entre 12,32 °C et 27,80 °C pour le serpentin en spirale. La température de sortie du fluide  $T_{o,f}$  est comprise entre 13,93 °C et 23,86°C pour le serpentin en spirale et 23,65 °C, et 14,14 °C et 23,45 °C pour la boucle linéaire, respectivement.

Les températures d'entrée des deux types d'échangeurs de chaleur sont inférieures à la température de sortie de janvier à fin mars, et le même processus se produit d'octobre à décembre, ce qui signifie que l'eau dans la canalisation est chauffée pendant cette période. En revanche, les températures d'entrée des deux types d'échangeurs de chaleur sont supérieures à la température de sortie d'avril à fin septembre, ce qui signifie que l'eau est refroidie lors de son passage dans la canalisation.

Sur la base des résultats de la simulation, on peut observer que la différence maximale de température enregistrée pour l'échangeur de chaleur en forme spirale est la plus importante, atteignant 5,42 °C, suivie par l'échangeur de forme linéaire qui affiche une différence de 3,15 °C.

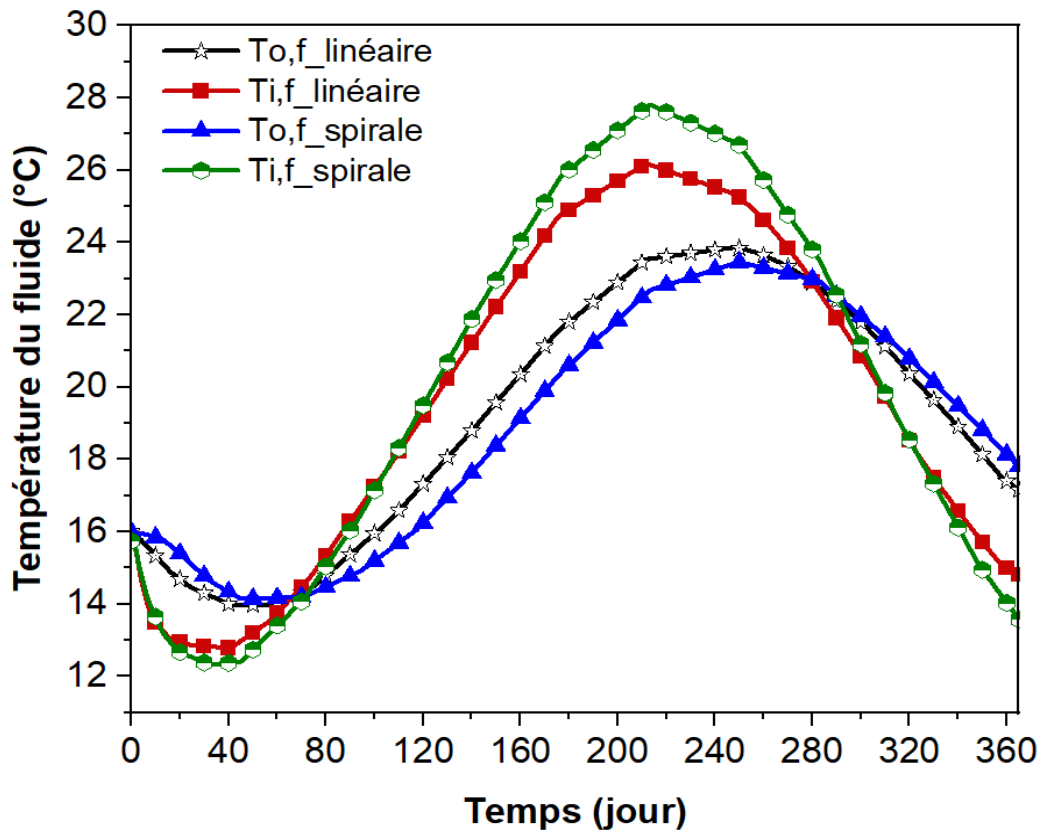


Figure 6. 15 : les températures d'entrée et de sortie du fluide pour les deux conceptions d'échangeurs de chaleur horizontaux (spirale et linéaire).

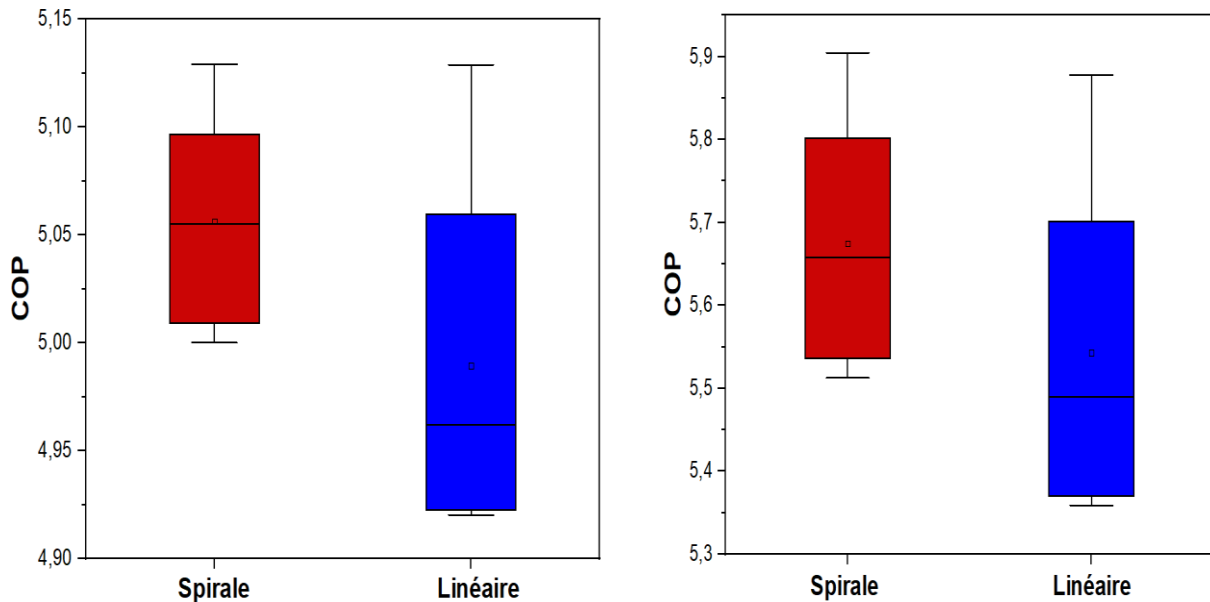


Figure 6. 16 : Le coefficient de performance des deux types d'échangeur de chaleur : spirale et linéaire, a) en mode de chauffage, b) en mode de refroidissement.

La figure 6.16 illustre le coefficient de performance des deux types d'échangeurs de chaleur en mode chauffage et en mode refroidissement.

## Analyse et interprétation des résultats

En mode chauffage, les deux configurations ont un coefficient supérieur à 4,9. La valeur la plus élevée est celle de la configuration spirale, avec une valeur de 5,09. En mode refroidissement, le coefficient de performance des deux types d'échangeurs est supérieur à 5,3. La valeur la plus élevée est celle de la configuration en spirale, avec une valeur de 5,8. Par conséquent, l'échangeur de chaleur à configuration spirale est plus performant que l'échangeur à configuration linéaire.

La figure 6.17 illustre le taux d'échange de chaleur pour les deux types de la géométrie dans les modes de chauffage et de rafraîchissement. Les résultats montrent que l'échangeur de chaleur de configuration spirale a la valeur de taux d'échange la plus élevée dans les deux modes de chauffage et de refroidissement, avec une valeur maximale de 1 450 W et 2 862 W respectivement. On peut donc en déduire que la configuration spirale a un volume d'échange plus important avec les influences environnementales et les processus de transfert de chaleur dans le sol. C'est pourquoi les variations de température sont plus importantes dans ce cas de configuration. Ceci est dû à la longueur totale de cette conception.

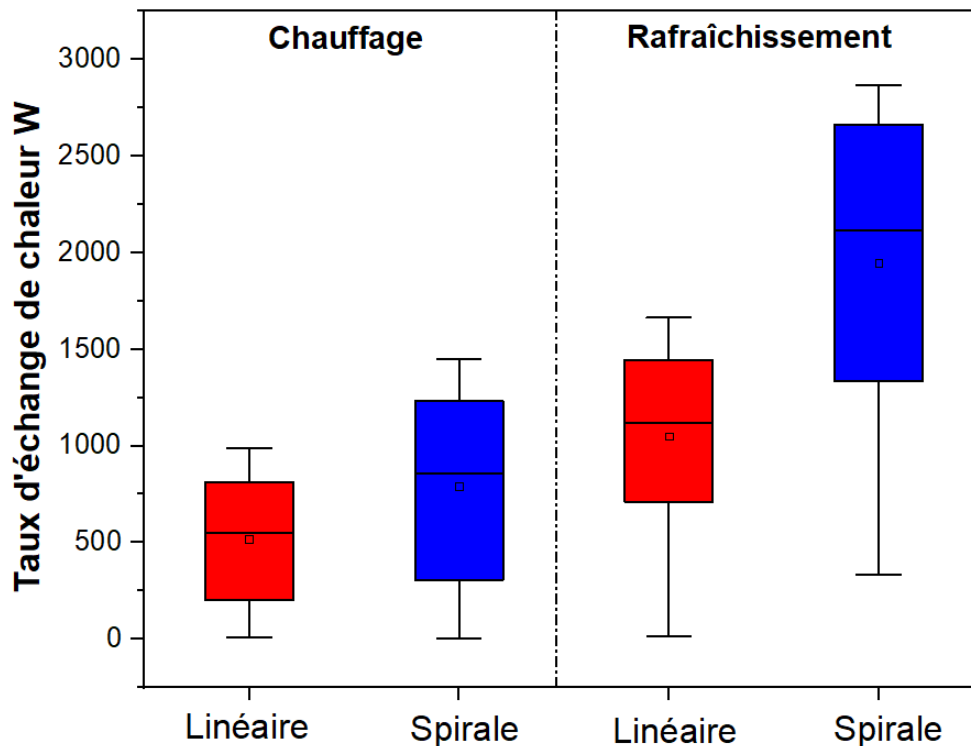


Figure 6. 17 : Le taux d'échange de chaleur des deux types d'échangeur de chaleur : spirale et linéaire, en mode de chauffage et en mode de refroidissement.

## Analyse et interprétation des résultats

### 6.4.4 L'effet de la vitesse d'écoulement du fluide de travail

Cette section se concentre sur les performances thermiques d'un échangeur de chaleur d'un diamètre de 0,02 m, d'une longueur axiale de 35 m et d'une profondeur d'installation de 2 m en réponse à différentes vitesses d'écoulement de 0,22 m/s, 0,34 m/s, 0,46 m/s et 0,58 m/s.

La figure 6.18 montre une comparaison de la température de sortie de l'échangeur en fonction du temps à différentes vitesses d'écoulement pour une année de fonctionnement. La température de sortie diminue à mesure que la vitesse d'écoulement du fluide augmente tout au long de l'hiver. Pour des vitesses d'écoulement de 0,22, 0,34, 0,46 et 0,58 m/s, respectivement, les différences de température maximales entre les températures du fluide à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur sont de 1,87°C, 1,39°C, 1,08°C et 0,88°C. La température de sortie augmente en été lorsque la vitesse du fluide augmente. Pour des vitesses d'écoulement de 0,22, 0,34, 0,46 et 0,58 m/s, respectivement, nous avons obtenu des différences de température maximales entre les températures d'entrée et de sortie du fluide de 3,55°C, 2,64°C, 2,05°C et 1,70°C. Par conséquent, en augmentant la vitesse d'écoulement, la température moyenne de sortie peut être plus proche de la température d'entrée, ce qui réduit le temps d'échange de chaleur entre le fluide de travail et le sol.

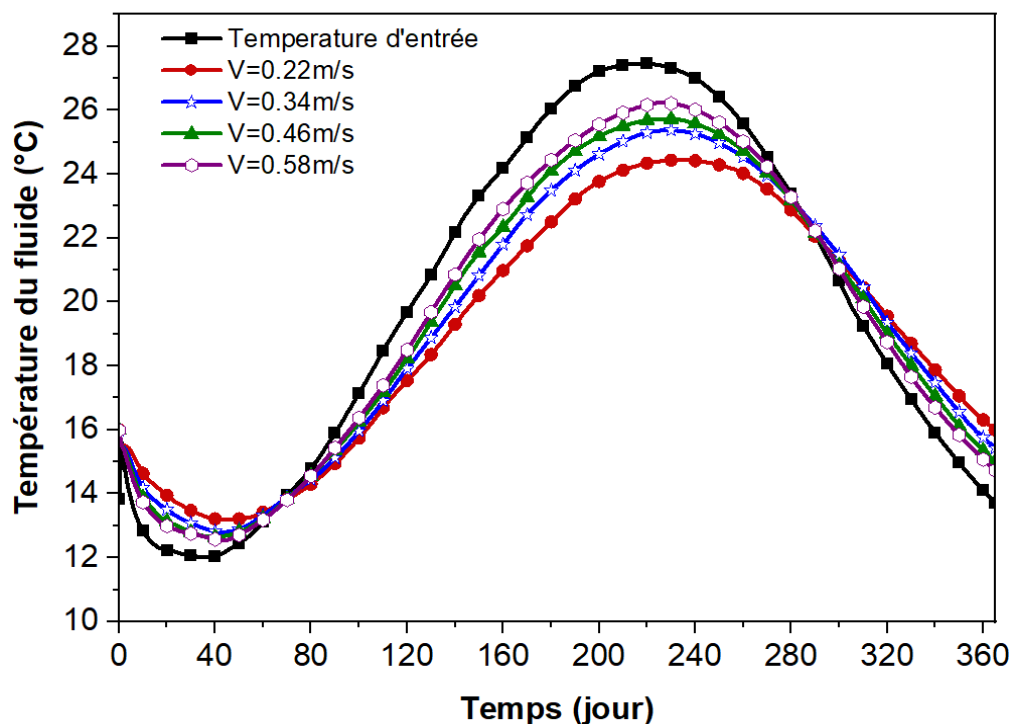


Figure 6. 18 : Variation de la température de sortie du fluide à différentes vitesses d'écoulement en hiver et en été.

### 6.4.5 L'effet du rayon interne du tuyau

Dans cette partie, quatre rayons distincts 16, 20, 28 et 36 mm ont été appliqués afin d'étudier l'effet de la variation du diamètre du HAGHE sur l'efficacité thermique des échangeurs de chaleur.

La variation des températures de sortie en fonction du temps pour différents diamètres de tuyau est illustrée dans la figure 6.19. Cette figure montre que la température du fluide augmente progressivement avec l'augmentation du rayon, en été. Les variations de température du fluide entre l'entrée et la sortie atteignent 5,6 °C, 5,01 °C, 3,83 °C et 2,85 °C pour des rayons de 16, 20, 28 et 30 mm, respectivement. Cependant, en hiver, à mesure que le diamètre augmente, la température du fluide diminue. Les différences de température les plus élevées sont de 1,028 °C, 0,84 °C, 0,74 °C et 0,68 °C pour des diamètres de HAGHE respectivement de 16, 20, 28 et 36 mm. On peut donc en conclure que des températures estivales plus élevées et des températures hivernales plus basses sont corrélées à des valeurs de rayon de tuyau plus élevées, en raison de l'augmentation de la surface d'échange et de la diminution du coefficient de transfert de chaleur par convection avec l'augmentation du rayon interne du tuyau.

La hausse des températures durant l'été et la baisse des températures pendant l'hiver est liée à une augmentation du rayon du tuyau. Ceci est attribué à l'accroissement de la surface d'échange et à la réduction du coefficient de transfert thermique par convection lorsque le rayon interne du tuyau augmente.

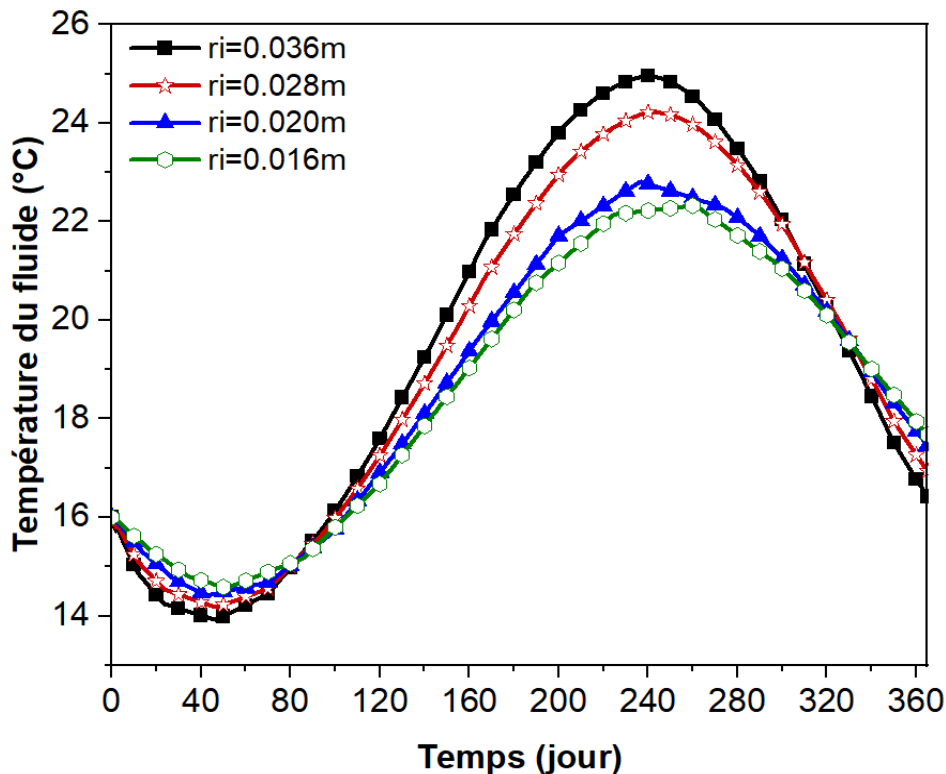


Figure 6. 19 : Variation de la température de sortie du fluide sous différents diamètres de tuyaux en hiver et en été.

### 6.4.6 L'effet de la longueur axiale

En réponse aux différentes longueurs de tuyaux 20, 30, 40 et 50 mètres, cette section examine les performances thermiques d'échangeurs de chaleur dont le diamètre est de 0,02 m, la vitesse d'écoulement de 0,38 m/s et la profondeur d'installation de 2 m. La figure 6.20 compare la température de sortie du système en fonction du temps pour différentes longueurs d'échangeurs de chaleur souterrains. La température de sortie augmente proportionnellement à la longueur du tuyau en hiver. Pour des longueurs de tuyau de 20, 30, 40 et 50 mètres, les variations maximales de température du fluide entre l'entrée et la sortie sont respectivement de 1,14 °C, 1,48 °C, 1,81 °C et 2,13 °C. Pendant l'été, la température de sortie diminue lorsque la longueur de l'échangeur augmente. Les différences de température du fluide les plus importantes entre l'entrée et la sortie sont de 2,08 °C, 2,69 °C, 3,16 °C et 3,68 °C pour des longueurs d'échangeur de 20, 30, 40 et 50 m, respectivement. Les températures hivernales plus élevées et les températures estivales plus basses sont en corrélation avec des tubes plus longs. Il est évident que le long tube d'échange de chaleur est destiné à optimiser le transfert de chaleur.

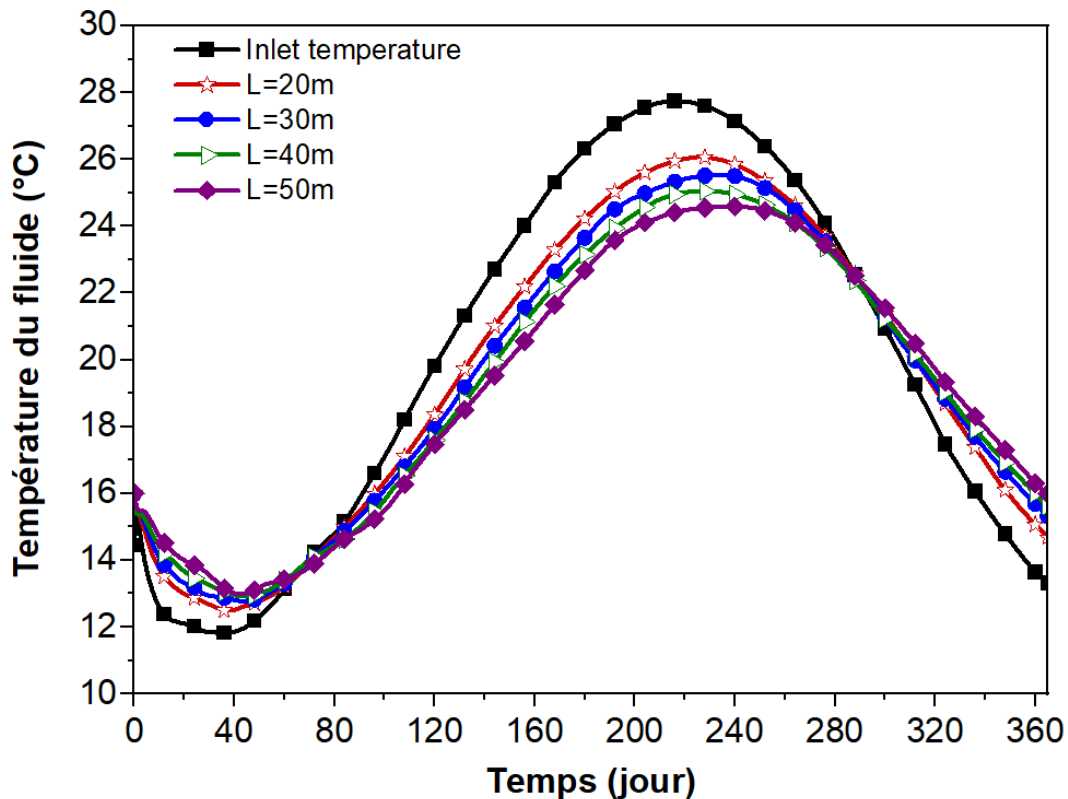


Figure 6. 20 : Variation de la température de sortie du fluide pour différentes longueurs de tuyaux en hiver et en été.

### 6.5 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer les performances des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux dans le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments de la ville de Mostaganem. Dans ce contexte, une modélisation numérique a été établie, comprenant le couplage de trois processus : le transfert d'humidité dans un sol non saturé, le transfert de chaleur dans le sol et le transfert de chaleur à l'intérieur des échangeurs de chaleur. Le problème a été résolu par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Les principaux résultats obtenus de cette modélisation sont les suivants :

L'analyse du bilan hydrologique, basée sur les informations climatiques et géologiques de la ville de Mostaganem, donne des détails précis sur ses éléments constitutifs. L'étude du bilan hydrologique a révélé que plus de 79,01 % des précipitations se retournent vers l'atmosphère par évapotranspiration, que ce soit depuis les surfaces d'eau libre, les végétations ou le sol.

En hiver, la température du sol augmente en fonction de sa profondeur, tandis qu'en été, elle diminue jusqu'à atteindre 8 mètres de profondeur, où elle se stabilise autour de 16 °C. Cette

## Analyse et interprétation des résultats

---

stabilité est due à la stabilité des caractéristiques hydrauliques et thermiques du sol à cette profondeur. Cela permet de garantir un chauffage ou un rafraîchissement des bâtiments sur le long terme.

Lorsque l'interaction entre l'atmosphère et le sol est négligée, la température du fluide est sous-estimée en été et surestimée en hiver. Par conséquent, l'interaction entre l'atmosphère et le sol doit être prise en compte lors de l'installation d'un système géothermique à faible profondeur.

Sur la base des résultats de la simulation, la différence maximale de température enregistrée pour l'échangeur de chaleur en forme spirale est la plus significative, atteignant 5,42 °C, correspondant à un coefficient de performance de 5.09 dans le mode chauffage et de 5,8 dans le mode rafraîchissement.

L'analyse révèle que l'échangeur thermique spirale présente le taux d'échange le plus important dans les deux modes de chauffage et de refroidissement, atteignant respectivement 1 450 W et 2 862 W. Il est donc possible de conclure que la configuration en spirale présente un volume d'échange plus significatif avec les impacts environnementaux et les mécanismes de transfert thermique dans le sol.

L'augmentation de la vitesse d'écoulement entraîne une plus grande proximité de la température moyenne de sortie avec la température d'entrée, réduisant ainsi le temps d'échange de chaleur entre le fluide de travail et le sol. En revanche, les températures hivernales supérieures et les températures estivales inférieures sont liées à des tuyaux plus longs. Il est clair que le long tube de transfert thermique a pour objectif d'optimiser la transmission de chaleur.

**Conclusion générale et perspectives de recherche futures**

### Conclusion générale

Ce travail de recherche vise à examiner la performance de la géothermie à faible profondeur pour générer le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments grâce aux échangeurs de chaleurs horizontales via des pompes à chaleur. Cette recherche considère aussi l'impact de l'interaction entre l'atmosphère, le sol et l'échangeur thermique, ainsi que la transmission d'humidité dans le sol. Cette étude prend en considération le couplage entre les propriétés thermiques et hydrauliques des sols partiellement saturés. Elle souligne aussi l'effet des paramètres géométriques de l'échangeur thermique, comme le rayon, la longueur et la forme des conduits employés. Cela inclut également la vitesse de débit du fluide et la profondeur d'installation des échangeurs de chaleur. Grâce à ce travail de recherche, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Dans le premier chapitre, nous avons vu qu'il existe de nombreuses réserves d'énergies fossiles et les techniques permettant de les utiliser sont en constante progression. Néanmoins, la consommation de ces combustibles provoquera incontestablement des problèmes environnementaux locaux qui auront des conséquences mondiales, notamment une hausse des gaz à effet de serre et un réchauffement climatique. Il est donc conseillé d'utiliser des énergies locales, écologiquement durables et renouvelables en particulier l'énergie géothermique.

Selon le chapitre 2, l'énergie géothermique, qui offre un potentiel considérable, demeure peu répandue et exploitée en Algérie. Cependant, dans un futur proche, il ne sera plus possible d'obtenir du gaz naturel pour satisfaire la demande en chauffage dans plusieurs pays qui possèdent une grande quantité de gaz, notamment l'Algérie. Dans cette situation, il est vivement recommandé d'utiliser cette source d'énergie (géothermie superficielle) qui est inépuisable et écologique, conçue pour générer du chauffage et de la climatisation dans nos constructions. Notre recherche s'est concentrée sur ce genre d'énergie renouvelable nécessitant un dispositif thermodynamique nommé « pompe à chaleur géothermique ».

De nombreux bâtiments résidentiels et commerciaux ont recours aux pompes à chaleur géothermiques en raison de leurs excellentes performances en matière d'énergie et d'environnement. En particulier, ces pompes constituent une technologie de fiabilité en matière d'énergie renouvelable pour le chauffage et le refroidissement des endroits. Il est crucial de prendre en compte son efficacité lorsqu'on choisit une pompe à chaleur, Ce qui a été détaillé dans le troisième chapitre. Cette démarche permet d'apprécier la performance de système en mettant en parallèle l'énergie générée et celle utilisée. Divers critères, comme le coefficient de performance (COP) et le coefficient de performance saisonnier (SCOP), de la

## Conclusion Générale et Perspectives de Recherche Futures

---

pompe à chaleur, doivent être pris en compte pour déterminer le modèle le plus efficace. En saisissant adéquatement ces indicateurs, les consommateurs peuvent réduire leur coût d'énergie tout en favorisant une gestion plus performante de leurs dépenses. Plus ces critères s'accroissent, plus la pompe à chaleur se révèle efficace et économe en matière d'énergie.

Une connaissance approfondie du transfert thermique à travers les matériaux favorise l'optimisation de l'efficacité énergétique et le développement des technologies avancées. Dans le quatrième chapitre, nous avons passé en revue le phénomène d'interaction atmosphérique. On désigne par interactions sol-atmosphère les liens complexes entre le sol et les conditions météorologiques, un concept qui fait référence à des processus comme l'humidité, la température et le vent, mais aussi la composition du sol. Ces interactions ont un impact sur l'équilibre des écosystèmes de la Terre et sur la gestion du transfert carbone. Une meilleure connaissance de ces dynamiques facilitera la prévision plus efficace des effets du changement climatique et le développement de stratégies d'adaptation durables. L'infiltration des eaux de pluie, la répartition de l'eau dans les sols non saturés en profondeur et la réaction des sols peu profonds aux conditions météorologiques ont un impact sur divers domaines d'hydrologie, d'écologie, de géologie et d'agronomie.

Cette recherche se penche sur les performances thermiques des échangeurs de chaleur souterrains horizontaux installés dans une région du nord-ouest algérien (Mostaganem). Le logiciel Comsol Multiphysics a servi à la création d'un modèle transitoire numérique en 3D qui repose sur la méthode des éléments finis. L'impact de l'interaction entre le sol et l'atmosphère est d'abord évalué par le modèle conçu, en considérant toutes les conditions climatiques et géologiques de la zone. Il analyse par la suite la combinaison du transfert hydraulique et thermique dans un sol non saturé. Enfin, on évalue l'interaction entre le sol et l'échangeur thermique pour déterminer les performances des pompes géothermiques horizontales. Les résultats cruciaux obtenus comprennent :

- L'étude du bilan hydrologique, fondée sur les données climatiques et géologiques de la ville de Mostaganem, fournit des informations exactes sur ses composantes. L'analyse du bilan hydrologique a mis en évidence que plus de 79,01 % des précipitations retournent vers l'atmosphère par évapotranspiration, provenant des surfaces aquatiques, des végétaux ou du sol.
- La température du sol augmente en hiver, en fonction de sa profondeur, tandis qu'elle baisse en été jusqu'à se stabiliser autour de 8 mètres de profondeur pour les deux saisons. Cette stabilité est attribuable à la cohérence des propriétés hydrauliques et

## Conclusion Générale et Perspectives de Recherche Futures

---

thermiques du sol à cette profondeur. Les pompes à chaleur exploitent cette zone pour chauffer ou de rafraîchir les bâtiments sur le long terme.

- Lorsqu'on néglige l'interaction atmosphérique, la température du fluide est sous-estimée en été et surestimée en hiver. Il est donc essentiel de prendre en compte cette interaction lorsqu'on met en place un système de géothermie superficielle.
- D'après les données de la simulation, l'écart de température le plus important observé pour le cas de l'échangeur de chaleur spirale est de 5,42 °C. Cela correspond à un coefficient d'efficacité de 5,09 pour le mode chauffage et de 5,8 pour le mode rafraîchissement.
- L'étude révèle également que le taux d'échange le plus significatif est observé pour le cas de l'échangeur de chaleur spirale dans les deux modes de chauffage et de refroidissement, atteignant respectivement 1 450 W et 2 862 W. On peut donc déduire que la configuration en spirale génère un volume d'échange plus important en raison des impacts environnementaux et des processus de transfert thermique dans le sol.
- Plus la vitesse d'écoulement est élevée, plus la température moyenne de sortie se rapproche de la température d'entrée, réduisant ainsi le temps d'échange de chaleur entre le fluide de travail et le sol. En revanche, les températures hivernales supérieures et les températures estivales inférieures sont liées à des tuyaux plus longs. En effet, le long tube de transfert thermique permet d'optimiser la transmission de chaleur.

### Perspectives de recherche futures

Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées afin d'élargir les conclusions actuelles.

- L'analyse coût-bénéfice sur le cycle de vie des systèmes géothermiques constitue une étape cruciale pour évaluer leur rentabilité réelle par rapport aux systèmes de chauffage conventionnels. Elle consiste à intégrer les coûts d'installation initiaux (terrassment, équipements, main-d'œuvre), les coûts d'exploitation (consommation électrique de la pompe à chaleur) ainsi que les coûts de maintenance sur une période représentative de 20 à 30 ans.
- Une autre perspective concerne le transfert de la méthodologie développée vers les systèmes géothermiques verticaux, notamment les géopieux énergétiques. Ces derniers

## Conclusion Générale et Perspectives de Recherche Futures

---

sont des fondations profondes capables de servir à la fois de support structurel et d'échangeur thermique.

- Le couplage des systèmes géothermiques avec d'autres sources d'énergies renouvelables représente également une piste prometteuse pour améliorer leur efficacité globale. L'intégration de panneaux solaires thermiques permettrait de préchauffer le fluide circulant dans les échangeurs, tandis que les panneaux photovoltaïques pourraient alimenter partiellement ou totalement la pompe à chaleur. Ce type de système hybride favorise l'autoconsommation, réduit la dépendance énergétique externe et optimise l'utilisation des ressources disponibles sur site, en particulier dans les bâtiments à haute performance énergétique.
- Par ailleurs, l'intégration de matériaux à changement de phase (PCM) dans les échangeurs géothermiques offre une solution innovante pour stocker et restituer la chaleur de manière plus efficace.
- Enfin, l'amélioration des performances des échangeurs peut également passer par l'utilisation de tuyaux fabriqués à partir de matériaux à haute conductivité thermique. Une collaboration en cours avec un laboratoire en Turquie vise à tester de nouveaux matériaux tels que les polymères composites et les nano-matériaux (par exemple, à base de graphite ou de nanotubes de carbone) capables de renforcer les échanges thermiques entre le fluide caloporteur et le sol. L'objectif est de réduire les pertes thermiques, améliorer l'efficacité du système et potentiellement diminuer la longueur d'échangeur nécessaire. Ces travaux de recherche s'inscrivent dans une dynamique d'innovation technologique au service de la transition énergétique.

**Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

---

- [1] Ministère de la transition énergétique, “Chiffres clés de l’énergie Édition 2023,” France, 2023. Accessed: Sep. 21, 2024. [Online]. Available: [www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr](http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr)
- [2] Ministère de l’énergie et des mines, “Bilan énergétique national,” Algérie, 2021. Accessed: Sep. 21, 2024. [Online]. Available: <https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>
- [3] Action climat, “La conférence des Nations Unies sur le changement climatique,” Nations unies, 2024. Accessed: Sep. 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.un.org/fr/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
- [4] L. Chen *et al.*, “Green building practices to integrate renewable energy in the construction sector: a review,” Apr. 01, 2024, *Springer Science and Business Media Deutschland gmbh*. doi: 10.1007/s10311-023-01675-2.
- [5] A. Boukelia, “Modélisations physique et numérique des géostructures énergétiques.,” Thermique [physics.class-ph]. Université de Lorraine, 2016. Français., 2016.
- [6] G. Florides and S. Kalogirou, “Ground heat exchangers-A review of systems, models and applications,” Dec. 2007. doi: 10.1016/j.renene.2006.12.014.
- [7] R. P. Cunha and P. J. Bourne-Webb, “A critical review on the current knowledge of geothermal energy piles to sustainably climatize buildings,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, no. October 2020, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112072.
- [8] S. Menhoudj, A. M. Mokhtari, M. H. Benzaama, C. Maalouf, M. Lachi, and M. Makhlof, “Study of the energy performance of an earth—Air heat exchanger for refreshing buildings in Algeria,” *Energy Build*, vol. 158, pp. 1602–1612, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.11.056.
- [9] S. Khelifa, O. Salima, and H. M. Mounji, “Performance study of using earth-air heat exchanger for heating and cooling of greenhouse under Algerian climate” Paper, in *Proceedings - 2019 1st International Conference on Sustainable Renewable Energy Systems and Applications*, doi: 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182605.
- [10] B. Khalfallah , K. Abdelmadjid, B. Salah, M. Younes, T. Chutarat, L. Giulio, S. Weerawat , A. Hijaz., “Thermal Performance of EAHE System in Algerian Site: Case Study of Ghardaia,” *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, vol. 17, no. 3, pp. 375–382, Jun. 2022, doi:
- [11] N. Moummi, H. Benfatah, N. Hatraf, A. Moummi, and S. Youcef Ali, “Le rafraîchissement par la géothermie: étude théorique et expérimentale dans le site de Biskra,” *Journal of Renewable Energies*, vol. 13, no. 3, Oct. 2023, doi: 10.54966/jreen.v13i3.208.
- [12] M. Benhammou, L. Boubekour, A. Youcef, and M. C. Korti, “Evaluating cooling and thermal performances of a double pipe rectangular Earth-to-Air Heat Exchanger provided with a convection zone,” *J Energy Storage*, vol. 72, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108490.
- [13] M. Hafner and G. Luciani, *The Palgrave Handbook of International Energy Economics*. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-86884-0>.
- [14] Ministère de l’énergie et des mines, “Bilan énergétique national 2022,” 2023. Accessed: Sep. 16, 2025. [Online]. Available: [https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan\\_energetique\\_2022\\_web\\_65b0e0d173bab.pdf](https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan_energetique_2022_web_65b0e0d173bab.pdf)
- [15] Union professionnelle du logement accompagné, “Obligations d’actions de réduction de la consommation d’énergie finale dans des bâtiments à usage tertiaire,” 2020. Accessed: Jan. 17,

## Références bibliographiques

---

2025. [Online]. Available: <https://www.unafo.org/centre-de-ressources/obligations-dactions-de-reduction-de-la-consommation-denergie-finale-dans-des-batiments-a-usage-tertiaire/>
- [16] L. France, “Guide des technologies de l’Industrie du Futur-Enjeux et panorama des solutions technologies de réduction de la consommation énergétique.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: [https://www.cetim.fr/content/download/146965/4340548/version/1/file/59\\_Technologies+de+reduction+de+la+consommation+energetique.pdf](https://www.cetim.fr/content/download/146965/4340548/version/1/file/59_Technologies+de+reduction+de+la+consommation+energetique.pdf)
- [17] Ministère de l’économie des finances et de l’industrie, “l’économie verte,” 2024. Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.economie.gouv.fr/cedef/economie-verte>
- [18] K. Kandeh , D. Zerah “La croissance verte” , *L’Organisation des Nations -Unies pour le Développement Industriel* ,2013. Available : [https://www.unido.org/sites/default/files/2013-04/ECONOMIE-VERTE\\_FR\\_light\\_0.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/2013-04/ECONOMIE-VERTE_FR_light_0.pdf)
- [19] V. Fourreau, “Climat,” 2024. Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://fr.statista.com/infographie/28703/evolution-temperature-moyenne-mondiale-terres-et-oceans-depuis-1880/>
- [20] Environnement et changement climatique Canada, “Emissions de gaz à effet de serre à l’échelle mondiale,” Canada, 2024. Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/indicateurs-environnementaux/emissions-gaz-effet-serre-echelle-mondiale.html>
- [21] Ministère de la transition énergétique, France, “Chiffres clés du climat,” 2023. Accessed: Jan. 17, 2025. Available: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/pdf/chiffres-cles-du-climat-2023.pdf>
- [22] Ministère de l’environnement et des énergies renouvelables, “Premier rapport biennal actualise de l’Algerie,” 2023.
- [23] Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat, “ Les changements climatiques,” 2024. Accessed: Jan. 17, 2025. Available: <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2021-les-elements-scientifiques>
- [24] Faster Capital, “Attenuation du changement climatique lutter contre le changement climatique avec les strategies NZE,” 2024. Accessed: Jan. 17, 2025. Available: <https://fastercapital.com/fr/contenu/Attenuation-du-changement-climatique---lutter-contre-le-changement-climatique-avec-les-strategies-NZE.html>
- [25] Ministère de l’énergie et des mines, “Energies nouvelles, renouvelables et maitrise de l’énergie,” 2019. Accessed: Jan. 17, 2025. Available: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [26] Climate efficiency, codes 4, “Bâtiments à consommation énergétique nette zéro au Canada,” 2021. Accessed: Jan. 17, 2025. Available: <https://codes4climate.encycanada.org/fr/batiments-a-consommation-energetique-nette-zero-au-canada/>
- [27] S. Vargas-Payera, “Heat in the news: Geothermal energy in Chilean newspaper coverage.” *Renew Energy*, vol. 237, p. 121509, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.121509.

## Références bibliographiques

---

- [28] ADEME, “La géothermie,” Les enjeux des géosciences. L’agence de l’environnement et de la maîtrise de l’Énergie. Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: [https://www.capt-terre.org/Pedagogie/Ressources%20Naturelles/22%20la-geothermie\\_Ademe-BRGM.pdf](https://www.capt-terre.org/Pedagogie/Ressources%20Naturelles/22%20la-geothermie_Ademe-BRGM.pdf)
- [29] F. Nath, M. N. Mahmood, E. Ofori, and A. Khanal, “Enhanced geothermal systems: A critical review of recent advancements and future potential for clean energy production”. *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 243, p. 213370, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.GEOEN.2024.213370.
- [30] S. Serintel, “Introduction à l’énergie géothermique.” Accessed: Nov. 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.oil-gasportal.com/introduction-to-geothermal-energy/>
- [31] J. S. Figueira et al., “Shallow geothermal energy systems for district heating and cooling networks: Review and technological progression through case studies,” *Renew Energy*, vol. 236, p. 121436, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RENENE.2024.121436.
- [32] IFP Energies nouvelles, “Géothermie : exploiter la chaleur de la planète,” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/geothermie-exploiter-chaleur-planete>
- [33] Q. Wu, Y. Fan, and X. Wang, “Improvement in Operation Efficiency of Shallow Geothermal Energy System—A Case Study in Shandong Province, China,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/w15071409.
- [34] F. Nath, M. N. Mahmood, E. Ofori, and A. Khanal, “Enhanced geothermal systems: A critical review of recent advancements and future potential for clean energy production,” *Geoenergy Science and Engineering*, vol. 243, p. 213370, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.GEOEN.2024.213370.
- [35] Bpifrance, “La géothermie, une énergie renouvelable encore sous exploitée.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://bigmedia.bpifrance.fr/decryptages/la-geothermie-une-energie-renouvelable-encore-sous-exploitee-en-france>
- [36] Média indépendant en environnement, nature et sciences de la Terre., “Géothermie ou l’énergie de la Terre,” 2011. Available : <https://www.notreplanete.info/ecologie/energie/geothermie.php>
- [37] M. Violay, P. A. Pezard, D. Mainprice “Géothermie : un potentiel à creuser” *Le magazine thématique de l’actualité scientifique N° 69 Octobre-Décembre 2010*. Available: <https://www.researchgate.net/publication/234071952>
- [38] Geologyscience, “Énergie géothermique,” 2018. Accessed: Sep. 09, 2024. [Online]. Available: <https://fr.geologyscience.com/geology-branches/natural-resources/geothermal-energy/>
- [39] ADEME, “Guide technique ‘ La géothermie et les réseaux de chaleur,’” 2020. L’agence de l’environnement et de la maîtrise de l’Énergie.
- [40] D. Semmar, “Application directe de l’énergie géothermique en Algérie,” *Centre de développement des énergies renouvelables (CDER)*, 2004, Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: [https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin\\_005\\_08.pdf](https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_005_08.pdf)
- [41] S. Ouali, M.M. Hadjiat, A. Ait-Ouali, K. Salhi, A. Malek, “Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l’Algérie,” 2018. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 21 N°1 (2018) 54 - 61
- [42] S. Ouali, M.M. Hadjiat, A. Ait-Ouali, K. Salhi, A. Malek, “Cartographie et caractérisation des ressources géothermiques de l’Algérie,” 2018. *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 21 N°1 (2018) 54 - 61

## Références bibliographiques

---

- [43] N. Lebbihiat, A. Atia, M. Arıcı, and N. Meneceur, “Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures,” *J Clean Prod*, vol. 302, p. 126950, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126950.
- [44] A. DI DONNA, “La géothermie, une source d’énergie verte sous nos bâtiments,” *Encyclopédie de l’environnement*, Oct. 2019, Accessed: Oct. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/geothermie-source-energie-verte-batiments/>
- [45] Geonardo environmental technologies, “Geothermal systems and technologies,” 2023. Available: [https://geocom.geonardo.com/assets/elearning/2.27.Geothermal\\_Reservoir\\_Engineering.pdf](https://geocom.geonardo.com/assets/elearning/2.27.Geothermal_Reservoir_Engineering.pdf)
- [46] D. Yvon, H. Julien, B. Sébastien, “Géostructures thermiques - Présentation du fonctionnement thermique et mécanique,” *TECHNIQUES DE L’INGENIEUR*, 2020.
- [47] H. Brandl, “Energy foundations and other thermo-active ground structures,” *Geotechnique*, vol. 56, no. 2, pp. 81–122, 2006, doi: 10.1680/geot.2006.56.2.81.
- [48] S. Haehnlein, P. Bayer, and P. Blum, “International legal status of the use of shallow geothermal energy,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.07.069.
- [49] M. S. Kovačević, M. Bačić, and I. Arapov, “Prospects of underground engineering in the use of shallow geothermal energy,” *Gradjevinar*, vol. 64, no. 12, pp. 1019–1028, 2012, doi: 10.14256/jce.663.2012.
- [50] A. Luca, S. Burkhard, C. Maximilien, C. José, “Réglementations de l’énergie géothermique superficielle en Europe.,” September, 2013
- [51] O. Salima, “Chauffage et rafraîchissement par la géothermie, ” 2020. *Centre de développement des énergies renouvelables (CDER)*, Bulletin des Energies Renouvelables N°48-2019
- [52] G. Zhang, Z. Cao, S. Xiao, Y. Guo, and C. Li, “A promising technology of cold energy storage using phase change materials to cool tunnels with geothermal hazards,” Jul. 01, 2022, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2022.112509.
- [53] P. Christodoulides, C. Christou, and G. A. Florides, “Ground source heat pumps in buildings revisited and prospects,” Jul. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17133329.
- [54] L. Jean, G. Daniel, “Guide technique Pompe à chaleur géothermique sur aquifère Conception et mise en œuvre,” 2008. Guide coédité par l’Agence régionale de l’Environnement en Lorraine (AREL), le BRGM, EDF et la Délégation régionale Lorraine de l’ADEME
- [55] E. Hiltunen, B. Martinkauppi, L. Zhu, A. Mäkiranta, M. Lieskoski, and J. Rinta-Luoma, “Renewable, carbon-free heat production from urban and rural water areas,” *J Clean Prod*, vol. 153, pp. 397–404, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2015.10.039.
- [56] U.S. Department of energy, “Geothermal Heat Pumps,” An official website of the United States government. Accessed: Nov. 5, 2024 Available: <https://www.energy.gov/energysaver/geothermal-heat-pumps>

## Références bibliographiques

---

- [57] IZI. Rénovation énergétique, “Quels sont les différents types de pompes à chaleur pour votre chauffage ?” Accessed: Oct. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.izi-by-edf-renov.fr/blog/differents-types-de-pompes-a-chaleur>
- [58] Ma future maison “La pompe à chaleur air-eau en maison individuelle,” 2018. Available : <https://www.mafuturemaison.fr/dossier/construire/la-pompe-a-chaleur-air-eau-en-maison-individuelle/>.
- [59] Groupe Effy, “La pompe à chaleur air-air.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.effy.fr/travaux-energetique/chauffage/pompe-a-chaleur/pac-air-air/installation>
- [60] Partedis, “Tout savoir sur la pompe à chaleur géothermique.” Accessed: Jan. 17, 2025. Available: <https://www.partedis.com/tout-savoir-sur-la-pompe-a-chaleur-geothermique/>
- [61] Overblog, “L’hydrothermie.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <http://lepoledesenergies.over-blog.fr/article-l-hydrothermie-43937114.html>
- [62] H. Soeko “Installer une pompe à chaleur,.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://so-eko.com/2023/12/11/installer-une-pompe-a-chaleur/>
- [63] Engie Home Services, “Pompe à chaleur : avantages et inconvénients d’une pompe à chaleur.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.engie-homeservices.fr/dossiers/les-avantages-et-inconvenients-dune-pompe-chaleur>
- [64] Expertise Rénovation, “Quels sont les inconvénients de la pompe à chaleur ?” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.expertise-renovation.com/chauffage/quels-sont-les-inconvenients-de-la-pompe-a-chaleur>
- [65] R. Valancius, R. M. Singh, A. Jurelionis, and J. Vaiciunas, “A review of heat pump systems and applications in cold climates: Evidence from Lithuania,” Nov. 13, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en12224331.
- [66] Agence de L’environnement et de la Maitrise de l’Energie, “la géothermie pour chauffer et rafraîchir sa maison,” 2019. Available: [www.ademe.fr/contact](http://www.ademe.fr/contact)
- [67] A. Mustafa Omer, “Ground-source heat pumps systems and applications,” Feb. 2008. doi: 10.1016/j.rser.2006.10.003.
- [68] C. Melissa, L. Lisa, C. Brian, B. Simon “The rise and rise of geothermal heat pumps in New Zealand,” 2012. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/316919670>
- [69] S. J. Self, B. V. Reddy, and M. A. Rosen, “Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options,” *Appl Energy*, vol. 101, pp. 341–348, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.01.048.
- [70] A. Mustafa Omer, “Ground-source heat pumps systems and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 2, pp. 344–371, Feb. 2008, doi: 10.1016/J.RSER.2006.10.003.
- [71] R. Morin, “Sources d’énergie renouvelables ‘Géothermie.’” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.refrigerationmorin.com/geothermie/sources-energie-renouvelables/>
- [72] Geoplanete, “Rendement pompe à chaleur : COP, SCOP, ETAS.” 2022. Available : <https://geoplanete.fr/blog/rendement-pompe-%C3%A0-chaleur-cop-scop-etas-n105>
- [73] I. Sarbu and C. Sebarchievici, “General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings,” 2014, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.068.

## Références bibliographiques

---

- [74] S. Study, “Interactions sol-climat,” 2024, Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/genie-agricole/interactions-sol-climat/>
- [75] P. Kastendeuch, G. Najjar, and N. Ringenbach, “Modélisation du bilan radiatif et d’énergie d’un canyon urbain à Strasbourg,” *Climatologie*, vol. 3, pp. 25–42, 2006, doi: 10.4267/climatologie.677.
- [76] S. Study, “Convection thermique.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.studysmarter.fr/resumes/ingenierie/chauffage-et-ventilation/convection-thermique>
- [77] Techno-science, “Conduction thermique.” Accessed: Nov. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Conduction-thermique.html>
- [78] P. Heatzy, “Confort thermique.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://heatzy.com/blog/20/1/2017/confort-thermique-mieux-matriser-pour-moins-dpenser-en-3-astuces>
- [79] Le Garrec SAS, “Qu’est-ce que la convection thermique ?” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.legarrec.com/entreprise/convection-thermique/>
- [80] Université Batna 2, “Transfert de chaleur par convection.” Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://staff.univbatna2.dz/1612000918>
- [81] V. Daniel and F. Kalfoun, “Le rayonnement thermique et la loi du Corps Noir,” *Planet Terre*, 2003, Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/bilan-radiatif-terre1.xml>
- [82] Formation de lavie, “Composition de l’atmosphère terrestre.” Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <http://formationdelavie.free.fr/atmosphere.htm>
- [83] E. Haghghi, D. J. Short Gianotti, R. Akbar, G. D. Salvucci, and D. Entekhabi, “Soil and atmospheric controls on the land surface energy balance: a generalized framework for distinguishing moisture-limited and energy-limited evaporation regimes,” *Water Resources*, vol. 54, no. 3, pp. 1831–1851, Mar. 2018, doi: 10.1002/2017WR021729.
- [84] M. Sedighi, B. D. P. Hepburn, H. R. Thomas, and P. J. Vardon, “Energy balance at the soil atmospheric interface,” *Environmental Geotechnics*, vol. 5, no. 3, pp. 146–157, Jun. 2018, doi: 10.1680/jenge.15.00054.
- [85] G. Mihalakakou, M. Santamouris, J. O. Lewis, and D. N. Asimakopoulos, “ON THE Application of the energy balance equation to predict ground temperature profiles,” *Solar Energy*, vol. 60, pp. 181–190, 1997.
- [86] S Liang, “Recent progress in remote sensing of earth’s energy budget,” *Reference module in Earth systems and environmental sciences*, 2017, Accessed: Jan. 17, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10365-3>
- [87] Tyson Ochsner, “An introduction to soil physical properties and processes,” in *Rain or Shine*, oklahoma state university libraries stillwater, ed.
- [88] S. Irmak *et al.*, “Discussions and closures discussion of predicting daily net radiation using minimum climatological data” vol. 129, no. 4, pp. 256–269, 2003, doi: 10.1061/ASCE0733-94372003129:4256.
- [89] L. S. Pereira, “Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56,” 1998. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/235704197>

## Références bibliographiques

---

- [90] W.G.M. Bastiaanssen, “Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain,” 1995. Accessed: Nov. 06, 2024. [Online]. Available: <https://edepot.wur.nl/206553>
- [91] Atmospheric Scientist, “Incoming and outgoing radiation.” Accessed: Jan. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.ux1.eiu.edu/~cxtm/met/sirs.html>
- [92] E. Costa-Filho, J. L. Chávez, H. Zhang, and A. A. Andales, “An optimized surface aerodynamic temperature approach to estimate maize sensible heat flux and evapotranspiration,” *Agric For Meteorol*, vol. 311, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108683.
- [93] M. Chalhoub, M. Bernier, Y. Coquet, and M. Philippe, “A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers,” *Renew Energy*, vol. 103, pp. 295–307, Apr. 2017, doi: 10.1016/J.RENENE.2016.11.027.
- [94] B. Keshtegar, S. S. Abdullah, Y. F. Huang, M. K. Saggi, K. M. Khedher, and Z. M. Yaseen, “Reference evapotranspiration prediction using high-order response surface method,” *Theor Appl Climatol*, vol. 148, no. 1–2, pp. 849–867, Apr. 2022, doi: 10.1007/s00704-022-03954-4.
- [95] F. Tang and H. Nowamooz, “Outlet temperatures of a slinky-type Horizontal Ground Heat Exchanger with the atmosphere-soil interaction,” *Renew Energy*, vol. 146, pp. 705–718, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.07.029.
- [96] Jacques Beauchamp, “L’eau et le sol,” universite de Picardie Jules Verne 2006, Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/eau-sol.htm>
- [97] Chambre-agriculture, “Bilan hydrique : mode d’emploi,” 2020, Accessed: Nov. 29, 2024. [Online]. 94. Available: <https://pa.chambre-agriculture.fr/>
- [98] O. Dietrich, M. Fahle, and M. Seyfarth, “Behavior of water balance components at sites with shallow groundwater tables: Possibilities and limitations of their simulation using different ways to control weighable groundwater lysimeters,” *Agric Water Manag*, vol. 163, pp. 75–89, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.agwat.2015.09.005.
- [99] Geneviève Pomerleau, “Modelisation du transfert d’eau et de solute,” Université du Québec INRS-Eau ,1997.
- [100] M. A. Celia, E. T. Bouloutas, and R. L. Zarba, “A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation,” 1990. Accessed: Jul. 28, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1029/WR026i007p01483>
- [101] Z. Tian, D. Kool, T. Ren, R. Horton, and J. L. Heitman, “Approaches for estimating unsaturated soil hydraulic conductivities at various bulk densities with the extended Mualem-van Genuchten model,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 572, pp. 719–731, May 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.027.
- [102] M. T. Van Genuchten, “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils,” 1980. Accessed: Jul. 28, 2024. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- [103] H. Zou, P. Pei, C. Wang, and D. Hao, “A numerical study on heat transfer performances of horizontal ground heat exchangers in ground-source heat pumps,” *PLoS One*, vol. 16, no. 5 May, May 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0250583.
- [104] P. Reiffsteck, M. Couaillier, and G. Grandjean, “validation d’un système de classification thermique des sols,” *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l’Ingénieur JNGG2014*, Jul. 2014.

## Références bibliographiques

---

- [105] N. H. Abu-Hamdeh, “Thermal properties of soils as affected by density and water content,” *Biosyst Eng*, vol. 86, no. 1, pp. 97–102, Sep. 2003, doi: 10.1016/S1537-5110(03)00112-0.
- [106] K. Zhou *et al.*, “Design strategy and techno-economic optimization for hybrid ground heat exchangers of ground source heat pump system,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102140.
- [107] S. Yoon, S. R. Lee, and G. H. Go, “Evaluation of thermal efficiency in different types of horizontal ground heat exchangers,” *Energy Build*, vol. 105, pp. 100–105, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.07.054.
- [108] H. Zou, P. Pei, C. Wang, and D. Hao, “A numerical study on heat transfer performances of horizontal ground heat exchangers in ground-source heat pumps,” *PLoS One*, vol. 16, no. 5 May, May 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0250583.
- [109] S. Anas Boussaa, A. Kheloufi, N. Boutarek Zaourar, and F. Kerkar, “Valorization of Algerian sand for photovoltaic application,” in *Acta Physica Polonica A*, Polish Academy of Sciences, Jul. 2016, pp. 133–137. doi: 10.12693/APhysPolA.130.133.
- [110] L. Dahloun, N. Moula, M. Halbouche, and S. Mignon-Grasteau, “Phenotypic characterization of the indigenous chickens (*Gallus gallus*) in the Northwest of Algeria,” *Arch Anim Breed*, vol. 59, no. 1, pp. 79–90, Feb. 2016, doi: 10.5194/aab-59-79-2016.
- [111] “Climate-Data.” Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://fr.climate-data.org/afrique/algerie/mostaganem/mostaganem-3699/>
- [112] “Étincelle météorologique.” Accessed: Dec. 16, 2024. [Online]. Available: <https://weatherspark.com/y/42391/Average-Weather-in-Mostaganem-Algeria-Year-Round>
- [113] Baraa Qaddah, “Modélisation numérique de la dynamique et de l’évolution thermique d’une goutte métallique en chute libre dans un milieu visqueux,” *École Doctorale 353*, 2020.
- [114] L. Hu, Z. H. Rizvi, L. Tobber, and F. Wuttke, “Thermal performance of three horizontal ground heat exchanger systems: comparison of linear-loop, spiral-coil and slinky-coil arrangements,” *Front Energy Res*, vol. 11, 2023, doi: 10.3389/fenrg.2023.1188506.
- [115] Infoclimat, “Climatologie de la ville de Mostaganem.” Accessed: Dec. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.infoclimat.fr/climatologie/normales-records/1995-2023/mostaganem-ville/valeurs/60457.html>
- [116] G. Teteka Mutondo, D. Kalombo Kamutanda, and A. Mbuyu Numbi, “Evaluation du bilan hydrique dans les milieux anthropisés de la forêt claire,” *Geo Eco Trop*, vol. 42, pp. 159–172, 2018.
- [117] F. Bouteldjaoui, M. Bessenasse, A. Guendouz, “ Etude comparative des différentes méthodes d'estimation de l'évapotranspiration en zone semi-aride (cas de la région de Djelfa),” *Nature & Technologie* n° 07/Juin 2012, <https://www.researchgate.net/publication/339750123>
- [118] H. Chennafi, “Déficit d’écoulement sur les hauts plateaux sétifiens. Méthodes de Coutagne et de Turc flow deficit on the high setif plateaus. Coutagne and Turc methods,” / *Revue Agriculture*, vol. 12, pp. 68–72, 2016.
- [119] Y. GUEROUI, “ Caractérisation Hydrochimique et Bactériologique des Eaux Souterraines de L’aquifère Superficiel de la Plaine de Tamlouka (Nord-Est Algérien), ”,These de Doctorat. UNIVERSITÉ 8 MAI 1945-GUELMA 2014/2015.