

N° d'ordre : 08 / 2007 /- E / G.M

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie
Houari Boumediene



Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés

THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat d'Etat

En Génie Mécanique
Spécialité :Energétique

Par : Mr. BENCHATTI Ahmed

Sujet :

**Développement d'une approche théorique d'un
système de stockage de la chaleur dans le sol.
Comparaison avec un modèle expérimental**

Soutenue publiquement le 23/12/2007 devant le Jury composé de:

M. BOUMEDIEN Ali	Professeur	USTHB	Président
Mme BOUHADEF Khedidja	Professeur	USTHB	Directrice de thèse.
M. AZZI Abdelwahid	Professeur	USTHB	Examineur
M. TEBBAL Mohamed	Professeur	USTO	Examineur
M. SEBAA Mohamed	Professeur	U. Laghouat	Examineur
Melle KAHALERRAS Henda	Maitre de Conf.	USTHB	Examinatrice

**Développement d'une approche théorique d'un
système de stockage de la chaleur dans le sol.
Comparaison avec un modèle expérimental**

REMERCIEMENTS

Mes remerciements à :

A madame le professeur **Khedidja BOUHADEF** qui a accepté d'encadrer et de diriger ce travail avec compétence. Je lui sais grand gré de tous les conseils pertinents qui ont permis l'aboutissement de cette thèse.

Toute ma gratitude à Monsieur le Président **Ali BOUMEDIEN** et aux membres du jury, M. **Abdelwahid AZZI**, Professeur à l'USTHB, Mlle **Henda KAHALERRAS**, Maître de Conférences à l'USTHB, M. **Mohamed TEBBAL**, Professeur à l'USTO, et M. **Mohamed SEBAA**, professeur à l'université de Laghouat, pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.

Je remercie également :

Les membres du Conseil Scientifique de la Faculté de Génie Mécanique et Génie des Procédés de l'U.S.T.H.B. ainsi que monsieur le Vice Recteur chargé de la Post Graduation et de la Recherche qui m'ont facilité les démarches administratives pour ma réinscription..

Le Pr. **James R. THOMAS**, Virginia Tech Dept. Of Mechanical Engineering USA, qui m'a beaucoup aidé afin de mener à bien ma recherche.

Le Dr **André BAUDOIN** du Laboratoire de Thermodynamique de l'université de Reims et le Dr. **Pierre HOLLMULLER** du Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève, pour toute la documentation concernant le stockage thermique.

Pr. **M.FEIDT** et Dr **Ramany BALLA**, du L.E.M.T.A de Nancy, France, pour leur assistance.

Pr. Andris BUIKIS, Director, Head of Laboratory of Mathematical Physics, Institute of Mathematics, Latvian Academy of Sciences, University of Latvia et Dr. **Sharif E. GUSEINOV**, Institute of Mathematics (MI), Latvian Academy of Sciences (LAS) Riga, qui m'ont aidé pour le traitement de la partie analytique.

Pr. **H. A. BENHORMA**, Ex. Recteur de l'université de Laghouat, pour avoir mis à ma disposition tout les moyens pour mener à bien ma recherche.

Pr. **M. BOUHICHA**, Vice Recteur à l'université de Laghouat.

Mr **M. AOUISSI**, Chef de département de Mécanique à l'université de Laghouat

Les collègues enseignants, **A. MEDJELLED** et **K. BENSAYEH** pour leurs encouragements continus.

Enfin, que tous ceux qui ont contribué, de loin ou de près, à la réalisation de ce travail, trouvent, ici, l'expression de ma profonde gratitude.

Liste des symboles

S	Surface extérieure du tube	[m ²]
C_p	Capacité calorifique	[kJ/kg. °k]
H	Teneur en eau	[%]
r	Rayon du cylindre	[m]
r_0	Rayon intérieur du tube	[m]
Q	Quantité de chaleur	[w]
q	Flux de chaleur	[w/ m ²]
T	Température	[°C]
T_i	Température d'entrée	[°C]
T_e	Température de sortie	[°C]
T_s	Température du sol	[°C]
T_∞	Température du sol loin du tube	[°C]
t	Temps	[h]
U	Coefficient global du transfert de chaleur	[w/ m ² .°C]
z	Longueur du tube	[m]
I	Conductivité thermique	[w/m.°C]
T	La température moyenne pour une période donnée	[°C]
A	La différence entre les températures max et min pour la période donnée,	[°C]
x	La profondeur sous la surface	[m]
a	La diffusivité thermique K/C _v .	[m ² / s]
$? x$	Le pas de la grille dans la direction x	[m]
T_{md}	La température moyenne du domaine du stockage après déstockage	[°K]
t_d	La durée de l'opération de déstockage.	[Heures]
M	la masse du domaine de stockage	[kg]
r_∞	Le rayon du domaine de stockage qui est égal à 1 m	[m]
z_l	La longueur du tube transportant le fluide calorifique (égale à 2m)	[m]
T_∞	La température du sol avant le chauffage (égale à 15 °C)	[°C]
r_s	La masse volumique du sol sablonneux, estimée à 1550	[kg/m ³]
c_{ps}	La capacité calorifique dont la valeur, pour notre cas, est de 0.8	[kJ/kg.°C]
t_s	La durée de stockage	[h]

Liste des figures

Fig. (1) - Zone non saturée et zone saturée dans un milieu souterraine.	28
Fig. (2) : Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau	30
Fig. (3.a). Exemple de la relation la profondeur / températures annuelles du sol	38
Fig. (3.b) : Evolution annuelle de la température la région de LAGHOUAT.	
Fig. (4) : Montage vertical d'un système à circuit fermé à boucle en U unique	66
Fig. (5) : Montage horizontal d'un système à circuit fermé à couche unique	66
Fig. (6) : Boucle horizontale réelle	67
Fig. (7) : Boucle à plusieurs tubes enterré dans le sol	68
Fig. (8) : Configuration du maillage pour la solution numérique	73
Fig. (9) : Mur pour l'échange thermique	84
Fig. (10) : Présentation du problème multidimensionnel	88
Fig. (11) : le modèle théorique simplifié	95
Fig. (12) : Système stockage/ déstockage à plusieurs tubes	149

Courbes et graphes

Courbe (1): valeurs propres de la fonction $U_0(1r)$	101
Courbe (2) : champ de température	105
Courbe. (2.a) : Variation de la température à $r = r_0 = 0.012m$	105
Courbe. (2.b) : Variation de la température à $r = 0.5m$	106
Courbe. (2.c) : Variation de la température à $r = 1.0m$	106
Courbe. (2.d) : Variation de la température à $r = 1.5m$	107
Courbe. (2.e) : Variation de la température à $r = r_\infty = 2.0m$	107
Courbe. (3.a) : Variation de la température à $z = z_0 = 0m$	108
Courbe. (3.b) : Variation de la température à $z = 0.5m$	108
Courbe. (3.c) : Variation de la température à $z = 1m$	109
Courbe. (3.d) : Variation de la température à $z = 1.5m$	109
Courbe. (3.e) : Variation de la température à $z = z_l = 2.0m$	110
Courbe (4): le champ de température à $t = 0.25h$	116
Courbe (5): le champ de température à $t = 0.50h$	117
Courbe (5): le champ de température à $t = 1.00h$	117
Courbe (6): le champ de température à $t = 2.00h$	118
Courbe (7): variation de la température avec le temps à $z = 0.0m$	118
Courbe (8): variation de la température avec le temps à $z = 0.5m$	119
Courbe (9): variation de la température avec le temps à $z = 1.0m$	119
Courbe (10): variation de la température avec le temps à $z = 1.5m$	120
Courbe (11): variation de la température avec le temps à $z = 2.0m$	120

Courbe (12): variation de la température avec le temps à $r = r_0 = 0.012m$	121
Courbe (13): variation de la température avec le temps à $r = 0.5m$	121
Courbe (14): variation de la température avec le temps à $r = 1.0m$	122
Courbe (15): variation de la température avec le temps à $r = 1.5m$	122
Courbe (16): variation de la température avec le temps à $r = 2.0m$	123
Courbe. (17-a) : champ de température	125
Courbes (17-b, c, d, e) : Variation de la température avec Z (m) pour différents r	125. ... 127
Courbes (18-a, b, c, d, e) : Variation de la température avec r (m) pour différents Z	128, ..., 130
Courbe (19) : Evolution de la température des différents points du domaine de stockage	136
Courbe (20) : Variation de la température avec le rayon du domaine de stockage au cours du temps	136
Courbe (21) : Variation de la température le long du tube au cours du temps. °C	137
Courbes (22-a, b, c, d) : Variation de la température autour du tube, comparaison « théorie expérience » Après 2 heures	140, 141
Courbes (23-a, b, c, d) : Variation de la température le long du tube avec le temps, Comparaison « théorie expérience »	142, 143
Courbe (24) : coefficient global de transfert de chaleur en fonction du débit de fluide caloporteur pour différentes T_e	143
Courbe (25) : Puissance de stockage	144
Courbe (26) : Opération Stockage/déstockage	146
Courbe (27) : Comparaison entre stockage et déstockage pour le chauffage et la fourniture de l'eau chaude	148

Abstract

Despite all attempts made by researchers and the considerable progress brought about, heat storage systems remain mainly dependent on the geological nature of soil and require, in general, colossal means for their achievement, in some cases with non conventional cooling and heating systems. As a matter of fact, solar heat is characterized by its intermittency. In order to overcome this disadvantage, similar techniques can be useful to store thermal energy eventually for later use. The objective of this project is to explore the possibility of using a continuous solid medium, composed mainly of sandy unsaturated soil, which is the case in many desert eras in the world, where the solar thermal energy is available along the year, for long or short term heat storage, using a simple configuration with local means of moderate cost. We have studied the soil and carried out experiments to determine a set of parameters such as thermal conductivity, heat capacity and global heat transfer coefficient, on one hand and to trace, on the other hand, their variation with depth. For the heat exchange between a single pipe buried in soil and the surrounding medium, a mathematical model is adopted to describe the overall phenomenon. It is the heat conduction equation in two dimensional cylindrical coordinates. Steady state solution of this equation was executed by using a new analytical approach, which consists of proposing a solution function for the temperature field composed of the sum of two functions,

$$T(r, z) = U(r, z) + V(r, z).$$

The approach is completely different from the variables separation method, and the solution obtained by the application of our approach give an exact solution.

Two test applications for fixed soil thermal properties were worked and Conclusions on the prospects of using such analytical methods are given.

Introduction Générale

A l'évidence la maîtrise de l'énergie a été un des facteurs clés qui ont conduit le développement de l'humanité; elle lui a permis d'étendre son emprise sur la terre entière et de partir à la découverte de l'espace. La recherche de nouvelles sources d'énergie, toujours plus abondantes et diversifiées, et leur stockage a guidé l'homme et accru sa puissance depuis l'origine des temps, tout autant que la mobilisation de ses capacités intellectuelles, accompagnant ses aptitudes manuelles.

Dès lors, les démarches actuelles de réflexion, d'analyse et de débats du type "Quelle énergie pour demain?" sont non seulement légitimes mais indispensables, alors que se manifestent les tensions sur l'offre énergétique au regard des besoins, les craintes vis-à-vis de la sécurité et de l'environnement, les interrogations sur le modèle de développement économique.

L'histoire des siècles passés nous montre les effets multiplicateurs des réponses apportées aux défis énergétiques successifs; autant de transformations sur la forme de l'énergie utilisée, que de révolutions industrielles. Les temps modernes se caractérisent par un recours de plus en plus marqué à des ressources de haute intensité énergétique largement non renouvelables et très souvent polluantes. Les perspectives de tarissement de gisements majeurs d'énergie sont aussi dans les esprits quand on constate que la consommation des ressources naturelles des 40 dernières années dépasse celles cumulées par toutes les générations qui ont vécu depuis le fond des âges [1].

Si l'on observe, par ailleurs, les impacts écologiques, voire climatiques aux conséquences éventuellement irréversibles, on a le sentiment d'avoir atteint les limites de certains équilibres de l'Homme dans son environnement terrestre. Réduire cette disparité criante et accompagner la croissance des populations constituent aussi un devoir pour les nations. Ainsi selon le Département de l'Energie des Etats-Unis, la consommation mondiale de l'énergie devrait augmenter de 60 % sur la période 2000/2020 et cet accroissement proviendrait, en majeure partie, des pays émergents (conséquence en particulier du développement de pays comme la Chine ou l'Inde).

De fait, une voie médiane sera probablement suivie. Elle s'appuiera sur la maîtrise de la plupart des options énergétiques considérées comme complémentaires (énergies renouvelables) et de leurs stockages. De plus, la diversification des options énergétiques apparaît indispensable pour prévenir les situations de crise auxquelles nous sommes de plus en plus exposés

Il est à noter que la problématique des énergies renouvelables (solaire, éolienne....) réside essentiellement dans les grandes difficultés de son emmagasinage, d'où l'intérêt de notre recherche qui représente une contribution expérimentale et théorique dans la voie de la promotion et la généralisation de l'utilisation de ces énergies.

La contribution expérimentale de l'étude présente s'est limitée à l'analyse du phénomène du transfert de la chaleur dans le sol, et l'influence des différents paramètres thermiques du milieu environnant pour une configuration qui n'a pas été jusqu'à présent étudiée par les différentes équipes de recherche qui travaillent dans cette direction, à savoir la configuration horizontale.

Dans l'approche analytique, nous proposons une nouvelle méthode pour la résolution de l'équation de la chaleur qui se base sur le principe de séparation de fonctions qui est entièrement différente de celle basée sur le principe de séparation de variables. Le développement se fera pour deux cas, à savoir le cas stationnaire et le cas non stationnaire, avec la détermination et le développement des différents paramètres et étapes de calcul et la vérification de la consistance de notre méthode qui se fera par la validation du modèle par une comparaison avec des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre d'une étude réalisée pour les mêmes conditions. Enfin l'application de notre méthode pour un cas général est proposée pour vérifier la possibilité de la généralisation de notre approche pour l'utilisation dans d'autres domaines.

Chapitre 1

STOCKAGE THERMIQUE

1.1- Energie et développement durable

Le développement durable s'inscrit dans une solidarité à la fois dans l'espace et dans le temps. Il ne peut y avoir de développement durable sans une utilisation saine, appropriée et à un coût abordable, de l'énergie. Cela signifie qu'il faut :

- assurer les besoins énergétiques tout en réduisant les impacts environnementaux,
- veiller à une gestion prudente et responsable des ressources non renouvelables, ce qui conduit à mettre en place une politique énergétique aux niveaux local, régional, national et international. On est appelé alors à maîtriser les processus de transition entre les technologies d'aujourd'hui (non renouvelable) et celles de demain (renouvelable); notamment la conception, la réalisation et l'utilisation des infrastructures énergétiques et faire face aux problèmes énergétiques qui surgissent.

L'évolution récente des ressources énergétiques et des systèmes d'offre laisse à penser que, longtemps encore, nous resterons largement tributaires des énergies non renouvelables: pétrole, gaz, charbon, uranium. Cela soulève d'une part l'énorme problème de la production associée de gaz carbonique qu'il faudra capter et séquestrer et d'autre part celui des pollutions et déchets plus ou moins importants associés à ces diverses ressources. Peut-on faire évoluer leurs parts relatives ou dégager d'autres voies? En particulier, peut-on envisager de substituer, en totalité ou en partie, à ces ressources non renouvelables des énergies renouvelables actuellement peu développées et sous exploitées ?

Le concept de développement durable vise à réconcilier le développement économique et social, la protection de l'environnement et la conservation des ressources naturelles. En 1987, les Nations-Unies ont défini le développement durable comme un « développement répondant aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Le développement durable vise donc trois objectifs : l'intégrité écologique, l'équité entre les nations, les individus et les générations, et l'efficacité économique.

1.2- Energies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, essentiellement, le Soleil (rayonnement), principale origine des énergies renouvelables, mais

aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent les énergies renouvelables aux énergies propres, mais il faut a priori les distinguer bien que certaines énergies soient renouvelables *et* propres.

La plupart des énergies renouvelables (sauf l'énergie marémotrice) ont pour origine l'énergie nucléaire naturelle du soleil (par fusion nucléaire) ou de la Terre (par désintégration naturelle des roches de la croûte terrestre).

Le pétrole ou le gaz naturel ne sont pas des énergies renouvelables car il faudrait des millions d'années pour reformer la quantité d'énergie fossile que l'on consomme actuellement. De même, l'énergie nucléaire n'est pas une énergie renouvelable car la réserve d'uranium disponible sur terre est limitée.

La recherche et le développement dans le domaine des énergies renouvelables ont été sévèrement entravés dans beaucoup de nations par l'attribution d'une fraction minuscule des budgets sur l'énergie, avec les sources d'énergie conventionnelles qui continuent à se tailler la part du lion. D'après l'Agence internationale de l'énergie, seulement 7,7% des aides publiques de pays membres sont allées aux énergies renouvelables de 1987 à 2002.

Dans le domaine propre de l'énergie, plusieurs problèmes majeurs ne semblent pas recevoir l'effort de recherche qu'ils méritent et nous recommandons d'y consacrer un effort prioritaire:

1. Les éoliennes actuelles sont capables de produire des puissances de plusieurs MW. L'acceptabilité de leur implantation n'est pas toujours acquise. Cette objection s'applique moins pour des sites en haute mer, mais le coût augmente alors considérablement. Leur principal problème concerne les périodes d'indisponibilité, qui nécessitent de disposer d'une capacité de production en réserve par une centrale. Cette production pourrait être un complément intéressant jusqu'à 10 ou 15 % de la fourniture d'électricité. Au-delà, elle pose le problème du stockage saisonnier de l'énergie.

2. Parmi les biomasses envisagées, l'utilisation des ressources forestières pourrait recevoir un plus grand développement, sans entrer en compétition avec les cultures vivrières. Des recherches complémentaires seraient souhaitables pour étudier la préparation de gaz de synthèse à partir de la biomasse lignocellulosique, permettant ensuite la synthèse sélective de carburants. La production de biocarburants à partir de cultures dédiées est par nature limitée, car elle occupe préférentiellement des terres arables et nécessite un apport d'énergie substantiel pour l'exploitation et la fabrication du carburant, notamment en cas d'une culture intensive. Une analyse comparative devrait être menée avec d'autres types d'allocation des

sols: alimentation humaine, peuplements forestiers, etc., incluant un bilan de la consommation d'énergie pour la culture, comparée à l'énergie produite. Dans cette voie, il faudrait chercher à valoriser le plus possible le carbone des plantes.

3. Dans les zones rurales et isolées des pays en développement, une quantité - même faible - d'électricité photovoltaïque permettrait de satisfaire les besoins de première nécessité, tels que : éclairage, pompage d'eau potable, stockage des produits alimentaires , alimentation de petites antennes médicales, rupture de l'isolement des populations (enseignement). Des avancées sur les matériaux permettraient d'abaisser le coût des capteurs solaires. Ce problème concerne près de 2 milliards d'habitants qui ne sont pas reliés à un réseau électrique (et ne le seront peut-être jamais). Il relève autant du devoir humanitaire et de l'éthique que de la science et de la technique.

4. Le stockage temporaire de l'électricité serait une véritable percée. En effet, les énergies nucléaire, éolienne ou solaire - qui ne produisent pas de CO₂ - ne se prêtent guère au stockage d'énergie en grandes quantités. Les dispositifs indirects de stockage massif par voie hydraulique (barrages utilisés en sens inverse) sont vite saturés. On est actuellement très limité par les batteries, malgré les progrès réalisés. Le stockage de l'électricité permettrait de donner un plus grand développement aux énergies intermittentes, éolienne ou photovoltaïque. D'une façon générale le stockage de l'énergie, quelle qu'en soit la forme (électricité, hydrogène, chaleur) aura un rôle central à jouer pour remplacer celui joué implicitement jusqu'ici par le stockage du pétrole ou du gaz. Bien que peu évoqué dans les priorités, il s'agit là d'un problème de grande importance dont la solution est loin d'être évidente. Actuellement, la vision politique de production d'énergie et son stockage n'est pas encore pris en charge à sa réelle valeur, malgré une certaine conscience de la gravité des phénomènes. Pour que la transition (ou la rupture) ne soit pas brutale et douloureuse, un processus de recherche fondamentale et de développement technologique doit être amorcé dès maintenant, dans tous les domaines de production, de stockage et de l'usage de l'énergie, moyennant un important effort supporté par de grands programmes de recherche.

1.3- Évolution et limites et de l'utilisation de l'énergie renouvelable

Depuis 100 ans, on avait vu quelques inventeurs réaliser des chaudières solaires, distiller de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre dans des châssis couverts d'un vitrage et exposés au soleil. A partir des années 1930 on a vu apparaître dans le commerce des chauffe-eau solaires captant de l'énergie au moyen de capacités très minces en tôle, peintes extérieurement en noir et placées sur des châssis calorifugés et couverts d'un vitrage. C'est

surtout depuis 25 ou 30 ans que dans certains pays les recherches ont été plus ou moins poussées dans des directions différentes. Maintenant il y'a une activité croissante dans ce domaine dans plusieurs universités et instituts spécialisés, centres de recherche, dans certains milieux industriels et au sein des associations de spécialistes.

Cependant la technologie solaire n'est encore qu'en voie d'élaboration et continue plus ou moins sur certains points, de balbutier. On ne dispose pas toujours de détails sûrs et précis dans le domaine technologique. Il est très difficile de faire une synthèse des connaissances acquises et des efforts exercés dans les milieux divers pour faire progresser l'hélio technique, mais il est possible de faire dans les grandes lignes un inventaire des utilisations actuelles et prévisibles de l'énergie solaire.

1.4- Le stockage de l'énergie renouvelable.

Le stockage de l'énergie est un moyen important pour l'optimisation des systèmes énergétiques générant et utilisant la chaleur. Ces dernières années diverses études sur le stockage thermique ont été menées dans le but d'élaborer et de compléter les éléments technologiques et économiques nécessaires à son développement.

Le stockage de l'énergie est une exigence fondamentale pour la rentabilisation de tout système énergétique actif. Il existe différent types de stockage, plus ou moins efficaces, nécessitant des techniques diverses et mettant en œuvre des technologies de plus en plus élaborées mais dont le coût reste la principale pierre d'achoppement. On énumère, dans le paragraphe suivant, les principales d'entre elles.

1.5- Types de stockage de l'énergie :

Divers procédés de stockage de l'énergie solaire sont sujets à recherche dans de nombreux laboratoires dans différents pays, parmi lesquels on énumère:

- le stockage hydraulique.
- le stockage par voie chimique.
- le stockage par voie photochimique.
- le stockage au moyen des volants d'inertie.
- le stockage thermique (sujet de notre travail).

1.5.1- Le stockage hydraulique.

Dans une centrale hydroélectrique, on peut se servir de l'excédent de l'énergie électrique disponible aux heures creuses, par son stockage en pompant de l'eau vers des réservoirs, afin de subvenir aux besoins de consommation d'électricité aux heures de pointes. Ce système d'accumulation d'énergie peut être utilisé dans des régions ayant un taux pluviométrique élevé.

1.5.2- Systèmes de stockage chimique

Par stockage chimique, on entend les systèmes où un élément est décomposé sous l'effet d'un apport de chaleur, après quoi les produits de la réaction sont séparés puis stockés, ce qui en principe ne pose aucune limite dans le temps. Pour rendre l'énergie à nouveau disponible, il suffit de faire réagir les produits de la décomposition pour reconstituer les éléments originaux suivant une réaction exothermique. Ces systèmes en sont encore actuellement au stade de la recherche. Le stockage de grandes quantités d'électricité avec des accumulateurs électrochimiques géants n'a jamais été réalisé. Les accumulateurs électrochimiques sont généralement chers, ont une durée de vie limitée et posent des problèmes de pollution (métaux lourds) lors de leur fin de vie. Par contre, de nombreux systèmes domestiques déconnectés du réseau de distribution d'électricité sont basés sur l'utilisation de batterie d'accumulateurs ou de piles. En pratique, elles sont utiles pour les petits appareils électroménagers et, sur les véhicules automobiles comme producteur annexe d'énergie. Les condensateurs de moyenne et grosse capacité, dit condensateurs chimiques, sont une autre utilisation des couples électrochimiques pour stocker de l'énergie. Leur utilisation est très courante dans les appareils et machine électriques avec ou sans électronique embarquée.

Le faible rendement et le coût relativement élevé de ce mode de stockage limitent sa généralisation et conduit à l'apparition de batteries en plomb quatre ou cinq fois plus légères que les batteries classiques, donnant une chance meilleure au stockage de l'énergie obtenue à partir des générateurs solaires.

1.5.3- Le stockage par voie photochimique.

La photochimie est une science physico-chimique très récente. Ainsi, A. Simon, 2001 [2] a considéré la photochimie comme "une physique et une chimie des états excités produits par voix optique"

L'état excité est représenté par une molécule qui contient un excédent d'énergie. Le schéma énergétique utilisé par les photochimistes peut être très complexe si l'on envisage toutes les possibilités de réactions ou de dissipation d'énergie à partir des états excités. La photochimie a suffisamment progressé durant ces dernières années pour qu'on puisse sérieusement envisager des applications dans le domaine du stockage de l'énergie solaire.

1.5.4- Stockage sous forme d'énergie cinétique

Le procédé mécanique de stockage de l'énergie réalisé par rotation d'un certain nombre de "volants d'inertie" spécialement bien conçus, apparaît très original et intéressant. La plupart des prototypes de volants d'inertie connus jusqu'à présent sont en acier, qu'ils soient américains, européens ou japonais et leur capacité de stockage ne peut jamais dépasser les 50Wh /kg.

Il s'agit de stocker l'énergie sous forme cinétique sur un disque lourd (Stockage par volant d'inertie). Le disque lourd tournant est actionné par un moteur électrique, qui agit en tant que générateur lorsque l'on a besoin d'énergie, ralentissant le disque et produisant l'électricité, le frottement doit être minimum pour éviter les déperditions. C'est possible en plaçant le volant dans le vide et sur des paliers à lévitation magnétique, systèmes rendant la méthode très chère. De plus grandes vitesses de volant permettent une plus grande capacité de stockage mais exigent des matériaux ultra résistants pour résister à l'éclatement et éviter les effets explosifs d'une panne du système, au cours de laquelle l'énergie cinétique de rotation serait convertie en énergie cinétique de translation (autrement dit : une bombe...)

En pratique, ce type de stockage est d'un usage très courant mais il se limite pratiquement aux « volants d'inertie » au sein des appareils de production d'énergie, qui opèrent un lissage à très court terme pour régulariser la fourniture. C'est notamment le cas de tous les moteurs thermiques, surtout des moteurs turbo Diesel dont les à-coups sont importants.

Il y a déjà plusieurs décennies que des autobus urbains ont fonctionné avec un volant d'inertie disposé à plat sous le plancher. Ce système permet de faire plusieurs kilomètres sans pollution et en silence avant une "recharge", qui s'effectue lors des arrêts prolongés de quelques minutes dans les stations équipées à cet effet. A l'époque, la relance de l'unique gros disque se faisait par un système pneumatique ou par un moteur électrique disposé dans la chaussée. La taille, le poids de l'équipement, la complexité d'utilisation et le prix particulièrement bas de l'énergie, ainsi que l'effet gyroscopique qui déséquilibrait les véhicules ont stoppé leur utilisation. L'évolution technique remet ce système au goût du jour.

L'utilisation de deux disques contrarotatifs plus légers mais tournant à très grande vitesse, grâce à de nouveaux matériaux plus résistants, et lancés par un moteur électrique intégré, permet une nette amélioration du rapport poids à vide/charge utile. Ceci permet également une utilisation dans les villes en pente, où le poids est encore plus pénalisant. À noter que le rendement de ce système, appelé parfois "batterie mécanique", est supérieur à l'utilisation d'accumulateurs chimiques.

Un projet "super volant d'inertie", étudié à l'université américaine par VELRADJ R. et al, 1999 [3] prévoit l'utilisation d'un matériau composite, plus léger que l'acier et permettant de stocker cent fois plus d'énergie que les prototypes mentionnés plus haut. Mais ces super volants ont des dimensions importantes. On cherche actuellement à concevoir des volants d'inertie ayant une grande capacité de stockage de l'énergie et moins volumineux.

1.6- Energie solaire

L'utilisation thermique de l'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses avantages propres, à savoir:

1)- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. La main d'œuvre ne nécessite aucune formation complémentaire.

2)- Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.

3)- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de fonctionnement sont cependant relativement faibles.

Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène.

Les performances actuelles des procédés solaires thermiques les situent à un niveau concurrentiel par rapport aux systèmes photovoltaïques ou aux procédés utilisant d'autres énergies. La conversion en électricité est par exemple obtenue avec un rendement annuel moyen voisin de 14% pour des installations de fortes puissances munie d'un stockage thermique, sous un ensoleillement de 2200 kWh/m²/an et mettant en oeuvre des cycles thermodynamiques conventionnels. L'utilisation de cycles à plus hautes températures plus performants aux puissances élevées ou la mise en oeuvre de cycles combinés à haut rendement, laisse envisager de dépasser à moyen terme le seuil de 25% de rendement annuel moyen. Les possibilités d'hybridation des installations solaires à concentration avec des systèmes conventionnels de production de chaleur dégagent des perspectives de stratégies de transition qui permettraient d'atteindre à brève échéance les seuils de compétitivité économique nécessaires au développement industriel de ces filières. L'exemple des centrales américaines SEGS5 est, à ce titre, tout à fait édifiant. Ces centrales solaires, exploitées industriellement dans le désert de Mojave en Californie depuis plus de 20 ans, représentent une capacité totale installée de 354 MW.

Elles mettent en oeuvre la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques, la plus économique et la plus robuste actuellement. Un fluide caloporteur, à fort coefficient de transfert thermique et à forte capacité calorifique, circule dans le récepteur tubulaire et récupère l'énergie solaire sous forme de chaleur à une température de l'ordre de 350°C. La chaleur, stockée au besoin dans des réservoirs de stockage de fluide, est ensuite délivrée à une boucle de production d'électricité conventionnelle, un cycle de Rankine en l'occurrence. Un apport de chaleur par combustion de gaz naturel, limité à 25% de l'énergie totale, assure la continuité de la production d'électricité en période de faible ensoleillement sans recourir à un énorme stockage thermique qui serait trop onéreux.

L'exploitation de ces centrales a permis de réaliser des progrès significatifs et le rendement annuel moyen est passé de 8% en 1985 à 14% aujourd'hui. De même, l'expérience accumulée a permis de faire baisser les coûts d'exploitation et de maintenance ainsi que les coûts des concentrateurs.

Les progrès des centrales solaires réalisés sur la période 1985-2000 pour la production de l'énergie thermique, obtenus grâce aux efforts de chercheurs en Allemagne, en Espagne et aux USA ont enregistré un grand pas qui est complété par d'autres études pour le stockage de l'énergie excédentaire (dont notre recherche).

1.7- Installations solaires

De nos jours l'exploitation de l'énergie solaire à l'aide de capteurs thermiques est techniquement au point et économiquement rentable dans le cas de grandes installations. Les capteurs solaires sont avant tout utilisés pour la production d'eaux chaudes dans les habitations, locatives ou villas, les centres sportifs, les hôtels et l'industrie. De grandes installations servent également au chauffage de piscines et au séchage du foin. Du fait de sa grande fiabilité et de son rendement pouvant atteindre 85%, une installation solaire thermique peut être un bon complément à une installation traditionnelle, on distingue alors:

1.7.1- Les installations pour la préparation d'eau chaude sanitaire

Le préchauffage de l'eau chaude sanitaire est une des applications les plus économiques du solaire. Selon les calculs effectués par « Info énergie », les installations peuvent être normalement amorties dès que la consommation dépasse 1000 litres d'eau chaude par jour, ce qui est le cas de tout locatif, hôtel ou centre sportif ouvert en été.

Pour des maisons unifamiliales le prix d'une installation solaire peut être légèrement plus élevé, mais une telle installation ne présente aucun risque technique. Comme il est difficile d'assurer la totalité de la production d'eau chaude par le solaire, particulièrement en hiver, les installations sont usuellement dimensionnées de manière à fournir le 100% des besoins en été ce qui conduit à un taux de couverture solaire annuel de 40 à 70 % selon les régions. On évite ainsi de gros stocks saisonniers, mais il faudra par contre prévoir un appoint pour l'hiver et les périodes de mauvais temps (stockage saisonnier). On compte usuellement une surface de captage de l'ordre de 1 m² par personne pour les locatifs et de 1,5 à 2 m² par personne dans les maisons unifamiliales (ces surfaces concernant les capteurs vitrés, pour des capteurs non vitrés, compter le double). Une grande partie des installations construites en Suisse par exemple sont des installations combinées pour le chauffage et la préparation d'eau chaude. Il faut néanmoins être conscient du fait que ce type d'installation produit une énergie relativement chère et n'est pas économique dans les conditions actuelles.

Par contre une telle installation peut fournir une part importante de l'énergie thermique nécessaire, voire même toute cette énergie, si elle comporte un stock saisonnier. L'application du solaire la plus "raisonnable" reste donc le préchauffage de l'eau chaude sanitaire.

1.7.2- Les installations pour des applications plus étendues

Actuellement plusieurs instances s'appliquent à optimiser les processus de conception, dimensionnement et planification des installations solaires, en se basant notamment sur les expériences faites avec des installations existantes. Concevoir et dimensionner une installation solaire est en effet une tâche demandant de grandes compétences à part pour le cas des installations de préchauffage de l'eau chaude sanitaire il n'existe pas de recette toute faite. Il faut à chaque fois trouver le meilleur compromis entre le prix du kWh, le rendement de l'installation, le besoin en énergies fossiles (ou le taux de couverture solaire), l'énergie grise nécessaire pour la construction de l'installation et les vœux et possibilités du Maître de l'Ouvrage. Les exemples suivants donnent une idée des installations possibles:

- Installations solaires autonomes, avec stockage saisonnier: une telle installation ne comprend pas d'appoint, mais a besoin d'un immense stock. Dans diverses installations pilotes ce stock a été placé au centre du bâtiment, de manière à ce que ses pertes contribuent au chauffage de ce dernier.
- Installations de préchauffage solaire: l'installation dispose de deux stocks connectés en série. Le premier est chauffé par l'énergie solaire, le deuxième est à un niveau de température plus élevé par du gaz, du mazout ou éventuellement par de l'électricité. L'avantage d'une telle disposition réside dans le fait que les capteurs travaillent toujours à basse température, ce qui augmente leur rendement, alors que le rendement de l'appoint est quasiment indépendant de la température.
- Installations combinées avec un chauffage traditionnel, à mazout, à gaz ou à bois: une telle combinaison doit être bien réfléchi afin d'avoir un rendement qui soit raisonnable. Il faudra en particulier gérer correctement les divers niveaux de température nécessaires, par exemple eau chaude et chauffage à basse température. La température de retour influence le rendement tant des capteurs que des chaudières. La plupart des ingénieurs et installateurs manquent encore d'expérience avec ce type d'installation, puisque ces dernières années on s'est avant tout concentré, pour des raisons économiques, sur les pures installations de préchauffage de l'eau chaude sanitaire. Mais il faudra bien qu'un jour on fasse un pas de plus.
- Installations combinées avec une pompe à chaleur: en été les capteurs solaires travaillent seuls, en hiver ils sont appuyés par la pompe à chaleur. La conception et

le dimensionnement d'un tel système sont délicats, le coefficient de performance d'une pompe à chaleur étant très sensible aux divers niveaux de température.

Le problème fondamental que rencontrent de telles installations de chauffage solaire est le fait que l'offre solaire est déphasée par rapport à la demande de chauffage: c'est en hiver que l'on a le plus besoin d'énergie, au moment où il y a le moins de soleil. Des systèmes de chauffage solaire doivent donc comprendre un stock de chaleur qui peut être important.

1.8- Limites de l'énergie solaire.

Les variations, en un lieu donné, du flux solaire, tantôt nul, tantôt surabondant, compliquent notablement son utilisation. Il convient de distinguer deux types de variations : les unes liées au mouvement apparent du Soleil provoquent les modulations diurne et annuelle, parfaitement prévisibles à partir des données astronomiques; les autres, dues aux circonstances météorologiques, ont un caractère beaucoup plus aléatoire. Pour régulariser la disponibilité de l'énergie solaire, s'impose une solution évidente sinon facile à mettre en œuvre, c'est le stockage de l'énergie thermique.

L'énergie solaire thermique active a toutefois certaines limites:

- Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations.
- C'est une énergie diffuse. La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).

1.9- Stockage de l'énergie solaire (thermique).

On admet souvent, bien à tort, que le stockage de l'énergie solaire est très difficile, sinon impossible en grandes quantités. Parfois il faut installer des réservoirs d'eau de très grande dimension, ou l'accumulation de la chaleur dans les cavités rocheuses, ce qui est difficile à réaliser pratiquement.

Si l'on opte pour le stockage de l'énergie solaire sous forme d'électricité, il faut prévoir un nombre important de batteries d'accumulateurs électriques. Par conséquent, nous constatons que les modes de stockage mentionnés ci-dessus ne sont pas économiques. Ce qui nous incite à chercher d'autres alternatives.

La conversion biologique de l'énergie solaire par voie photosynthèse et son stockage indirect sous forme de combustible fossile exploité actuellement est un exemple concret d'un processus naturel qui date depuis que la vie existe sur terre. L'action du rayonnement solaire sur les eaux marines et continentales produit de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, dont la chaleur latente est d'environ 600 cal/g, et qui sera cédée quand la vapeur se condense; Cette condensation est à l'origine des nuages, des pluies et des orages. En particulier, le remplissage des barrages réservoirs par les pluies est un maillon de la chaîne qui va de l'énergie solaire à l'énergie hydraulique utilisée pour actionner les turbines, et de ce fait, un barrage réservoir est un véritable accumulateur d'énergie.

1.10- Systèmes de stockage thermique

Les systèmes de stockage thermique peuvent être classés comme suit :

1. Stockage par chaleur sensible.
2. Stockage par chaleur latente d'un changement de phase du matériau de stockage.

On peut concevoir les systèmes de stockage à court terme ou à long terme, ils se différencient essentiellement par la taille des installations prévues.

Le stockage à long terme (par exemple, le stockage inter saisonnier) est rarement rentable car un problème d'emmagasiner de l'énergie à long terme est posé.

Dans le cas du stockage sous forme de chaleur sensible, une matière (le plus souvent de l'eau, des pierres ou une huile thermique) est portée à une température plus élevée chaque fois qu'il se produit un excédent de chaleur, et refroidie lorsque nécessaire. Dans ces systèmes, on a toujours besoin d'un réservoir et aussi le plus souvent d'une surface d'échange. Le prix de revient de ces éléments est généralement le facteur qui limite son application économique.

Le stockage de chaleur à base de chaleur latente peut se faire à l'aide d'une matière qui passe d'une phase à une autre (par exemple solide-liquide) et exige pour ce faire un grand apport de chaleur dans un sens, tandis que la transformation inverse libère une grande quantité de chaleur. Si on choisit avec soin la température de fusion de la matière utilisée, la capacité thermique d'un stock à changement de phase par unité de volume peut être sensiblement plus élevée que dans les systèmes de stockage à eau ou à lit de pierres.

1.11- les caractéristiques d'un système de stockage thermique.

C'est à partir de l'analyse de l'étude faite par Despois, J. et Nougrède, F. 1977 [4], qui nous donne une idée générale sur le principe du stockage thermique souterrain, que nous entamons notre étude de stockage thermique dans le sol. La méthode la plus pratique actuellement est le stockage thermique à cycles thermodynamiques réversibles afin d'assurer la récupération de cette énergie sous une autre forme (par exemple: énergie mécanique.)

Un système de stockage doit disposer des caractéristiques thermique sont suivantes:

- Sa capacité calorifique par unité de volume ou de poids.
- L'intervalle de températures dans lequel le système opère.
- Les moyens d'addition ou de récupération de la chaleur et la différence de températures associée à l'opération.
- La stratification de la température dans l'unité de stockage.
- La puissance nécessaire pour l'addition ou la récupération de la chaleur.
- Les structures et éléments associés au système de stockage (containers, réservoirs, etc.)
- Les moyens de contrôle des pertes de chaleur du système de stockage.
- Les coûts.

Un grand intérêt a été porté à la recherche dans cette direction afin de mieux développer le stockage de la chaleur à très haute température (1000°C à 1200°C). Les températures recherchées sont, selon les cas:

- Environ 3500°C pour les fours à très hautes températures.
- De 200 à 500°C pour les chaudières et le chauffage industriel à moyenne ou haute température.
- Au moins 90°C pour la distillation de l'eau de mer.
- En général 80°C pour le chauffage central.
- Entre 60 à 70°C pour la distribution domestique d'eau chaude.
- Environ 40°C pour le chauffage par rayonnement.
- Environ 25°C pour le chauffage d'eau d'une piscine.

Dans les fours solaires, on réalise une concentration importante du rayonnement, généralement obtenue au moyen de miroirs paraboliques et dans ceux à hautes températures, on sépare en deux la fonction de captation du rayonnement solaire, de façon à obtenir un

système à foyer fixe, pour cela, on dispose d'un dispositif à orienteur mobile, comportant une ou plusieurs surfaces planes réfléchissant les rayons solaires (dans une direction) sur un miroir parabolique fixe, qui concentre le rayonnement solaire vers une zone d'utilisation située autour du point focal du paraboloïde. Cependant pour certaines applications on peut installer une seule surface réfléchissante pour capter et concentrer le rayonnement solaire; dans ce cas, l'appareil doit être constamment dirigé vers le soleil et c'est en particulier un tel système qui a été appliqué pour l'héliodyne installé à Bouzaréah en 1949 par Maurice Touchais de l'institut d'énergie de l'Université Française d'Alger.

On peut aussi faire du stockage thermique avec de la vapeur à haute pression, mais celle-ci ne peut être utilisée pratiquement qu'en dessous de 600°C pour des raisons technologiques.

- Pour les unités électro-solaires à conversion thermodynamique il faut prévoir les divers types suivant de stockage dans le temps:
- Un stockage de courte durée (une à deux heures), pour une récupération de la puissance étalée le long de la journée (de 15 à 24 heures).
- Un stockage pour la fourniture de l'énergie aux heures de pointes, permettant une réduction de la consommation pendant quelques jours pour être utilisé en fin de semaine, ou bien permettant de remédier à l'absence d'ensoleillement durant une courte période.
- Un stockage saisonnier, en prévision des longues périodes sans ensoleillement.

1.12- Le stockage thermique dans le sol (souterrain).

La chaleur, utilisable directement pour le chauffage ou indirectement pour la production de l'énergie mécanique, était jusqu'à maintenant principalement fournie par la combustion. La chaleur potentielle contenue dans les combustibles est considérable. En outre, les chaudières sont des installations relativement coûteuses. On a donc intérêt à se procurer le combustible et à calculer les foyers et les chaudières en fonction des besoins de pointe. Ceci est aussi vrai pour un petit chauffage d'un appartement que pour une centrale électrique.

La recherche d'économie de combustibles fossiles conduit à adopter des sources de chaleur nouvelles, nécessitant des investissements coûteux, (énergie nucléaire par exemple), ou fonctionnant sous des contraintes sévères, telles qu'un horaire de production imposé

(énergie solaire, récupération de la chaleur industrielle perdue). Ce qui mène à se pencher sur des alternatives de substitution à bon marché et leur stockage principalement.

Le stockage de l'énergie solaire dans le sol est jugé comme étant le plus pratique. Ce mode continue d'être étudié. Dans ce cas, la chaleur peut être transportée par un fluide (souvent liquide) et accumulée dans des empilements de matériaux réfractaires (par exemple: sol, sable, béton, roche, pierres etc.), à partir desquels on restitue la chaleur emmagasinée, durant les périodes sans ensoleillement. On peut aussi utiliser des tubes enterrés dans lesquels circule le fluide (liquide), la chaleur est ainsi transmise au sol (aux matériaux) où elle sera emmagasinée. Elle peut être ensuite récupérée par un liquide arrivant à basse température (en inversant le gradient de températures) pour diverses utilisations:

- Chauffage de l'eau.
- Chauffage des habitations.
- Climatisation.
- Production du froid et de la glace.
- Dans le domaine agricole.

Pour le chauffage domestique solaire, il y'a des systèmes d'accumulation de la chaleur dans des murs en béton (maisons solaires du CNRS en France), ou dans des matériaux divers (plusieurs tonnes de pierres dans des réalisations américaines), ou encore dans des réservoirs d'eau chaude.

Les critères du choix des matériaux accumulant de l'énergie sont les suivants:

- une chaleur de fusion très grande.
- un matériau qui limite considérablement le volume de stockage nécessaire.
- une chaleur spécifique très grande.
- la température de fusion qui doit être en harmonie avec le cycle thermodynamique choisi.
- la conductibilité thermique à l'état solide des matériaux.

Ces critères de choix, ci-dessus, sont cités ici par ordre d'intérêt décroissant. On peut retenir aussi une stabilité chimique excellente à la température de fonctionnement et une masse volumique élevée.

1.13- Le milieu souterrain

Houpeurt, A. 1975 [5], donne une idée sur les problèmes qui se posent pour étudier les milieux souterrains des points de vue mécanique et thermique car il est indéniable que les problèmes pratiques qui sont généralement rencontrés sont très différents selon la nature du milieu qui constitue le domaine souterrain. On distingue habituellement:

- le milieu finement divisé,
- le milieu discontinu.

Nous entendons par milieu finement divisé tout milieu où la distinction entre les pleins et les vides ne peut se faire qu'à l'échelle microscopique. Entrent ainsi dans cette catégorie le milieu poreux constituant une très grande partie des aquifères, mais également le milieu finement fissuré qui renferme également une part non négligeable des disponibilités en eau.

A l'opposé, la description du milieu discontinu tendra à opérer une distinction nette entre la matrice rocheuse et les vides éventuellement occupés par l'eau, ce sera le cas du milieu peu fissuré et des systèmes karstiques.

Une grosse difficulté s'élève dès à présent à la limite entre les deux domaines finement divisé et discontinu. En effet, si l'on peut dire que l'hydrogéologie quantitative offre, à l'heure actuelle, des méthodes opérationnelles pour l'étude des milieux poreux ou des systèmes karstiques, il n'en est pas de même pour le milieu fissuré où le modéliste se trouve relativement désarmé. La raison tient évidemment aux difficultés théoriques, mais également à la demande restée, jusqu'ici, assez faible à cause d'un moindre intérêt accordé jusqu'à présent à ce mode de gisement de l'eau souterraine.

Le milieu finement divisé pour lequel la prospection de la ressource en eau est plus aisée a retenu tout d'abord l'attention des hydrogéologues. La division du milieu peut être due soit à une porosité d'interstices (sables, grès, dolomies, ...), soit à une porosité de fissure (calcaires compacts, roches cristallines, roches cristalloyphyllics), suivant l'aptitude que présente un tel milieu à la circulation des fluides.

Parmi les problèmes qui se posent en matière d'hydrologie, certains sont d'ordre purement hydrodynamique et requièrent la mise en oeuvre de modèles dits quantitatifs, d'autres plus complexes font intervenir des variables de qualité de la ressource en eau et sont dits

qualitatifs. La distinction entre ces deux catégories n'a pas en réalité de sens physique; seul les distingue le degré de conceptualisation auquel il est fait appel pour la représentation des phénomènes. Les modèles adaptés à ces types d'étude sont généralement très conceptuels et basés sur les relations phénoménologiques de la mécanique des fluides appliquées à des structures pouvant approcher la réalité de manière complexe. Dans d'autres cas, le modèle souterrain ne sera qu'un élément d'un modèle plus général et simple et il sera approprié de sacrifier une partie de la conceptualisation au profit d'un allègement des calculs.

L'aspect qualitatif associé à l'écoulement la migration de substances accompagnant l'eau dans son mouvement. Ces phénomènes, souvent très délicats à modéliser car ils combinent les aspects hydrodynamiques et physico-chimiques, concernent les problèmes suivants:

- pollution des aquifères: question complémentaire de l'étude de la ressource en eau, évolution naturelle de la qualité de l'eau, impact des aménagements, protection des eaux souterraines contre la pollution des aquifères;
- stockage en milieu souterrain: stockage temporaire des hydrocarbures, évacuation définitive des déchets industriels ou radioactifs;
- transfert de chaleur en aquifère: exploitation des ressources géothermiques, stockage de la chaleur dans le sol.

Les modèles décrivant ces mécanismes de transfert auront a priori un niveau de conceptualisation élevé. Il convient cependant de noter que les relations phénoménologiques explicatives demeurent encore assez mal connues et que les paramètres sont, en général, d'une acquisition difficile. Un effort particulier doit être entrepris dans cette voie.

1.14- Zone saturée et zone non saturée dans les milieux souterrains

Dans les milieux souterrains et au-dessous de la surface du sol, deux zones peuvent être identifiées de haut en bas, Fig. (1) :

- la zone non saturée, système à trois phases (solide, liquide, gaz) ou seule une partie des espaces lacunaires sont remplis d'eau, le reste étant occupé par l'air du sol,
- la zone saturée, système à deux phases (solide, liquide) où tous les pores sont remplis d'eau.

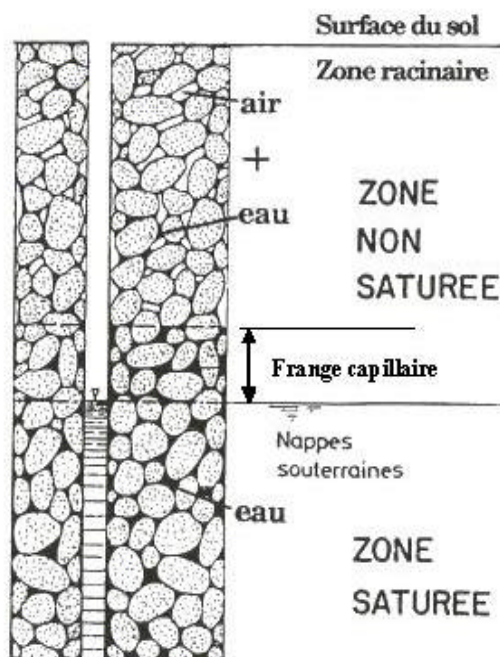


Fig. (1) - Zone non saturée et zone saturée dans un milieu souterrain.

La distinction fondamentale entre la zone saturée et la zone non saturée réside dans le comportement hydrodynamique de l'eau, dû à l'effet de l'air et se traduit notamment par une conductivité hydraulique différente. Cependant, les zones saturées et non saturées ne sont pas des domaines séparés, mais font partie d'un système d'écoulement continu.

1.15-Characteristiques thermique du sol

Le sol est un milieu non homogène constitué de différents matériaux solides contenant parfois des gaz et de l'eau tandis que les couches souterraines peuvent contenir des matériaux de nature organique. La composition spécifique du sol dépend généralement de la position géographique et de la profondeur considérée.

L'évaluation des caractéristiques thermiques du sol est très complexe et une grande partie reste insaisissable jusqu'à présent car elles ne sont pas constantes et changent avec la variation des différents paramètres (humidité, température, composition chimique, propriétés physiques du milieu, profondeur, etc.). Le stockage de la chaleur dans le sol dépend généralement de sa capacité thermique, et la propagation de la chaleur dans ce milieu dépend de sa conductivité thermique. Il est souvent difficile de trouver le coefficient de transfert de chaleur dans la littérature. Un recours à l'expérience pour l'évaluer s'impose à chaque fois (après la variation d'un paramètre quelconque).

1.15.1- Capacité calorifique

La capacité thermique c_s d'un sol s'exprime par une moyenne pondérée des capacités calorifiques respectives de ses constituants (minéraux, matière organique, air, eau) :

$$c_s = \sum_i x_i r_i c_i$$

où c_i , r_i , c_i représentent respectivement la teneur (en m^3/m^3 total), la masse volumique et la capacité calorifique d'un des constituants.

Ainsi, comme l'eau et la matière organique se distinguent par une capacité calorifique supérieure à celle des éléments minéraux, un sol humide emmagasinera mieux la chaleur qu'un sol sec, effet parfois utilisé pour accroître la performance d'échangeurs air/sol (Alvarez et al., 1992[6]).

Soit dit en passant, ce phénomène a également son importance en agriculture, où le réchauffement printanier d'un sol sera d'autant plus lent que sa teneur en eau et sa teneur en matière organique seront élevées. Par ailleurs, pour un sol sec, ce réchauffement sera d'autant plus rapide que sa porosité est grande. Ces quelques considérations soulignent l'intérêt d'un drainage efficace à la sortie de l'hiver, un réchauffement accéléré du sol permettant en effet un démarrage plus précoce des cultures et allongeant d'autant la période végétative, ce qui favorise le développement des plantes.

1.15.2- Conductivité thermique

Par ailleurs, la conductivité thermique d'un sol dépend non seulement de sa composition (teneur en matières minérales et organiques, dont on trouve les coefficients de conductivité dans le Tableau 1), mais également de l'arrangement et de la forme de ses particules constitutives, des liaisons entre ces particules (ponts d'eau), ainsi que de sa teneur en air (faiblement conducteur). Le sol apparaît ainsi comme conducteur de chaleur d'autant meilleur qu'il est humide (Fig. 2), effet qui se cumule au précédent et milite, lorsque c'est possible, pour l'humidification d'un sol utilisé dans un échangeur air/sol [6].

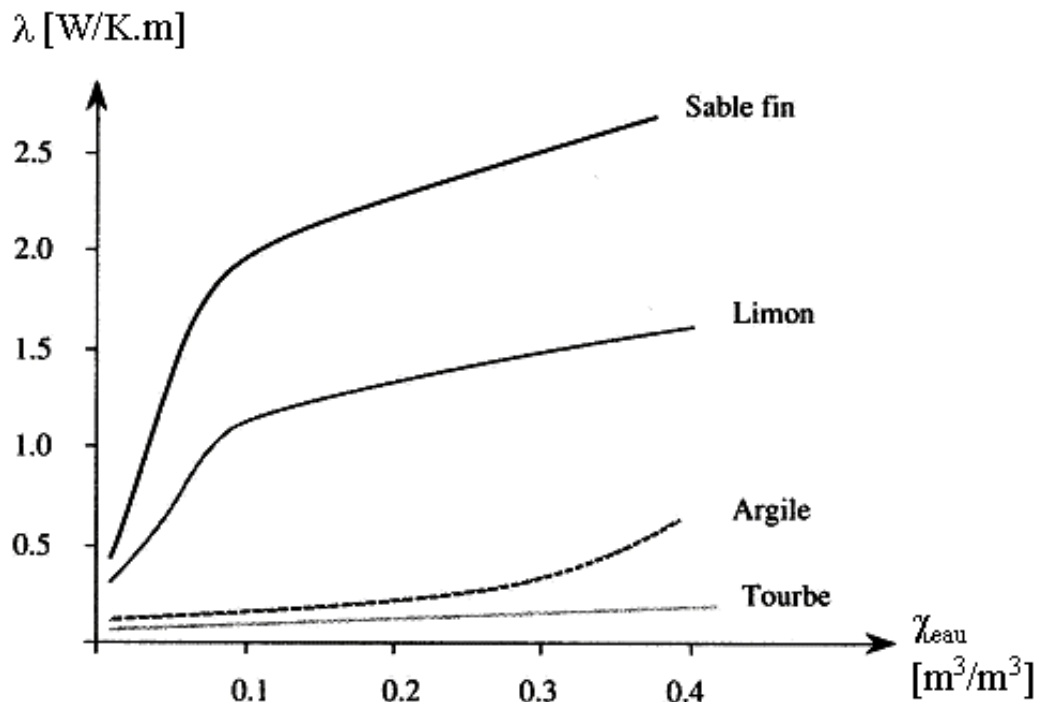


Fig. (2) : Conductivité thermique de quelques sols en fonction de la teneur en eau (Musy et Soutter, 1991[9]).

matière	masse volumique r , kg/m^3	cap. calorifique c , kJ/K.kg	cap. calor. vol. rc , MJ/K.m^3	conductivité I , W/K.m
minéraux (moyenne)	$2.65 \cdot 10^3$	0.80	2.10	2.90
matière organique	$1.30 \cdot 10^3$	1.90	2.47	0.25
eau	$1.00 \cdot 10^3$	4.20	4.20	0.585
glace	$0.92 \cdot 10^3$	2.10	1.93	2.20
air	$1.25 \cdot 10^3$	1.00	1.25	0.023

Tableau. (1) : Propriétés thermiques des principaux constituants d'un sol (Musy et Soutter, 1991[9]).

1.16-Température du sol

D.Aston, 1973 [7], montre que la connaissance de la répartition des températures dans les couches intérieures du sol a une grande importance pratique. Cette connaissance est utile non seulement aux chercheurs qui étudient les plantes ou le sol, mais encore aux hydrologues, aux climatologues et aux ingénieurs de la construction. Les températures du sol

ont même des répercussions en météorologie, car elles reflètent les phénomènes de transfert de chaleur qui surviennent à la surface terrestre et qui jouent un rôle important dans la formation des mouvements atmosphériques.

Le sol récupère de petites quantités de chaleur des phénomènes internes biologiques et chimiques, de la radioactivité naturelle et de la conduction du noyau terrestre; cependant, presque partout dans la couche supérieure de l'écorce terrestre de quelques dizaines de mètres d'épaisseur, la plus grande partie de la chaleur provient du rayonnement et de l'échange de chaleur à la surface terrestre; c'est le rayonnement solaire qui représente la principale source d'énergie. Cet apport d'énergie peut varier considérablement selon l'emplacement, la saison, la nébulosité, la couverture végétale et la nature ou la couleur de la surface du sol.

Le besoin de connaître avec précision et exactitude les températures du sol est évident si l'on considère le grand nombre de problèmes auquel ces données peuvent s'appliquer. Il serait utile qu'un observateur vérifie les données lors de leur rassemblement afin de s'assurer que les indications sont cohérentes et compatibles avec les principes physiques qui régissent le flux de chaleur du sol.

1.17- Profil de température du sol

Le profil de la température du sol révèle les phénomènes de transfert de chaleur dans le sol. C'est une fonction du rapport de chaleur à la surface, de la conductivité thermique, de la capacité calorifique du sol et de l'évolution thermique du sol. La capacité calorifique du sol a pour effet d'emmagasiner la chaleur dans le sol, diminuant de ce fait les fluctuations de température imposées à la surface au fur et à mesure que s'accroît la profondeur. Du fait que le profil de température produit par un apport de chaleur variable à la surface dépend à la fois de la conductivité thermique et de la capacité calorifique du sol, on réunit souvent ces deux valeurs en un seul paramètre que l'on appelle diffusivité thermique. Si l'on connaît la diffusivité thermique, on peut calculer la réduction d'amplitude et le retard de phase, lorsqu'une onde de température imposée à la surface du sol descend dans une colonne étudiée de ce sol. L'amortissement de l'onde de température avec l'accroissement de la profondeur dépend de la période de l'onde; les fluctuations à courte période sont plus touchées que celles à longue période. Dans un sol typique, l'amplitude des ondes de température du cycle diurne ne vaut plus, à une trentaine de centimètres de profondeur, que le dixième de sa valeur à la surface; en revanche, l'onde représentant le cycle annuel ne subit

pareille diminution qu'à une profondeur d'environ six mètres. On pourrait utiliser les diminutions et les changements de phase observés dans les ondes de température selon la profondeur pour estimer la diffusivité thermique en des endroits particuliers. On pourrait se servir de cette diffusivité déduite pour calculer certaines données relatives à l'emplacement choisi, notamment le bilan thermique, la tendance au gel, la profondeur de pénétration du gel selon les différentes couvertures végétales et la teneur en humidité du sol.

1.18- Humidité du sol

1.18.1- Caractéristiques de la phase liquide du sol

La description quantitative de la phase liquide repose sur la notion de teneur en eau ou humidité du sol. Celle-ci varie principalement en fonction de la structure du sol et de sa porosité. Selon qu'on la rapporte à la masse ou au volume, la teneur en eau d'un sol peut s'exprimer par :

- La teneur en eau volumique ou humidité volumique : rapport du volume d'eau présent dans le sol au volume apparent de ce sol (volume de sol en place). La teneur en eau volumique varie entre une valeur minimale, la teneur en eau résiduelle, et une valeur maximale, la teneur en eau à saturation. Celle-ci est en principe égale à la porosité efficace (définie comme le rapport du volume des vides au volume total du milieu).
- Un indice de saturation, défini comme le rapport du volume d'eau au volume des pores. Cette grandeur exprime le volume des pores occupé par l'eau. Elle varie entre un minimum résiduel et la valeur de 100%.
- La teneur en eau pondérale ou humidité pondérale : quantité (masse) d'eau contenue dans un échantillon de sol, rapportée à la masse des particules de sol sec.

La teneur en eau des éléments minéraux varie généralement entre 5 et 40%. La présence de matière organique augmente cette valeur qui peut dépasser 100% (par exemple les tourbes où la teneur en eau pondérale peut atteindre 800%).

1.18.2- Influence de la teneur en eau sur les caractéristiques thermiques du sol

On a montré que la teneur en eau du sol influence le flux de chaleur et la répartition des températures dans le sol. Le phénomène inverse est aussi important: les gradients de température de sol engendrent le mouvement de l'humidité du sol, surtout dans les sols qui sèchent. Ce mouvement de l'eau se produit par suite de l'augmentation de la tension de

vapeur de saturation en fonction de la température. Dans un sol partiellement sec, la phase de l'eau n'est pas continue entre les pores, mais ne se rencontre qu'à certains endroits de la gangue terreuse. Dans ces circonstances, le mouvement de l'eau est surtout dû à la diffusion de la vapeur. En présence d'un gradient de température, l'eau tend à s'évaporer des endroits les plus chauds pour se condenser dans les endroits les plus froids. Par suite des effets de la chaleur latente, ce phénomène participe au transfert de chaleur. Il peut donc venir renforcer de beaucoup le flux total de chaleur au fur et à mesure que le sol sèche. Du fait de l'emmagasinement de la chaleur et de la constance relative des températures dans les couches inférieures du sol, le flux d'humidité dû aux gradients de température s'effectue généralement vers le bas en été et vers le haut en hiver. Le mouvement ascendant d'hiver est particulièrement intéressant parce qu'il contribue au gel des sols «secs » et au dégel boueux qui s'ensuit, même en l'absence de précipitations, et à la formation, dans les couches supérieures du sol, de lentilles de glace qui peuvent provoquer de graves soulèvements par le gel.

1.19-Transfert de chaleur dans le sol

Dans le sol, la transmission de la chaleur dépend des propriétés physiques des particules du sol, de leur degré de compacité et de la teneur en humidité. Le sol étant poreux et contenant des quantités variables d'air et d'eau, l'analyse du flux de chaleur dans le sol est beaucoup plus compliquée que dans un corps solide homogène dont la conductivité thermique et la capacité calorifique sont des paramètres établis et bien définis. Le sol se compose de particules minérales, de matières organiques et de pores qui peuvent contenir soit de l'eau, soit de l'air. Ces éléments ont tous des caractéristiques thermiques très différentes. Ainsi, la conductivité thermique des particules minérales est cinq fois plus élevée que celle de l'eau, dix fois plus élevée que celle des matières organiques et cent fois plus élevée que celle de l'air. Par conséquent, la conductivité thermique du sol peut varier considérablement selon la proportion de ces éléments. Même si le sol présente une teneur uniforme en matières minérales et organiques et une porosité constante, sa conductivité dépend de façon marquée de la teneur en eau, à cause de la grande différence entre la conductivité thermique de l'eau et celle de l'air. Pour un sol donné, la conductivité thermique tend à augmenter en fonction de la profondeur, à cause de l'accroissement de la compacité du sol et de la diminution de la teneur en air.

Pour une description théorique du transfert de chaleur dans un sol que l'on considère

comme un milieu non homogène et anisotrope, une approche macroscopique doit être adoptée. Toutes les quantités physiques se rapportent à une moyenne spéciale sur une cellule unité du sol. La dimension linéaire d'une telle cellule unité est importante comparée aux dimensions des grains et des pores, et petite en la comparant à l'échelle typique de la variation de la température et de la composition.

Les mécanismes de transfert de chaleur dans le sol sont, suivant l'ordre d'importance (De Vries and Afgan, 1975 [8]): la conduction, la convection et le rayonnement. La conduction se produit à travers le sol, mais le principal flux de chaleur se fait à travers les parties solides et liquides. La convection est négligeable la plupart du temps, sauf en cas d'infiltrations rapides d'eau. Ce qui n'est pas le cas pour le transport de la chaleur latente par la vapeur d'eau qui peut contribuer considérablement au transfert de chaleur dans les pores pleins de gaz. Le transfert de chaleur dû au mécanisme de radiation n'a d'importance uniquement dans le sol sec à haute température à l'intérieur des grands pores

1.20- Transfert de chaleur par migration

En principe, la conductivité thermique varie dans l'espace et dans le temps, notamment en fonction des variations de teneur en eau par migration, celle-ci ayant alors pour conséquence d'accélérer encore le transfert de chaleur par effet convectif.

Dans le travail entrepris dans la présente étude, nous ne tiendrons pas directement compte de cet effet, que nous pouvons introduire, tout au plus, en considérant, sous la forme d'une condition au bord isotherme, une nappe phréatique mouvante située en dessous d'une nappe de tube.

1.21- Influence des différents paramètres sur la température du sol

Le sol est souvent soumis à l'influence de différents paramètres qui peuvent être classés selon trois grandes catégories comme donné par Gold, L.W. 1967[9] :

- les variables météorologiques,
- les variables du terrain
- les variables du sous-sol.

Les différences régionales importantes de température du sol sont principalement déterminées par les variables météorologiques tels le rayonnement solaire, la température de

l'air et les précipitations; par ailleurs, les variations de températures locales résultent des différences des sols, des caractéristiques de surface et des propriétés thermiques des sols.

Les facteurs météorologiques, plus particulièrement le rayonnement solaire et la température de l'air, influent sur la température de la surface du sol et sur celle du sous-sol en agissant sur le taux de transmission des échanges de chaleur entre l'atmosphère et le sol. Le rayonnement solaire constitue cependant le facteur le plus important. La température moyenne annuelle du sol diffère entre le nord et le sud dans notre pays, cette variation étant fonction de la quantité d'énergie solaire absorbée par la surface du sol tout au cours de l'année. Une variation cyclique des températures de l'air et de la surface du sol se produit à la suite des changements saisonniers et quotidiens dans le rayonnement solaire. D'autres facteurs météorologiques tels le vent ou la pluie peuvent causer des variations locales assez importantes.

La neige constitue le deuxième facteur en importance qui influe sur la température du sol, non seulement à cause de ses propriétés d'isolant bien connues mais aussi à cause de l'humidité qu'elle dégage dans le sol au dégel. La végétation peut aussi agir comme isolant en protégeant le sol des températures extrêmes qui produisent des taux élevés de transmission de la chaleur. D'autres caractéristiques relatives au terrain, telle l'orientation des pentes, peuvent avoir des effets importants.

1.22- Propriétés du sol et variations de température de la surface

Les propriétés du sol déterminant sa réponse aux variations de température en surface sont les suivantes:

1. la capacité de chaleur volumétrique, C_v .
2. la conductivité thermique, K .
3. la chaleur latente (chaleur nécessaire au gel ou au dégel d'une unité volumique de sol gelé).
4. la teneur en eau.
5. La diffusivité thermique, aspect important pour le calcul du taux de transmission de la chaleur dans le sol.

La teneur en eau est une variable et agit directement sur les valeurs de la capacité thermique, de la conductivité thermique et de la chaleur latente. Ainsi, plus la teneur en eau est élevée, plus les propriétés précédentes sont élevées. La réponse du sol aux variations de la

température devient plus complexe à cause des changements qui se produisent lors du chauffage ou du refroidissement.

1.23- Calcul et variation de la température du sol

L'analyse de Fourier peut être utilisée pour le calcul des températures du sol dans les cas où la variation de température en surface ne peut être bien exprimée par l'équation (1). Si les propriétés thermiques du sol varient avec le temps, cette méthode peut ne pas être assez précise ou pratique, particulièrement si le gel de l'eau est notable lors de la période de pénétration du gel dans le sol. Des programmes de calcul de la température du sol par ordinateur ont donc été prévus pour les cas les plus complexes. Les méthodes de simulation par ordinateur peuvent être très efficaces pour l'étude de problèmes complexes, par exemple ceux qui portent sur les sols stratifiés, les sous-sols chauffés, les patinoires artificielles, les couches de neige, etc. Dans la plupart des cas cependant, il n'est pas nécessaire d'utiliser une méthode aussi détaillée, et de simples méthodes graphiques peuvent suffire. Si les températures du sol sont déjà connues, on peut utiliser l'équation (2) pour déterminer la température moyenne annuelle du sol et la diffusivité thermique.

Presque tous les changements autres que ceux naturels apportés au terrain, modifient les températures du sol en surface et en profondeur, bien que dans la plupart des cas ces modifications ne soient pas effectuées uniquement dans le but de changer le régime thermique du sol. Il peut toutefois être souhaitable de modifier délibérément la température du sol dans certaines situations, par exemple pour augmenter la capacité thermique du sol en vue de l'utilisation de la chaleur solaire ou de modifier des propriétés thermiques du sol pour réduire les pertes thermiques dans les sous-sols des habitations. Il ne faut pas oublier que ces températures ne peuvent être limitées que dans une certaine mesure car l'homme ne maîtrise pas le climat qui est responsable des différences régionales. Les températures du sol peuvent généralement être modifiées en changeant soit les conditions de la surface du sol soit les propriétés thermiques de ce dernier. Une couche isolante en surface ou à proximité de celle-ci permet de modifier la condition de la surface, d'où l'utilisation d'isolant sous les chaussées en vue de réduire l'effet du gel. L'augmentation de l'épaisseur de la couche de neige au moyen de clôtures à neige constitue aussi une autre application de ce principe. La meilleure méthode pour modifier la capacité thermique du sol consiste à modifier sa teneur en eau, par exemple en l'inondant. Diverses méthodes de modification des températures du sol ont été

mises en application avec succès en agriculture mais leur utilisation ne s'est toutefois pas étendue au domaine de la construction.

1.24- Comportement général des températures du sol

Un bilan énergétique à la surface du sol fait intervenir de nombreux phénomènes physiques (météorologie de l'air, radiation solaire, pluie, neige,...), topographie, occupation du sol, évapotranspiration de la végétation etc. Tous ces paramètres conditionnent les transferts de chaleur en surface et influencent la température du terrain à son voisinage. Le plus important paramètre ici est la température annuelle moyenne de l'air ambiant.

La température moyenne annuelle du terrain vers la surface est généralement proche de cette dernière. L'influence des variations journalières et saisonnières de la température de l'air ambiant sur la température du terrain proche de la surface est illustrée par la résolution de l'équation de la chaleur (1) pour un milieu semi infini et homogène dont la surface est soumise à une variation sinusoïdale de la température. La solution de ce problème est l'équation classique d'une onde de chaleur donnée par les auteurs G. P. Williams et L. W. Gold 1977 [10] qui ont étudié les principales caractéristiques des variations entre la température de l'air et celle de la surface du sol et ont établi qu'elles peuvent généralement s'exprimer par l'équation suivante:

$$T_s = \bar{T} + A \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{t_0}\right) \quad (1)$$

Où

T_s : est la température à un moment précis

T : est la température moyenne pour la période donnée, qui comprend un ou plusieurs cycles complets de variations,

A : est la différence entre les températures maximales et minimales pour la période donnée,

t : est la durée de l'expérience.

t_0 : est la durée d'un cycle complet.

Si les propriétés thermiques du sol sont constantes, la température produite dans le sol par la variation cyclique peut être obtenue par l'équation suivante:

$$T(x, t) = \bar{T} + A \cdot \exp\left(-x \cdot \sqrt{\frac{p}{a \cdot t_0}}\right) \cos\left(\frac{2p \cdot t}{t_0} - x \cdot \sqrt{\frac{p}{a \cdot t_0}}\right) \quad (2)$$

Avec x qui représente la profondeur sous la surface et a la diffusivité thermique (K/C_v).

L'équation de l'onde de chaleur (2) montre que l'amplitude des variations de température dans le terrain est atténuée par un facteur qui décroît exponentiellement avec la profondeur qui dépend à son tour de la diffusivité thermique du terrain. Cette équation (2) indique que l'amplitude diminue de façon exponentielle en fonction de l'éloignement de la surface, à un taux prescrit par le temps nécessaire à un cycle complet. Ceci est représenté par la figure (3) suivante :

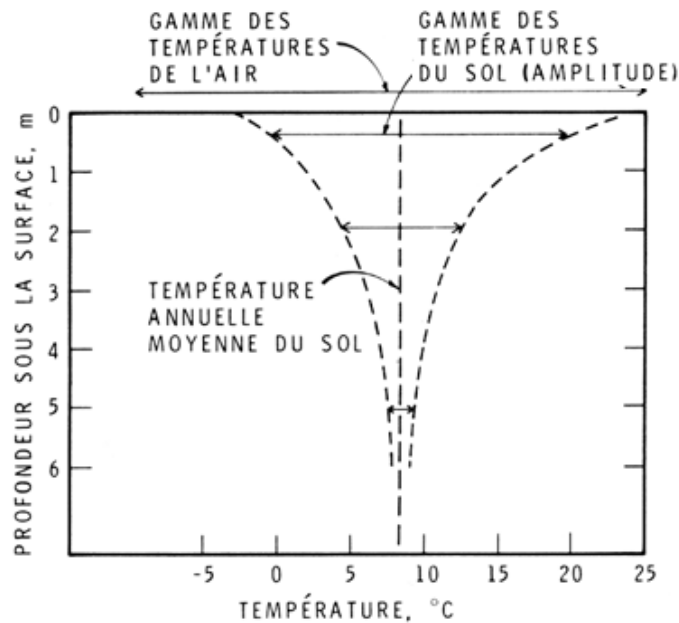


Figure (3). Exemple de la relation entre la profondeur et les températures annuelles du sol

Dans le cas des variations annuelles. Les températures du sol sont généralement constantes au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5 et 6m. La température moyenne annuelle du sol est presque constante avec la profondeur; elle augmente toutefois d'environ 1°C par 50 m à cause de la chaleur géothermique provenant du centre de la terre.

La température de la surface du sol demeure presque en phase avec celle de l'air. Toutefois, les valeurs maximale ou minimale des couches sous la surface sont atteintes plus tard qu'en surface, le retard augmentant linéairement selon la profondeur, comme l'indique le

cosinus de l'équation (2) qui représente ce comportement. A une profondeur de 5 à 6 m, la température maximale du sol est atteinte environ 6 mois après la température maximale moyenne de la surface qui a lieu en été. La température du sol subit un cycle quotidien (un cycle associé aux variations météorologiques) en plus du cycle annuel. Ces variations se limitent aux couches souterraines près de la surface, les cycles quotidiens se faisant sentir à une profondeur de pénétration d'environ 0.5 m sous la surface et les cycles météorologiques à environ 1 m. Les variations quotidiennes de température constituent un aspect intéressant pour ce qui a trait aux problèmes de construction, mais elles sont encore plus utiles pour les agriculteurs.

1.25- Avantage du stockage thermique dans le sol

Le stockage thermique souterrain utilise la température du sol ou de l'eau afin de rafraîchir ou de chauffer des bâtiments (cas du chauffage ou de la climatisation). Par exemple, une pompe à chaleur peut extraire de la chaleur se trouvant sous terre afin de chauffer un bâtiment. En été, la pompe peut être inversée et servir de système de climatisation en expulsant l'air chaud hors de l'immeuble et en l'envoyant dans le sol.

Il est plus efficace d'utiliser Le stockage thermique souterrain qu'un appareil de chauffage à combustion, parce que le transport de la chaleur d'un endroit à un autre nécessite moins d'appareillages qu'une installation mécanique ou énergétique. Au Canada par exemple, plus de 30 000 installations d'énergie du sol sont utilisées à des fins résidentielles, commerciales, institutionnelles et industrielles. Le stockage thermique souterrain est largement utilisé dans le nord de l'Europe, notamment dans les pays scandinaves, qui ont adopté rapidement cette technologie. Le stockage thermique souterrain devient de plus en plus courant dans le sud des États-Unis, où l'on s'en sert pour la climatisation des bâtiments. Les systèmes de stockage thermique souterrain peuvent aussi réduire l'émission de gaz à effet de serre.

Les systèmes de stockage thermique souterrain offrent les avantages suivants :

- Les coûts de fonctionnement des systèmes de stockage thermique souterrain sont beaucoup plus faibles que ceux d'un appareil de chauffage à combustion muni d'un climatiseur d'air. Toutefois, en moyenne, un système du stockage thermique souterrain peut permettre de réaliser des économies correspondant aux deux tiers des coûts de chauffage et de climatisation à l'électricité.

- Le stockage thermique souterrain peut fournir de la chaleur en hiver et de l'air frais en été, ainsi que de l'eau chaude pour une utilisation domestique durant toute l'année.
- Un système de stockage thermique souterrain peut réduire les émissions de gaz à effet de serre dans une proportion pouvant atteindre plus des deux tiers de ceux produits par les systèmes semblables qui utilisent un combustible à base de charbon. Les réductions dépendent toutefois de la source d'électricité employée afin de faire fonctionner les éléments du système. Il est plus que jamais important de réduire les gaz à effet de serre en raison des efforts internationaux visant à la réduction du réchauffement du globe et de la modification climatique.
- Les systèmes de stockage thermique souterrain ne produisent pas d'odeur que l'on a constatée avec les appareils de chauffage au gaz naturel, au mazout ou au propane. Cette technique peut être ainsi parfaite pour les bâtiments hautement isolés ou pour les personnes allergiques ou sensibles aux gaz nocifs et à l'air de mauvaise qualité.
- Le stockage thermique souterrain, en raison de l'absence de combustion, ne peut exploser et le dispositif du stockage de combustible (la réserve de combustible) n'est donc pas nécessaire.

1.26- Conclusion

Le présent chapitre nous permet de conclure que le stockage thermique souterrain peut fournir de la chaleur propre, réduire les émissions de gaz à effet de serre, assurer les besoins énergétiques tout en réduisant les impacts environnementaux avec des coûts de fonctionnement beaucoup plus faibles que les autres sources d'énergie et l'absence total de risque.

Le stockage thermique souterrain concerne généralement l'énergie renouvelable qui peut être emmagasinée dans le sol afin de rafraîchir ou de chauffer des immeubles, Le sol est souvent soumis à l'influence de différents paramètres tel que les variables météorologiques, les variables du terrain et les variables du sous-sol, il est a remarqué que le stockage thermique souterrain devient de plus en plus courant dans les pays développés. Et que beaucoup de recherches pour le développement de ce type de stockage sont lancées.

Chapitre 2
Etude bibliographique

2.1- Recherche bibliographique

Le stockage de l'énergie solaire dans le sol a fait l'objet de nombreuses études, mais c'est surtout depuis environ 20 ans que dans certains pays (Canada, USA, Japon, France, Belgique, etc..) les recherches ont pris différentes directions. Par exemple Le CNRS français, en association avec des équipes espagnoles, allemandes et suisses [1], vient de créer une alliance de laboratoires européens pour la recherche et les technologies des systèmes solaires à concentration, nommée SolLab. Cette création, annoncée au cours du forum «Euro sol» organisé les 20 et 21 octobre 2004 par le CNRS à Odeillo (Pyrénées orientales), a pour objectif de coordonner les efforts de recherche des principaux centres européens impliqués dans ce domaine. Il s'agit d'un enjeu stratégique important au plan européen et international s'inscrivant dans une perspective de développement durable.

Ladislaus Rybach et Burkhard Sanner, 2000 [11] nous donnent un aperçu général sur le développement des pompes à chaleur en Europe (pour 20 ans) et qui jouent un rôle principal dans le développement géothermique en Europe centrale et nordique avec l'utilisation d'échangeurs de chaleur «type vertical» et la terre comme source géothermique. Elles offrent le chauffage central pratiquement à n'importe quel endroit, ce qui a permis un développement du marché qui s'est produit la première fois en Suisse et en Suède, et maintenant en Autriche et en Allemagne.

Approximativement 20 ans de recherche et développement dans le domaine des échangeurs de chaleur (forage vertical) ont permis l'établissement des concepts de cette technologie, avec des applications croissantes comprenant de grands systèmes avec le stockage thermique d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments. Presque tous les pays d'Europe s'orientent actuellement vers le développement de ce secteur avec l'utilisation de l'énergie solaire stockée dans le sol.

La production d'énergie et de vecteurs énergétiques sans émission de gaz à effet de serre et sans pollution représente un enjeu majeur des prochaines décennies. La concentration du rayonnement solaire permet la production de chaleur à haute température, puis sa conversion en électricité ou en hydrogène d'une part et son stockage d'autre part. Le

potentiel de développement de ces technologies est important, en particulier dans le pourtour méditerranéen. Cette collaboration va permettre de renforcer la coopération nécessaire entre les acteurs de la recherche afin d'accroître l'efficacité de leurs travaux et de réaliser, en particulier, les progrès technologiques améliorant les performances des centrales solaires. Les objectifs scientifiques tracés sont les recherches de base et les nouveaux concepts pour la conversion et le stockage de l'énergie solaire concentrée (centrales solaires du futur).

La réalisation d'un échangeur de chaleur utilisable comme dispositif de stockage thermique souterrain (UTES) exige la connaissance des propriétés thermiques du sol. La détermination in situ de ces propriétés peut être faite en installant des échangeurs de chaleur de forage verticale (BHE) et en réalisant l'essai thermique de réponse (TRT) nécessaire. Le système (BTES) peut stocker la chaleur pendant l'été (utilisé 3 à 6 mois plus tard pendant l'hiver) et produire le froid en été.

Ainsi, A. Busso, A. Georgiev, P. Roth, 2003 [12] donnent les résultats d'un travail coopératif entre les groupes de recherche en Chili et en Argentine, où ils ont réalisé le premier essai TRT avec les capteurs solaires comme source de chaleur pour le BTES. Une installation pour mettre en application le BTES a été préparée "au laboratoire d'énergie solaire" de l'université technique Federico Santa Maria, à Valparaiso, au Chili. L'essai TRT a été réalisé pendant 9 jours (du 24/06 au 03/07/2003), le remplissage des capteurs solaires, pendant 29 jours (du 18/08 au 16/09/2003) et la décharge avec de l'eau qui arrose l'échangeur de chaleur, pendant 13 jours (du 17/09 au 30/09/2003). Une comparaison entre les résultats obtenus par les méthodes conventionnelles et les propriétés de la mesure géothermique d'une part et l'évaluation de données basées sur les solutions numériques d'autre part, a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Les valeurs efficaces 1,8 W/mK pour la conductivité thermique et 0,3 mK/W pour la résistance thermique ont été déterminées.
- L'application de la détermination classique des paramètres peut être employée comme outil rapide et fiable pour l'évaluation de données.
- L'exactitude de l'évaluation dépend du soin pris en réalisant l'essai.
- Les simulations de TRNSYS ont aidé à identifier les sources des pertes de chaleur par les frontières du stockage.

- Cette première expérience représente une étape vers une étude plus détaillée sur les propriétés thermiques du sol dans différents emplacements pour des applications pratiques possibles de stockage thermique souterrain.

D. L. SLEGEL et L. R. DAVIS [13], pour leur part, ont étudié le transfert de chaleur et de masse en régime transitoire dans le sol. Les auteurs considèrent la conductibilité thermique locale efficace, l'humidité et la température du sol comme les trois paramètres principaux qui doivent être obtenus expérimentalement. Les propriétés de la diffusion des liquides et des vapeurs sont considérées comme connues. Les conditions aux limites sont choisies pour présenter un système de chauffage et d'irrigation à la surface du sol. La surface d'échange de la chaleur est considérée comme une fonction de la variation atmosphérique et des conditions de la surface du sol. L'espacement des tuyaux et la profondeur sont variables pour déterminer leurs effets sur la distribution des températures et de l'humidité dans le sol, pour les conditions de l'environnement en été et aussi en hiver.

La résolution numérique des équations décrivant le phénomène de transfert thermique discrétisées par la méthode des différences finies, est donnée sous la forme de courbes représentant la distribution de la température et de l'humidité dans en été et en hiver. Les variations des températures saisonnières du sol sont aussi présentées pour trois climats de sols chauffés et non chauffés. On fait varier les distances entre les tuyaux et la profondeur afin de concevoir une méthode pour l'optimisation des résultats (profondeur et intervalles meilleurs). Ces auteurs ont envisagé le transfert de chaleur dans le sol en considérant une conductibilité thermique constante et ils ont utilisé la méthode d'image pour se rapprocher de la distribution des températures autour des tuyaux enterrés. En fait, même si les résultats obtenus n'ont pas abouti à désigner une profondeur et un intervalle optimal spécifiques aux conditions de l'irrigation et du chauffage du sol, plusieurs recommandations ont pu être faites : les tubes doivent être enterré à une profondeur de 50 cm pour assurer une meilleure irrigation mais celle-ci est limitée par les conditions techniques d'agriculture imposant une profondeur de 32 cm. L'intervalle entre les tubes horizontaux doit être relativement petit pour augmenter les effets de chauffage du sol.

R.R.GILPIN et B.K.WONG [14] ont étudié le champ de température et sa relation avec les propriétés du sol et de la surface couvrante. Les auteurs ont établi un modèle unidimensionnel d'un sol glacé donnant la variation de l'épaisseur de la couche glaciale couvrante avec le temps. Des approches analytiques et numériques sont utilisées

principalement pour étudier les facteurs qui causent le changement des propriétés du milieu le long de l'année, et la variation de la température du sol. Les auteurs ont voulu établir une corrélation semi-empirique pour prévoir les champs de température du sol sous les diverses épaisseurs de surfaces couvrantes. Cette relation peut être utilisée afin d'estimer l'influence des caractéristiques de la surface couvrante sur la température du sol, ainsi que sur l'intégrité du sol dans les régions des pergélisols.

Le sol n'est pas homogène et sa température dépend des propriétés entre l'état de gelation et l'état de fusion. Le transfert de l'énergie dans ces cas (qui est essentiellement un milieu poreux) peut avoir lieu par conduction, convection, rayonnement et par transfert de masse. En général, le flux de chaleur total à travers une surface quelconque peut dépendre du gradient local de température et de la conductivité thermique efficace.

Dans le régime de transfert thermique dans le sol, les différences entre les températures moyennes de l'air et les températures moyennes du sol sont influencées par plusieurs facteurs tels que :

- la variation au cours de l'année des propriétés physiques de la surface couvrante.
- le processus de la gelation et de la fusion de l'eau dans et sur le sol.

Ces deux facteurs sont importants car ils résultent des variations des propriétés thermiques de la surface couvrante et du sol, et de celles des gradients de températures, et produisent les effets appelés "Vanne thermique"[14].

Le modèle qui a été étudié analytiquement et numériquement, décrit un sol et sa surface couvrante, la température moyenne caractéristique de la surface du sol étant de 4°C au-dessus de la température moyenne de l'air et de 0.5 à 1°C au-dessous des températures de la surface du sol [14]. Les changements des caractéristiques physiques apparentes de la surface couvrante en été et en hiver, produisent des variations de températures moyennes du sol de 2 à 7°C : cela dépend de la localisation et du type des changements (fusion ou gelation). Ce qui conduit à la variation des propriétés de la surface couvrante, notamment ses propriétés thermiques ainsi que celles du sol.

Michael P. Deru et Allan T. Kirkpatrick 2001[15] ont étudié le transfert de chaleur et de masse dans un matériau humide et poreux dans le cas où ce dernier est soumis à un chauffage brusque avec une température relativement élevée et imposée à la surface. La spécificité de ce processus est que les transferts de chaleur et de masse ont lieu en même

temps, dans le matériau générant une frontière mobile qui sépare le produit en deux régions avec des propriétés thermodynamiques différentes. De plus, une absorption de la chaleur latente et une évaporation d'eau ont lieu à cette frontière. Le problème concernant l'augmentation de la pression et le transfert de la vapeur est non seulement intéressant du point de vue scientifique mais encore plus important pour la pratique industrielle. Les auteurs ont discuté en détail les résultats des calculs numériques en faisant apparaître les influences des paramètres divers incluant la conductibilité thermique, la chaleur spécifique, le vide fractionnaire, la mobilité et l'humidité initiale du matériau, sur les distributions de température, de pression et d'humidité dans le matériau. Ils ont également présenté un modèle expérimental pour prévoir la pression maximale.

K.Monceet D.E.Claidge 2002, [16] ont étudié le transfert thermique bidimensionnel dans la construction souterraine qui offre plusieurs avantages du point de vue de la conservation de l'énergie et de l'environnement. La haute capacité thermique du sol et son isolation thermique atténuent les variations de la température ambiante aux surfaces de la construction et réduisent quelque peu les flux totaux de l'énergie à travers son enveloppe. Les surfaces de cette dernière peuvent aussi servir comme moyen d'isolation acoustique et permettre une meilleure protection contre l'air pollué.

Les progressions considérables des connaissances relatives au transfert thermique dans la construction souterraine ont été possibles du fait de l'intérêt accru porté à l'économie de l'énergie après la crise du pétrole de 1973. De ce fait, cinq conférences importantes ont été organisées touchant le sujet des constructions souterraines depuis 1975. L'analyse détaillée du transfert thermique pour les différentes constructions souterraines est très limitée. Les températures du sol, les conductibilités et les flux thermiques à travers les murs de la construction souterraine ont été enregistrés (L.L BOYER 1985 [17]). Dans ces conférences, on compte plus de 200 documents traitant les différents aspects de ces constructions, suggérant des orientations générales, et évaluant leur efficacité thermique. On note que parmi ces documents, seuls vingt d'entre eux ont trait au transfert thermique en contact avec le sol.

Les champs de températures dans le sol entourant une maison mise à l'abri en terre ont été aussi enregistrés par T.P Bligh et B.H Knoth, 1982[18]. Ces études expérimentales fournissent des informations sur le transfert thermique à travers les structures superficielles et montrent aussi que l'isolation est souhaitable pour réduire les pertes de la chaleur à un niveau

raisonnable. Pour le sol stable, la variation de température avec le temps peut être approximativement exprimée par une fonction sinusoïdale à une profondeur quelconque. Ces auteurs analysent le comportement régulier périodique pour les fluctuations annuelles. Ils ont utilisé une méthode semi analytique développée pour décrire en détail l'échange de chaleur entre le sol et le bâtiment souterrain de forme régulière. La variation de la température du sol et la quantité totale de chaleur transmise au bâtiment ou du bâtiment sont déterminés.

T.Kasakura, et M.Hasatani 1996 [19] présentent la barrière thermique et les caractéristiques du stockage de l'énergie solaire de l'appareil de chauffage d'air comprenant une couche de matériau optiquement semi-transparent. Cet appareillage présente les avantages suivants :

- Effet accélérateur sur le transfert thermique dû à l'augmentation de la surface d'échange de la chaleur.

- L'appareil peut être considéré comme un domaine de stockage de la chaleur.

Les appareils de ce type de chauffage solaire d'air sont applicables à plusieurs systèmes industriels; par exemple, le système de conditionnement d'air, le système de séchage des grains, des aliments, etc. il est souhaitable que le système d'exploitation de l'énergie solaire soit doté d'un dispositif rigoureux de stockage pour remédier à l'absence régulière du rayonnement solaire.

V.R TARNAWSKI et al, 1990 [20] s'est occupé du stockage de la chaleur et de sa récupération du sol par des échangeurs de chaleur à une seule ou double couches de sol. A présent le système des pompes à chaleur à une seule couche de sol est utilisé, mais il exige une grande aire superficielle libre du sol. L'auteur a essayé d'élucider quelques problèmes sur le stockage de chaleur. On note:

- La réduction de l'aire superficielle du sol.

- L'augmentation des dimensions du domaine de stockage de la chaleur.

- L'augmentation du facteur de rendement saisonnier pour la pompe à chaleur associée au sol.

- La réduction des influences écologiques d'emmagasiner de la chaleur et de son extraction sur les plantes et la biologie du sol.

- La participation de la chaleur latente de la glaciation de l'humidité du sol dans l'extraction de la chaleur.

- L'action réciproque des flux thermiques dans l'échangeur de chaleur du sol.

- La résistance thermique de contact entre un échangeur de chaleur et le sol à ses alentours.
- L'influence de l'humidité du sol sur le rendement du stockage de chaleur.

Les résultats des études sont encore restreints car l'auteur s'est occupé de plusieurs questions en même temps.

M. SOZEN ET K. VAFAI 1990 [21] ont développé un modèle bidimensionnel du stockage de la chaleur dans le sol avec un échangeur de chaleur à couche double de sol (en abrégé : ECCD). Ce modèle inclut la glaciation mais pas la migration de l'humidité du sol. La capacité calorifique du sol dans le voisinage du point de glaciation est ajustée en prenant en considération la chaleur latente de fusion pendant la glaciation. Autrement, on considère les propriétés thermiques du sol comme constantes. Les tuyaux de l'ECCD sont enterrés à une profondeur de 0.6m et de 1.2m, respectivement. Le rendement de la pompe à chaleur utilisée pour cet effet est de 14% meilleur que celui avec un échangeur de chaleur à une seule couche.

BENSABAT, J et al 1988 [22] ont fait l'expérience du stockage de chaleur saisonnier avec les modèles des sols non saturés. Ce type de stockage est considéré comme un élément essentiel en utilisant de l'énergie thermique fournie de manière discontinue même à basse température. Cela résout quelques problèmes inhérents à la nature stochastique. Les sources de chaleur principales, considérées ici, sont l'énergie solaire, l'eau chaude naturelle et la chaleur perdue industrielle (par exemple les fumées industrielles, les sorties des fours, etc.). De ce fait, des progressions importantes concernant la possibilité du stockage saisonnier de la chaleur, ont été obtenues.

HADORN J.-C. & RYBACH L, 1995 [23] présentent des rapports scientifiques se référant principalement à l'utilisation du concept du stockage saisonnier dans les régions à climat moyen ou froid sachant que tout les progrès scientifique dans l'application du concept du stockage souterrain de la chaleur est rapportés aux régions aux climats chauds qui profite de leurs avantages (la puissance solaire très élevée ; la demande spécifique de la chaleur pour le chauffage domestique est modérée). Plusieurs régions à climat moyen ou froid peuvent utiliser ce concept pour bénéficier vraiment du stockage saisonnier de la chaleur

Depuis quelques années, des recherches et des expérimentations sur les possibilités du stockage de la chaleur saisonnier se sont développées, des connaissances de base utiles sont accumulées et des solutions aux problèmes techniques sont proposées. Cependant les conditions spécifiques des régions au climat chaud introduisent de nouvelles directives touchant l'acquisition d'informations supplémentaires et nécessaires sur les propriétés physiques des sols non saturés et le transfert thermique.

MOSTAFA A. KARAM [24] a développé un modèle thermique pour étudier le transfert thermique dans les sols non uniformes. Le modèle est basé sur les caractéristiques ondulatoires de la propagation de la chaleur périodique et la décomposition du sol en sous-couches. Tous les coefficients de transmission thermique aux interfaces de ces sous-couches sont formulés et alors utilisés pour construire les profils de la température et des flux de chaleur à travers le sol.

R.A. FEDDES 1973 [25] décrit les modes de transfert thermique avec changement de phase. L'énergie thermique est souvent stockée dans les roches ou dans de l'eau souterraine. Ces deux milieux sont à bas prix, sans risques et largement disponibles. Mais malheureusement, les roches sont volumineuses et l'eau causerait la corrosion des installations et les deux milieux enregistrent de grandes déperditions et exigent un espace de stockage important.

C'est pourquoi on pense au stockage de la chaleur latente où le milieu subit un changement de phase par absorption ou bien par la libération de la chaleur dans un processus isotherme adéquat.

D'après J.P. DUMAS 2002 [26] un grand avantage du stockage de chaleur latente est la grande compacité thermique du système, alors que les inconvénients de ce processus avec changement de phase sont la diminution et la dégradation de la capacité d'accumulation thermique des matériaux considérés au cours du temps car le cycle devient incapable de se reproduire après quelques périodes. Les différentes recherches entreprises jusqu'à présent par différents chercheurs se sont occupées essentiellement des problèmes suivants:

- Transfert de chaleur et de masse dans le sol.
- Champ de température dans le sol et sa relation avec les propriétés du milieu et sa surface couvrante.
- Comportement thermo-hydro mécanique du sol lors du stockage de la chaleur.

- Influence de la variation périodique (saisonnière) des conditions atmosphériques sur la température du sol.

Y. NASSAR et al 2005 [27] présentent une recherche expérimentale qui a été réalisée pour décrire la distribution de la température dans les couches souterraines du sol à Tripoli (Libye). Le but de l'expérience est d'observer la variation de la température du sol à une profondeur de 4 m et à longueur d'année, afin de tester la capacité de ce sol à être employé comme réservoir de chaleur (stockage thermique saisonnier). L'expérience a été faite pour deux cas: le premier concerne un sol sec et le second un sol sec couvert par une feuille de verre. Les mesures indiquent qu'à une profondeur de 4 m, les températures moyennes pour les systèmes secs et couverts sont variables suivant la saison et la configuration, et sont presque constantes pour les deux systèmes au cours de l'année. Les auteurs ont déduit que les couches souterraines du sol ont une capacité thermique importante qui peut être employée comme réservoir de chaleur et inversement comme source de chauffage et de refroidissement des bâtiments menant à réduire la consommation d'énergie dans cette application. Ils recommandent de compléter leur recherche expérimentale par une autre analytique. Pour cela il faut que la première étape soit la détermination des propriétés thermiques du sol à différentes profondeurs.

C.-H. LAI et al, 2001 [28] proposent, pour la solution de l'équation multidimensionnelle, les solutions numériques de la 2-D et 3-D se basant sur le principe du « problème inverse » et qui exigent un très grand calcul.

D'autre part on peut ramener le problème de conduction pour les coordonnées cylindriques au problème de valeurs limites dans une classe des fonctions doublement périodiques (V.Mityushev 1998 [29]) où la solution analytique proposée est une méthode d'équations fonctionnelles et aussi approximative. Un autre modèle pour l'étude de la conduction est donné par L. E. Payne et al 2006 [30] qui propose un système d'équations mathématique pour modéliser la conduction de la chaleur où les valeurs initiales de la température sont imposées. La résolution par la méthode inverse est bien présentée par BANGTI JIN et al 2005 [31] qui obtiennent une solution est proposée en utilisant la décomposition singulière de valeur, où le paramètre optimal est choisi selon le critère de L-courbe, le problème est traité numériquement et des résultats sont présentés pour le les cas bi et tridimensionnels.

La conduction dans un milieu isotrope et décrite par YIORGOS-SOKRATIS et al 2006 [32]) à partir d'une méthode qui consiste en l'utilisation d'une technique de décomposition de domaine et d'un algorithme de décomposition de matrice. La structure des matrices apparaissant dans cette méthode est exploitée en utilisant la transformée de Fourier et la méthode est numériquement utilisable pour plusieurs cas.

Une nouvelle méthode pour résoudre des problèmes multidimensionnels de conduction de la chaleur est formulée par PIOTR DUDA, JAN TALER 2000 [33]. Elle permet de déterminer numériquement les distributions instables de la température dans les éléments à géométrie irrégulière. Elle est particulièrement appropriée pour déterminer la distribution passagère de la température dans des composants de mur épais.

G. KARAMI, M. R. HEMATIYAN 1999 [34] ont présenté une analyse de la conduction non linéaire par la méthode inverse de la conduction avec un point ou une ligne source de chaleur distribués. La solution inverse peut être classée par catégories et la solution d'une catégorie peut être trouvée par un procédé itératif. La méthode des moindres carrés est ensuite utilisée pour la régulariser, en même temps qu'une addition d'une limite de régularisation.

KEVIN O'NEILL 1983 [35] propose des méthodes d'équations intégrales qui donnent les solutions de quelques problèmes bidimensionnels. Une formulation générale basée sur des fonctions de Green dans l'espace et dans le temps est développée en utilisant l'équation complète de la chaleur, suivie d'une formulation plus simple en utilisant l'équation de Laplace. Un système élémentaire et non itératif est construit, comportant l'interpolation linéaire au-dessus des éléments sur une frontière polygonale. Des valeurs nodales de la normale du gradient de la température à une frontière donnée sont exprimées directement par la solution numérique.

M. PIECHOWSKI 1999 [36] a proposé une nouvelle approche à la simulation de l'échange de chaleur pour une configuration horizontale dont les résultats, obtenus numériquement, décrivent le gradient de température et d'humidité, à l'interface tube-sol.

Mais pour le cas bidimensionnelle H. R. Busby, D. M. Trujillo 2005 [37] utilisent la méthode de programmation dynamique. Le problème consiste à déterminer deux états inconnus de flux de la chaleur et les imposer aux deux extrémités d'une barre. Plusieurs résolutions numériques ont été exécutées pour établir les effets des paramètres déterminants.

D'autre part et pour le même cas de figure, H.-J. REINHARDT 1990 [38], propose une autre méthodologie qui se base sur une approximation de la partie elliptique de l'équation parabolique menant à un système de problèmes unidimensionnels qui peuvent être découplés.

Les modèles analytiques existants sont relatifs au cas unidimensionnel. Ainsi, S. ALI POURHASHEMI et al 1998 [39] ont développé un modèle théorique pour la propagation unidimensionnelle de la chaleur dans un milieu poreux (sable). Cette étude a été entreprise pour réaliser des analyses théorique et expérimentale du transfert thermique dans deux matrices différentes de sable. Un modèle mathématique basé sur la loi de Fourier de la conduction de la chaleur pour un système unidimensionnel avec la conductivité thermique variable a été développé. La partie expérimentale a inclus des essais sur plusieurs échantillons de sable.

HYWEL RHYS THOMAS et CHI LEUNG WELKIN LI, 1998 [40] développent le modèle numérique parallèle (par la méthode des différences finies), présentant le transfert couplé de la chaleur et de l'humidité dans le sol non saturé. Une évaluation du modèle a été réalisée par l'intermédiaire de la simulation d'une expérience au laboratoire. Une très bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques a été obtenue.

La connaissance du mouvement simultané de l'eau, de la vapeur et de la chaleur dans la zone des régions arides ou semi-arides présente un très grand intérêt pour l'évaluation du bilan énergétique des couvertures de remblais. Le mouvement de vapeur domine souvent le mouvement de l'eau dans ce genre de terrain parce que l'humidité de sol près de la surface est habituellement très basse.

Puisqu'il est bien connu que les transferts de l'eau et/ou de vapeur et de la chaleur sont étroitement liés par les mêmes mécanismes et s'influencent entre eux, H. HYDRUS et al 2005 [41], analysent le mouvement couplé de l'eau et/ou de la vapeur et de la chaleur dans la sous surface. Le bilan énergétique sur et sous la surface du sol en est établi et le calcul est réalisé par l'utilisation du programme modifié de Hydrus-1d.

Une solution numérique de transfert bidimensionnel de la chaleur et de l'humidité dans les sols gelés et non gelés est proposée par MONCEF KRARTI, et al 2004 [42], pour être utilisée afin de déterminer les profils de température du sol dus aux gains et aux pertes de

la chaleur. Une conductivité thermique effective du sol est avancée pour donner un modèle pur de conduction de la chaleur caractérisant le transfert couplé thermique et de masse.

SOUAD AMJADCET & al 2003 [43] ont décrit l'utilisation de la méthode des fonctions de transfert (TF) pour résoudre numériquement des problèmes bidimensionnels de conduction de la chaleur dans de grands domaines de calcul. Cette technique se base sur le principe de décomposition du système étudié, en blocs rectangulaires suivant les deux directions du transfert thermique. Chaque bloc est un sous-ensemble caractérisé par ses entrées et sorties et par ses coefficients appropriés de fonction de transfert (TFC). Le procédé décrit est appliqué aux échanges thermiques dans le sol. Ainsi, les TFC produits sont employés pour prévoir les profils de température à différents niveaux des configurations étudiées et de la variation du flux mensuel de la chaleur échangé dans le sol ainsi qu'entre les bâtiments et le sol dans deux climats typiques.

La méthode de séparation des variables est l'un des moyens les plus universels et les plus efficaces de l'étude des équations linéaires. CARSLAW HS & JAEGER JC 1946 [44], nous en présentent le principe, et plusieurs méthodes de séparation des variables sont utilisées pour résoudre les équations aux dérivées partielles non linéaires, telles que les méthodes classiques (GLEN E.M., 1998 [45] et MILLER W. 1977 [46]), la méthode géométrique (DOLYE P.W. et VASSILIOU P.J. 1998 [47] et l'approche formelle de séparation (CAO C.W. [21]).

M. S. INGBER 2005 [48], pour sa part, propose une nouvelle méthode des éléments aux frontières employant la discrétisation instantanée, pour résoudre les équations de types paraboliques. La méthode traite la limite contenant la dérivée de temps comme limite imposée. Ceci rend nécessaire l'introduction d'inconnues additionnelles à l'intérieur du domaine. En même temps, des valeurs pour la variable dépendante sont déterminées directement à l'intérieur des frontières. La méthode se réduit, en fait, à résoudre essentiellement une équation de Poisson. Il faut noter que les géométries des domaines étudiés et les états de frontières complexes rendent nécessaire souvent le recours aux méthodes numériques. La méthode de différences finie, la méthode des éléments finis et la méthode d'éléments aux frontières sont souvent employées pour résoudre ce type de problèmes.

Les problèmes de conduction de la chaleur peuvent être efficacement traités avec la méthode d'éléments aux frontières (BEM). Les diverses procédures rapportées dans la littérature montrent qu'on fait toujours appel aux méthodes numériques avec un arrangement du domaine de temps où des solutions du BEM sont trouvées directement. On cite parmi les premiers travaux ayant employé cette approche, ceux de : Y.CHANG et al.1998 [49], R. SHAW 1974 [50], DAS CURRAN et al 1980. [51], L.C WROBEL et C.A BREBBIA 1979 [52], D. LESNIC et al 1996. [53], H.B CODA et VENTURINI 1996 [54].

E. DIVO et A. KASSAB 1999 [55] proposent, pour leur part, des approches alternatives avec la transformation de la variable de l'espace et l'élimination de la dérivée dépendante du temps. Pour les problèmes de diffusion, la transformée de Laplace semble être le meilleur choix, comme proposé par F. RIZZO et DJA SHIPPY 1970[56] et JA. LIGGETT et PLF. LIU 1979 [57].

Des outils de simulation ont été développés pour les systèmes de tubes enterrés, basés sur les éléments finis et les modèles de différences finies, qui expriment parfaitement l'échange thermique simultané sensible et latent, ainsi que le problème de la diffusion bidimensionnelle de la chaleur dans le sol. Le phénomène est largement étudié par BOULARD et AL. 1989 [58], P. HOLLMULLER et B. LACHAL 2005 [59], A.DAYAN et AH. MERBAUM1984 [60].

H. R. THOMAS, 2005 [61], présente l'analyse non linéaire du transfert de la chaleur et d'humidité dans le sol partiellement saturé, qui est en même temps une suite des précédents travaux de l'auteur aux applications bidimensionnelles. Des situations de plus grande importance de complexité et de technologie peuvent par conséquent être résolues. La base théorique du problème est d'abord décrite avant que la formulation bidimensionnelle de la solution numérique soit donnée. La méthode des éléments finis est utilisée pour donner les distributions spatiales des variables, avec un arrangement des différences finies pour prévoir les variations temporelles. Elle permet de déterminer la nature non linéaire des paramètres de sol avec l'analyse simultanée du transfert couplé de la chaleur et de l'humidité volumétrique. La nature bidimensionnelle du travail est illustrée pour le cas des pertes de l'humidité par évaporation extérieure du sol.

Des recherches théoriques et expérimentales ont été faites par Z. Q. CHEN, M. & al, 1999 [62], pour étudier le phénomène de transfert de la chaleur et de masse dans le sol non saturé avec des conditions aux frontières extérieures normales. Un nouveau modèle du transfert de la chaleur et du déplacement de l'humidité dans les milieux poreux non saturés a été développé théoriquement, dans lequel les gradients de la teneur volumique en eau, de la température et de la pression partielle de vapeur ont été considérés comme des forces d'entraînement principales qui influencent le processus de transfert thermique et de masse. Un ensemble d'équations couplées, non linéaires, aux dérivées partielles a été développé. Ces équations sont liées dynamiquement aux conditions aux frontières extérieures. Le phénomène de transfert dans le sol résultant du rayonnement solaire a été étudié expérimentalement.

H. R. THOMAS et al 1998, [63] proposent un nouveau modèle numérique tridimensionnel de transfert couplé de la chaleur, de l'humidité et de l'air dans le sol non saturé. Le modèle développé est adapté au transfert de l'humidité par migration, au transfert thermique par conduction, convection et par chaleur latente de vaporisation. La base théorique du modèle est de définir la solution par l'utilisation des méthodes des éléments finis et des différences finies avec des limites temporelles qui sont brièvement présentées. L'objectif de cette étude est la vérification de la nouvelle solution numérique. Ceci est réalisé par l'intermédiaire des comparaisons avec les solutions indépendantes du transfert de la chaleur, de l'humidité et de l'air dans un sol non saturé. Le modèle physique prend en considération les propriétés hydrauliques. La conductivité thermique est également une fonction du taux de l'humidité de sol. Le nouveau modèle est également appliqué à un certain nombre de cas où est spécifié le besoin de développement d'un autre modèle plus complet qui donne des résultats exacts pour les cas bi et tridimensionnel.

Dans le travail élaboré par A.W. Fan et W. Liu 2003 [64], un modèle mathématique a été établi pour décrire les mécanismes physiques du transfert de la chaleur et de la matière dans des médias poreux non saturés, quelques comparaisons entre les variations quotidiennes de température du sol dont cinq conditions différentes ont été faites. Les résultats des simulations numériques prouvent que la température ambiante et le flux solaire de la chaleur radiante ont un effet sur la teneur en eau du sol, et que la vitesse de vent, l'humidité relative atmosphérique et la porosité de sol exercent des effets significatifs sur la variation quotidienne de la température du sol.

Un résumé du traitement macroscopique bidimensionnel des équations du bilan d'énergie dans un milieu (sol) avec une configuration cylindrique décrivant le système du transfert de la chaleur et de la matière dans le sol non saturé est donné par B.Gopal et Reddy 2001 [65]. Les lois hydrodynamiques décrivant l'écoulement de l'eau dans un sol non saturé sont également présentées. Les procédés numériques utilisés pour résoudre les équations sont décrits. Des caractéristiques du programme machine correspondant sont également discutées. Les résultats obtenus avec les équations en coordonnées cylindriques sont comparés aux résultats précédemment rapportés basés sur le système cartésien. On observe que les résultats obtenus avec des formulations pour le cas de coordonnées cylindriques sont vérifiables par les procédés expérimentaux. Les différents modes de transfert thermique et le mouvement des fluides dans un lit d'argile couplé à une pompe à chaleur sont discutés. La diffusion de la chaleur dans le sol par la conduction s'avère prédominante pour le cas de chauffage, Le transfert par convection devient significatif à très haute température sinon il devient négligeable.

M. Piechowski 1999 [66] propose une nouvelle approche de simulation d'un échangeur de chaleur horizontal ayant pour résultat une meilleure exactitude et en même temps un effort informatique réduit. L'article se limite à l'analyse de l'interface sol tube pour les plus grands gradients de la température et de l'humidité. Le modèle tient compte du transfert de la chaleur et de l'humidité dans le sol et traite numériquement la réponse thermique du sol sous l'effet du flux de la chaleur donné par le passage d'un fluide caloporteur dans le tube de GHE (ground heat exchanger). Il présente le profil du champ de la température de sol autour du tube et le profil de la température du fluide caloporteur en circulation. Une comparaison des résultats obtenus en utilisant les méthodes implicites et explicites pour résoudre l'ensemble des équations qui décrivent le phénomène du transfert nous indique que :

-La méthode implicite exige la linéarisation partielle des équations de transfert de la chaleur et de la matière mais les résultats obtenus dans le temps exigent considérablement un peu plus de simulation.

-La formulation explicite tient compte de la solution de l'ensemble des équations non linéaire du transfert couplé de la chaleur et de la matière

L'analyse des deux méthodes montre que la différence entre les solutions obtenues est négligeable alors il est préférable de favoriser la formulation implicite.

S. Ali Pourhashemi et al 1999 [67] ont montré que l'étude du transfert thermique dans les milieux poreux est importante dans divers champs de technologie, y compris le sol. La plupart des modèles de transfert thermique sont théoriques en nature. En conséquence, cette étude a été entreprise pour réaliser des études théoriques et expérimentales du transfert thermique dans deux différentes matrices de sable. Un modèle mathématique basé sur la loi de Fourier de la conduction de la chaleur pour un système unidimensionnel avec la conductivité thermique variable a été développé. La partie expérimentale a inclus des échantillons de sable chauffés dans un petit réacteur à four infrarouge. Les profils de température dans les matrices de sable ont été captés par des thermocouples. Ils ont estimé que la conductivité thermique en bloc est linéairement proportionnelle à la température. Les profils de température obtenus pour différents types de sable ; sable ordinaire, sable de mer et quartz jusqu'à K 1300

Une recherche a été conduite par Barry J. Dempsey 1978 [68] pour développer un modèle complet décrivant le transfert de l'humidité dans les conditions non isothermes du sol. La littérature a indiqué qu'un modèle basé sur les équations de Philip et de De Vries pour le transfert non isotherme de l'humidité et de la chaleur par conduction donnera les meilleurs résultats. En employant des méthodes numériques, par approximations implicites des équations de transfert de l'humidité et de la chaleur, le profil de la température et de la teneur en eau dans le sol en fonction du temps a été obtenu. Les études de validation indiquent que le modèle de l'humidité dans le sol peut être utilisé pour décrire exactement le mode de transfert de masse dans le sol. Le modèle a été validé en employant des données hydrauliques obtenues par des études au laboratoire faites sur des colonnes de différents types de sol compact.

La technique de la chaleur sensible dans la roche volcanique a été utilisée par H. Hüseyin Öztürk 2004 [69]. Dans le cadre d'une étude expérimentale pour le stockage quotidien de l'énergie dans le sol, un capteur solaire de 27 m^2 a été monté à un angle d'inclinaison de 55° . Les dimensions de l'unité de stockage de chaleur dans le lit de roche sont de $6 \times 2,06 \text{ m}^2$. L'unité de stockage de la chaleur est réalisée sous le sol, le volume de stockage sous le sol a été rempli de 6480 kilogrammes de matière volcanique. Des analyses d'énergie ont été réalisées afin d'évaluer l'efficacité du système. Pendant les périodes de remplissage, les taux quotidiens de moyenne d'énergie thermique stockée dans l'unité de d'emmagasinage de la chaleur sont évalués pour le cas du stockage et du

déstockage, respectivement. On a constaté que les efficacités quotidiennes d'énergie nette moyenne dans les périodes du stockage varient entre 2,03 et 39,7 %, L'efficacité quotidienne d'énergie nette moyenne du système de d'emmagasiner de la chaleur est restée presque constante pendant toute la période du stockage. L'efficacité maximum d'énergie du système de déstockage de chaleur est sensiblement élevée.

Benny Bøhm 2000 [70] s'est intéressé à la détermination des pertes de chaleur à partir des tubes de chauffages enterrés dans le sol ou circule de l'eau chaude. L'auteur a présenté une nouvelle méthode pour déterminer la valeur de la température au sol et cela par l'utilisation des équations équilibrées du bilan énergétique et de perte de chaleur, par des simulations numériques et par l'expérience, la valeur de cette température du sol loin des tubes et près de la surface du sol dans le cas des tubes non isolés est faible contrairement au cas où les tubes sont isolés et loin de la surface du sol. L'auteur a fait toujours recours à l'approche numérique pour résoudre le problème.

La validation du modèle au sol comme échangeur de chaleur (Ground heat exchanger ou GHE) est présentée par M. Piechowski 1998 [71] en utilisant les données expérimentales obtenues pour l'analyse de GHE composé par des tubes simples ou doubles pour une configuration horizontale avec la variation de la conductivité thermique du sol, la chaleur spécifique et la densité. En conclusion, l'étude thermique d'un GHE est réalisée par l'utilisation des modèles de transfert de la chaleur et de la masse, l'auteur constate que le mode de transfert par conduction est le plus important par rapport aux autres et donne une idée sur l'influence de l'humidité initiale de sol sur le fonctionnement thermique d'un GHE.

Z. Q. Chen et al 1999 [72] ont fait des investigations théoriques et expérimentales dont le but est la détermination du mode de transfert de la chaleur et de l'humidité dans le sol non saturé dans des conditions extérieures normales. Théoriquement, un nouveau modèle du transfert de la chaleur et la migration de l'humidité dans les milieux poreux non saturés a été développé dans lesquels les gradients de la teneur volumétrique en eau, de la température, et de la pression partielle de vapeur ont été considérés comme forces d'entraînement principales qui influencent directement sur le processus du transfert couplé (chaleur, masse) dans le sol non saturé. Un ensemble d'équations partielles non linéaires a été développé. Ces équations sont liées dynamiquement aux conditions aux frontières. Le transfert de la

chaleur et de l'humidité dans le sol sous un rayonnement solaire a été étudié expérimentalement. La température et la teneur volumétrique en eau ont été mesurées dans des conditions différentes. Le traitement des équations se fait à la fin numériquement.

Un modèle analytique et numérique pour un système de pompe à chaleur solaire avec un réservoir cylindrique pour le stockage souterrain saisonnier est développé. Le système de chauffage se compose des capteurs solaires plans, d'un réservoir cylindrique de stockage souterrain, d'une pompe à chaleur et d'une maison à chauffer pendant la saison d'hiver. Recep Yumruta et al 2003 [73] ont développé la solution analytique du problème qui peut être obtenue par l'application de la transformée de Fourier. La solution analytique présentée est utilisée pour déterminer la variation annuelle de la température de l'eau dans le réservoir cylindrique, le profil de la température du sol entourant le réservoir et le fonctionnement périodique annuelle du système de chauffage. Les auteurs font recours à un programme de simulation numérique.

Makoto Tago 2005 [74] a fait une étude qui a été réalisée pour étudier les caractéristiques d'extraction de la chaleur des sources géothermiques peu profondes en utilisant un échangeur de chaleur coaxial. D'abord, un programme de simulation sur ordinateur pour un échangeur de chaleur coaxial a été réalisé et vérifié par des expériences au laboratoire. Après vérification de l'efficacité du programme machine utilisé, une simulation numérique pour un modèle vraie grandeur a été réalisée, l'auteur a constaté que le mode de transfert de chaleur dominant est la conduction de la chaleur. Il a pris en considération l'influence des caractéristiques d'extraction de la chaleur, la nature du tube, le diamètre intérieur et de mode de circulation du fluide caloporteur sur le taux d'extraction de la chaleur.

Différentes versions du chauffage ou du refroidissement du sol par des tubes enterrés sont présentés par L. L. Vasiliev 1988 [75] où la source d'énergie pour le chauffage est le soleil, la biomasse ou la chaleur récupérée des entreprises industrielles et l'air froid comme source froide. L'utilisation des tubes enterrés comme source de chaleur en hiver permet d'éviter la congélation de la terre afin d'augmenter la force mécanique pour la construction des chaussées. Des systèmes souterrains de stockage de chaleur à long terme sont considérés, dans lesquels l'énergie solaire et la biomasse sont accumulées et puis transférées aux

logements. L'auteur propose une étude pour le stockage de l'énergie de différentes sources pour différents usages.

M. Balghouthi et al 2005 [76] ont fait une étude expérimentale des comportements thermique des sols secs et humides chauffés par le passage de l'eau chaude dans des petits tuyaux enterrés. Cette étude a été effectuée sur un prototype semblable à une serre chaude agricole de type tunnel. Le procédé expérimental consisté à effectués trois différentes phases de mesure distinguées par trois degrés de température du fluide caloporteur à savoir, chauffage à °C 70, chauffage au °C 40 et sans chauffage en été, les quantités mesurées sont la température du sol, la teneur en eau du sol à diverses profondeurs, le flux extérieur de la chaleur de sol, le rayonnement solaire sous la couverture en plastique, la température de l'air et de l'humidité relative interne et externe dans les sols non saturés. Les auteurs concluent que l'échange thermique dans le sol est compliqué par le fait que le transfert de la chaleur et de la masse est un processus couplé. Pendant la variation quotidienne de la température de sol ils ont constaté que l'amplitude de température de surface était plus haute dans le sol humide que dans le sol sec. La teneur en eau a augmenté pendant la journée et a diminué pendant la nuit. L'amplitude de variation journalière de la teneur en eau était plus haute sans chauffage souterrain et diminue avec diminution de la température des tuyaux enterrés dans le sol.

R. E. S. Moya et al 1999 [77], ont fait Une étude expérimentale de transfert de la chaleur et de l'humidité autour d'un élément chauffé est enterré dans un sol non saturé. Le but principal de ce travail est la détermination de la température autour des fils électriques de haute tension enterrés dans le sol dans des secteurs urbains. En présence du courant électrique, ces câbles produisent de la chaleur qui doit être absorbée par le sol environnant afin de garder la température de câble à des niveaux de sécurité souhaités; la température des câbles dépend alors de la capacité de sol d'absorber cette chaleur. C'est un phénomène complexe qui implique plusieurs mécanismes de transfert de la chaleur et d'humidité. Des expériences ont été exécutées pour le chauffage constant et cyclique s'étendant de 8 à 80 W/m. Le flux de la chaleur et les résultats temporels du contenu de l'humidité sont rapportés, des calculs employant un modèle bidimensionnel ont été également exécutés et une bonne concordance a régné entre les résultats numériques et expérimentaux. Les auteurs ont constaté que les sols tels que celui utilisé dans le travail pour leur expérience ont une grande capacité de retenir de l'humidité qui est nécessaire pour extraire de la chaleur des câbles électriques.

Le modèle analytique de Hendrick J. H., Havens J. A., 1973 [78] développé pour la prédiction des températures dans les systèmes de chauffage du sol par tuyaux enterrés a été testé sur deux dispositifs expérimentaux : l'un installé sous abri et l'autre en plein champ. Il est apparu que la non prise en compte par ce modèle des conditions de température imposées en profondeur entraînait des écarts importants entre les températures mesurées et calculées. Le développement d'un complément théorique de ce modèle autorisant la prise en compte de températures imposées en profondeur permet d'atteindre une bonne approximation dans le calcul des températures du sol sur tout le profil et permet l'analyse du bilan thermique dans le sol : la puissance totale dissipée par les tuyaux, le flux de chaleur vers la surface du sol ainsi que le flux de chaleur vers la nappe phréatique peuvent être calculés ou déduits

Les vérifications expérimentales du modèle analytique de chauffage du sol par tuyaux enterrés développée par Thierry BOULARD , 1984 [79] montrent que la prédiction des températures est satisfaisante près de la surface du sol. Pour obtenir une prédiction aussi satisfaisante en profondeur, notamment lorsqu'il existe une nappe phréatique, il est nécessaire de modifier le modèle de manière à pouvoir tenir compte d'une condition de température imposée supplémentaire. Avec cette condition, le modèle permet d'atteindre une bonne précision dans le calcul du champ de température créé dans le sol et de la puissance dissipée. Sur le plan fondamental, on peut considérer, comme l'ont montré des travaux récents consacrés au stockage de chaleur dans le sol (Person J. P., 1981(80)), que le fait de ne pas prendre en compte la thermomigration se justifie dans le cas où la température des tuyaux est assez basse ($T! < 40$ °C). Par contre, pour des températures plus élevées, le poids de ces échanges devient très important, d'autant plus qu'ils modifient aussi considérablement les propriétés thermiques du sol. Pour résoudre ce problème et ceux qui nécessitent la prise en compte d'hypothèses plus réalistes (système tridimensionnel, évolution spatiale de C et X, conditions de températures aux limites complexes...), il est alors nécessaire de chercher une solution par l'intermédiaire d'un modèle numérique. Cependant, les modèles analytiques de chauffage du sol ne perdent pas leur intérêt, comme le montrent les travaux récents consacrés à la modélisation analytique de l'extraction de chaleur du sol à l'aide de tuyaux enterrés

L'approche de (Claesson J., Dunand A, 1983 [81]) par la facilité de son application dans les régimes transitoires, il devraient permettre l'étude des processus de stockage et de déstockage de chaleur dans le sol qui interviennent dans le fonctionnement de la majorité des serres « solaires ». Sur le plan expérimental, le champ de température créé par un système de

tuyaux enterrés ainsi que la puissance calorifique qu'ils développent ont été mesurés par de nombreux auteurs Alpert M. E., & al ,1976 [82]; Baille A., Boulard T., 1980 [83]) ; aussi bien pour des tuyaux profondément enterrés (0,4 à 0,8 m) que pour des tuyaux situés près de la surface du sol (0,05 m). Parallèlement à ces études expérimentales, des modèles théoriques de sol chauffé ont été mis en oeuvre :

- soit des modèles numériques très complets prenant en compte les échanges couplés, (chaleur-masse) en régime transitoire, du type de celui qui a été développé à l'Université d'Oregon (Boersma L& al., 1974 [84]).
- soit des modèles analytiques plus simples, qui ne prennent en compte que les échanges de chaleur en régime permanent, comme le modèle développé par Hendrick J. H., Havens J. A., 1973 [85]).

Sur le plan de l'utilisation pratique, les modèles numériques ont sans doute un champ d'application plus large, puisque leurs hypothèses de base sont moins restrictives, mais leur emploi nécessite la connaissance précise d'un nombre élevé de paramètres d'entrée comme les propriétés thermo hydriques du sol dont la mesure est longue et difficile.

A l'inverse, les modèles analytiques, qui reposent sur des hypothèses moins réalistes, permettent d'obtenir des formules analytiques et donc de calculer facilement, à partir de la connaissance d'un nombre restreint de paramètres d'entrée, le champ de température du sol et la puissance dissipée par les tuyaux enterré , la validation expérimentale du modèle de [85] a été faite à partir des résultats d'essais de chauffage du sol réalisés avec des eaux à basse température, et permet de proposer un certain nombre de modifications et extensions qui permettent d'élargir son champ d'application, notamment pour prendre en compte une condition de température imposée en profondeur.

2.2-Analyse et Commentaires

L'analyse des différents articles sélectionnés dans le cadre de cette recherche montre que le stockage de l'énergie solaire dans le sol peut jouer un rôle important dans le futur énergétique du monde que se soit dans la vie quotidienne de l'homme ou dans l'industrie, à condition de maîtriser les bases théoriques. Ce type de stockage est utilisé en pratique pour:

- le chauffage de l'eau.
- le chauffage des habitations.
- la climatisation et le conditionnement de l'air.

- la production du froid et de la glace.
- les sources de chaleur pour une pompe à chaleur.
- le chauffage des sols cultivables pour l'augmentation du rendement de la récolte.
- l'optimisation de l'installation des lignes de conduite d'eau, de gaz, et de pétrole enterrées dans le sous sol.
- l'enrichissement des possibilités d'utilisation de l'énergie en général et de l'énergie solaire en particulier.
- la réduction de la consommation de l'énergie provenant de sources traditionnelles.

Les références analysées sont classées selon trois catégories, à savoir :

- L'importance du stockage thermique dans le sol.
- Les recherches théoriques et expérimentales réalisées dans cette direction.
- Les problèmes qui existent toujours et qui nécessitent d'avantage d'études et de recherches. Les études menées font apparaître clairement les mécanismes de transfert de chaleur et de masse dans les milieux considérés et donnent quelques informations et idées relatives à la distribution des températures dans le sol. Ces dernières sont obtenues numériquement car aucun traitement analytique concernant ce problème n'a été fait pour décrire les régimes de transfert de chaleur et de masse autour d'un dispositif enterré dans le sol, d'une part, et aussi estimer les influences de la surface couvrante sur la température du sol d'autre part..

2.3- Conclusions sur le transfert de chaleur et de masse dans le sol.

En étudiant les processus de transfert de chaleur et de masse dans le sol, la plupart des auteurs qui ont travaillé sur le sujet considèrent que les propriétés thermiques du sol peuvent généralement être admises comme constantes (la conductibilité thermique, l'humidité, la température du sol, etc.). Partant des équations de base décrivant le transfert de chaleur et de masse sous leurs formes adimensionnelles, ils proposent des résolutions par des méthodes analytiques et numériques qui vérifient les résultats obtenus à partir des modèles expérimentaux.

Les résultats calculés théoriquement et obtenus expérimentalement sont exprimés seulement par des courbes de distribution de températures et d'humidité avec des conditions aux limites bien définies. Les auteurs ont omis dans leurs objectifs, l'évaluation ou

l'estimation de la quantité de chaleur rentrant en jeu pendant le processus de stockage et le temps nécessaire à l'opération. La terre est un milieu perméable, non homogène constitué de différents matériaux solides, gaz et liquides (de l'eau en général) ; pour cela le processus du transfert de chaleur est reconnu comme étant complexe. Son étude pose d'énormes difficultés, du fait de l'incapacité de cerner la totalité des caractéristiques thermiques de ses constituants changeant d'une façon aléatoire dans l'espace et dans le temps (le transfert de chaleur est lié directement aux caractéristiques physico-chimiques de la terre).

Le transfert de chaleur dans le sol se fait par conduction et par convection avec ou sans changement de phases et du fait de la présence de l'air et de l'eau, il est généralement associé au transfert de masse sur la base des considérations dynamo-thermiques non réversibles. La difficulté primordiale réside dans l'analyse des paramètres influents sur le processus, car l'eau et sa vapeur se diffusent des hautes vers les basses concentrations.

Lors du chauffage d'un élément de terre, l'eau contenue dans cet élément s'évapore et se mélange avec l'air qui se dilate en provoquant un transfert simultané de chaleur et de masse vers la région la moins chaude [7]. Plusieurs chercheurs ont étudié la conduction thermique dans le sol ainsi que le transfert de masse. Ils ont établi de nombreuses relations mathématiques très élaborées pour le calcul du flux de chaleur pour différents types de sol, et sa relation avec l'humidité du sol considéré (d'une façon générale, l'humidité favorise le transfert de masse). D'autres chercheurs ont établi d'autres relations mathématiques qui montrent l'influence de la nature du sol, de sa température et de la pesanteur, sur le processus du transfert thermique. Enfin, il faut noter que toutes les recherches effectuées dans cette direction montrent clairement la non stationnarité du processus.

On s'intéresse alors, dans le cadre de notre recherche, au profil de températures lors de l'opération du stockage, c'est-à-dire à la distribution de la température autour d'un tube où circule un fluide caloporteur (l'eau en général) qui cède de la chaleur au sol afin d'être stockée et ensuite récupérée grâce à un circuit inverse. On constate alors que le mode de transfert de chaleur le plus dominant est la conduction thermique, que nous allons étudier analytiquement, étant donné que numériquement le processus est largement traité par différents chercheurs.

En conclusion on peut dire que le traitement macroscopique bidimensionnel des équations du bilan d'énergie dans un milieu (sol non saturé) avec une configuration cylindrique décrivant le système du transfert de la chaleur et de la matière, développé par

différents auteurs, montre que la diffusion de la chaleur dans le sol par la conduction s'avère prédominante pour le cas du chauffage. Le transfert par convection s'avère négligeable dans la plupart des cas et ne devient significatif qu'à très haute température. Sur le plan fondamental, on peut considérer, comme l'ont montré des travaux récents consacrés au stockage de chaleur dans le sol, que le fait de ne pas prendre en compte la thermomigration se justifie dans le cas où la température des tuyaux est assez basse (généralement inférieure à 45 °C). Par contre, pour des températures plus élevées, le poids de ces échanges devient très important, d'autant plus qu'ils modifient, aussi, considérablement, les propriétés thermiques du sol.

2.4- Modèles déjà utilisés.

En même temps que l'étude théorique qui tente de résoudre les équations de base décrivant le phénomène de transfert de chaleur et de masse dans le sol pour chaque cas (stationnaire et non stationnaire), les auteurs précédents ont proposé des analyses expérimentales qui ont abouti à des résultats assez réels et objectifs à partir desquels on peut vérifier les résultats obtenus théoriquement et affirmer la précision de la méthode théorique choisie. Ces approches expérimentales sont élaborées pour bien connaître la distribution de la température dans le sol, en général, et autour des tubes où circulent des fluides chauds, en particulier. Ils sont assez simples du point de vue installation et peuvent être complétés en fonction des objectifs visés afin d'obtenir le maximum d'informations. On distingue deux types d'installations :

2.4-1- Système à circuit fermé Vertical

Le système à circuit fermé fournit et puise de la chaleur dans le sol même et fonctionne à partir d'une boucle continue formée de tubes en plastique ou en aluminium de conception spéciale, enfouis dans la terre. On utilise des tubes de cuivre dans le cas des systèmes à détente directe. La tubulure est raccordée à la thermopompe, installée dans la construction, et forme une boucle souterraine étanche dans laquelle circule un fluide caloporteur. Alors que l'installation à circuit ouvert utilise de l'eau provenant d'un puits, le système à circuit fermé permet la re-circulation de la solution servant au transfert de la chaleur dans une tubulure sous pression. La tubulure est disposée verticalement et horizontalement. La configuration verticale du circuit fermé (figure 4) convient à la plupart des propriétés de banlieue, où l'espace est restreint. Les tubes sont insérés dans des trous d'un

diamètre défini, jusqu'à une profondeur variant entre 18 et 60 m, selon l'état du sol et la puissance de l'installation.

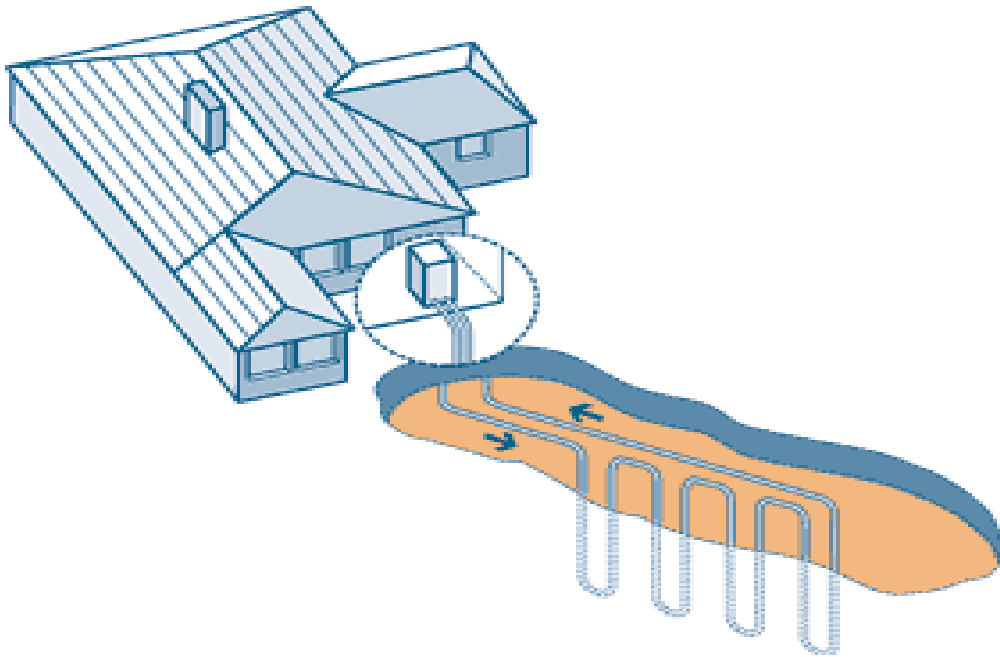


Figure (4) : Montage vertical d'un système à circuit fermé à boucle en U unique

2.4.2- Système à circuit fermé horizontal

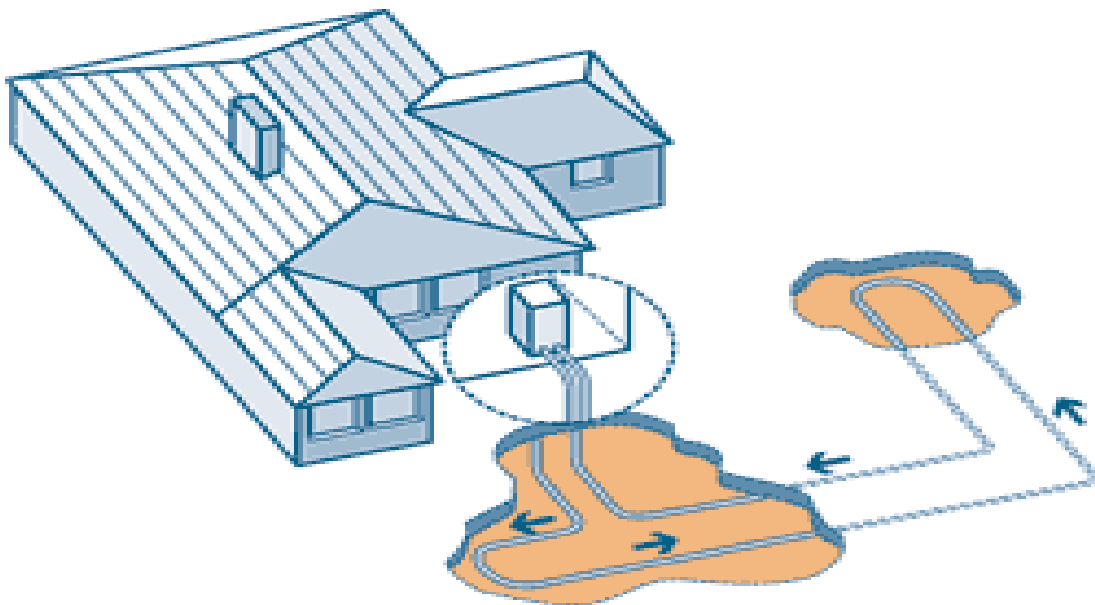


Figure (5) : Montage horizontal d'un système à circuit fermé à couche unique

La disposition horizontale (figure 5) se retrouve plus fréquemment dans les régions rurales, où les terrains sont grands. La tubulure est installée dans des tranchées d'une profondeur variant entre 1,0 et 1,8 m selon le nombre de tubes dans chaque tranchée. L'échangeur de chaleur horizontal le plus répandu est constitué de deux tuyaux placés côte à côte dans une même tranchée. Lorsque l'espace est restreint, on a recourt parfois à un échangeur de chaleur en spirale, et on peut même superposer quatre ou six tubes dans des tranchées plus courtes. Du point de vue de l'environnement, la présence de circuits verticaux ou horizontaux n'a aucun effet défavorable sur le paysage, pourvu que les trous et les tranchées soient bien remblayés et le sol fermement compacté.

Dans l'étude présente, on s'intéresse plus particulièrement, à la configuration horizontale pour laquelle une solution analytique de l'équation de la chaleur sera développée. L'illustration suivante montre une coupe transversale d'une tranchée pour les boucles horizontales. Ces dernières sont installées dans des endroits où il est facile de creuser. Étant donné qu'elle exige un terrain plus étendu que les autres configurations, la boucle horizontale est habituellement installée dans les régions rurales où l'espace le permet.

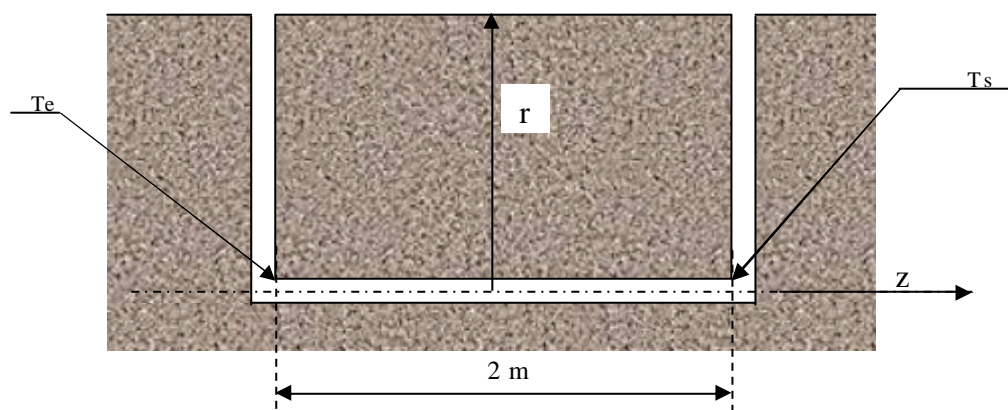


Fig. (6) : Boucle horizontale réelle

- Le tuyau est généralement enfoui dans une tranchée à une certaine profondeur sous forme d'une boucle continue ou d'une série de boucles parallèles.

- La conception joue un rôle essentiel, car la longueur des tuyaux horizontaux varie avec la chaleur produite exigée.

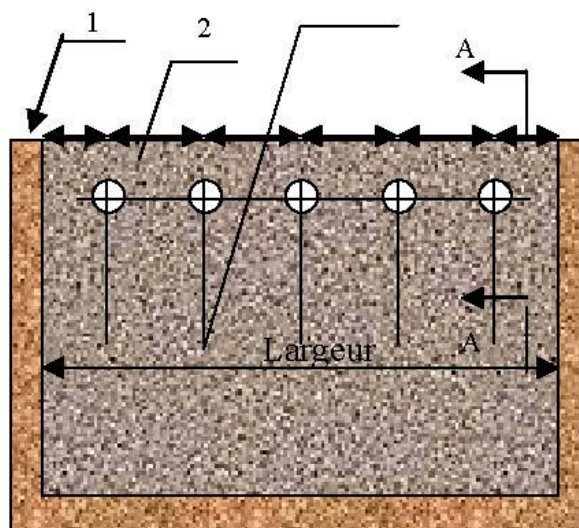
2.4.3- Conception des boucles des systèmes des circuits fermés

La conception et la longueur de la boucle sont déterminées par divers facteurs, tels que

- -Les conditions du sol et la configuration de la boucle.
- -La capacité de l'équipement à donner des résultats fiables.
- -Les pertes de chaleur nominales de la maison.
- -L'utilisation d'un désurchauffeur.
- -Les exigences par rapport à la température d'entrée du fluide caloporteur.

On peut, de ce fait, conclure que :

1. Les boucles horizontales ne sont pas recommandées dans les sols sablonneux secs et les sols en graviers, mais elles sont bien adaptées aux sols sablonneux humides et argileux.
2. Plus l'enfouissement de la boucle est profond, plus le système peut extraire de la chaleur du sol.
3. Les modèles de boucle horizontale comprennent en général de un à cinq tuyaux ou un tuyau en serpentifin,



Isolation thermique

2- Sable

3- Tuyau transportant l'eau chaude

Fig. (7) : Boucle à plusieurs tubes enterrés dans le sol

2.5- Conclusion

D'après l'analyse des différents articles scientifiques précédents concernant le stockage thermique dans le sol, on comprend qu'il y'a toujours plusieurs problèmes importants qu'il faut continuer à étudier à savoir :

1)-Quelle est la distribution de température du sol autour de la conduite de fluide chaud (ou froid) en régime thermique non stationnaire. C'est-à-dire, comment varie le champ de température du sol autour de la conduite du fluide chaud en période du chauffage, ou froid en période de l'extraction de la chaleur.

2)-Quelle est la profondeur maximale du sol pour laquelle les caractéristiques thermiques de la surface n'auront aucun effet sur le processus de transfert.

3)- Quelle est la relation raisonnable et optimale entre la puissance thermique du fluide et le volume nécessaire du sol autour de la conduite où circule le fluide pour le stockage et le déstockage de la chaleur. Ce qui est vraiment nécessaire et utile pour calculer le nombre des tubes et choisir la façon de les installer dans le volume du sol donné (le nombre des tubes et le nombre des rangs des tubes).

Les trois problèmes mentionnés sont importants pour l'étude et le dimensionnement d'un système de stockage de l'énergie thermique dans le sol. Il s'avère d'après la revue bibliographique effectuée, que ces problèmes sont peu ou pas du tout abordés.

Ce sont, de ce fait, les raisons qui ont poussé pour l'entreprise de la présente étude et pour le développement du thème dont traite ce travail de thèse.

Chapitre 3
Approche Analytique

3.1- Introduction

Contrairement à ce qui se passe pour un milieu de stockage liquide, qui peut souvent se décrire par séparation des paramètres capacitif et convectif (modèles à un noeud), les échanges thermiques avec un milieu solide comme le sol, pour notre cas, est conductif de nature [65]. Il induit des déphasages et amortissements de température souvent difficiles à caractériser de façon intuitive, l'inhomogénéité du champs de température ne permettant généralement pas la mise en oeuvre de modèles mathématiques simples. Si, à défaut de mieux, certains auteurs utilisent tout de même de tels modèles pour le dimensionnement d'échangeurs de ce type, il reste a priori difficile, particulièrement en condition non stationnaire [66], d'estimer les paramètres fondamentaux tels que le coefficient d'échange thermique et le profil du champ de température effective du sol.

Hormis une approche approximative, basée sur une solution stationnaire et pour une géométrie restreinte (M. Koschenz et B. Lehmann, 2000 [85]), une des études analytiques les plus abouties [81] donne la solution exacte de la transmission de la chaleur latérale d'un tube cylindrique soumis à un flux de chaleur. Elle est complétée (R.L. Sawhney et U. Mahajan, 1994[86]) par l'effet qui en résulte sur la variation longitudinale de la température du flux d'air. Bien qu'y soit pris en compte le couplage thermique du sol avec sa surface libre, considérée plane et soumise à excitation périodique déphasée, pour le reste de la géométrie la diffusion dans le sol se poursuit virtuellement à l'infini, c'est à dire sans restriction sur la quantité de terrain à disposition. Il manque surtout à cette étude une interprétation physique ainsi qu'une présentation simple et opérationnelle des résultats obtenus.

Jusqu'ici, dans la littérature, la distribution de la température stationnaire au-dessous de la surface du sol soumis à une source, a été rapportée sous une forme intégrale ou asymptotique. Dans notre thèse, une solution analytique exacte est fournie, qui permet la détermination des températures au-dessous du sol autour d'un tube enterré transportant un fluide caloporteur (l'eau). La solution est basée sur des fonctions spéciales (Bessel et fonctions hypergéométriques).

3.2-Discretisation du problème thermique

Il existe des méthodes de résolution en forme locale ou en forme faible (J.P. Demailly [87]). Le cas transitoire est toujours plus délicat à résoudre que le cas stationnaire. Les solutions analytiques, basées sur la forme locale du problème (équation aux dérivées partielles avec conditions aux limites) ne peuvent pas être déterminées dans le cas général, et ne concernent que les cas académiques connus depuis longtemps. Ces cas sont pédagogiquement intéressants mais demeurent beaucoup trop limités pour l'industriel, en particulier au niveau des géométries. Ils permettent de mettre en pratique la méthode de séparation des variables, ou les séries de Fourier.

Il faut donc chercher des méthodes permettant d'approcher le comportement du modèle thermique. De nos jours l'utilisation des méthodes numériques approximatives est largement répandue pour la résolution des équations différentielles aux dérivées partielles, décrivant des processus physiques assez complexes, ce choix est généralement imposé par l'absence de solutions analytiques. Parmi ces méthodes on peut citer, la méthode des éléments finis ayant comme champ d'application les équations différentielles partielles linéaires qui ne posent pas des problèmes de continuité des propriétés physiques formulées sur les frontières des mailles, mais elle présente l'inconvénient d'être coûteuse en termes de coût lors de l'exécution des programmes informatiques élaborés spécialement à cette fin. Les méthodes des différences finies, et des volumes finis, pour leur part, même si elles sont moins performantes pour le traitement des frontières, sont plus simples pour la discrétisation des équations différentielles et donc moins onéreuses du point de vue temps de calcul, la méthode des volumes finis garantissant, de plus, les éléments de conservation.

On utilise la méthode des éléments finis pour résoudre numériquement le problème thermique. Le champ de température est discrétisé et on cherche à l'évaluer en un certain nombre de points particuliers qui sont les noeuds du maillage à partir des températures connues en ces noeuds, on peut accéder si besoin est à la température en tout point matériel par simple interpolation. La méthode est bien adaptée aux milieux non massifs, car elle permet facilement l'utilisation de matériaux non homogènes et anisotropes, et aussi la détermination de l'identité des maillages thermique et mécanique pour la thermomécanique.

La méthode des différences finies est un outil numérique basé sur l'équation locale qui est discrétisée et résolue de proche en proche : on exprime l'opérateur différentiel en un point

en fonction de l'inconnue aux points voisins, en effectuant un développement en série de Taylor du champ de température en un point. Le « maillage » de la pièce est réalisé avec des carrés en 2D ou des cubes en 3D, c'est un véritable quadrillage, ou on remplace une équation différentielle (M. Sibony & J. Cl. Mardon 1982 [88]) par un système algébrique à coefficients constants (linéaire) ou non (non linéaire). Par exemple, en uni axial, pour des différences centrées.

De ce fait, si la possibilité est offerte de développer une solution analytique convenable, cela permettrait d'évacuer l'approche numérique avec ce qu'elle comporte comme lourdeur et contrainte de modélisation, de discrétisation, de coût en temps de calcul, et, éventuellement, de vérification de stabilité et de convergence, etc.

C'est l'objet de l'étude entreprise et développée. Ainsi, il sera tout d'abord procédé à une approche par rapport au contexte des systèmes thermiques en général, en revenant aux lois générales et particulières, régissant ce type de problèmes, compte tenu des conditions aux limites associées. Les équations gouvernantes, relatives à la problématique considérée, sont ensuite développées en vue du traitement analytique recommandé, par une nouvelle méthode analytique, qui consiste à préconiser non pas une séparation de variables classique, mais plutôt une séparation (ou superposition) de fonctions.

3.3- Systèmes thermiques

Les systèmes thermodynamiques homogènes sont caractérisés par des variables d'état uniformes et constantes soumises à certaines conditions. La conduction de la chaleur est le cas particulier où la non uniformité de la température entraîne un transfert d'énergie d'un point à un autre du système sans transport macroscopique de matière.

Pour un système solide, seul ce processus de transfert est possible.

Pour un système fluide, il peut aussi se produire des transferts d'énergie par transport macroscopique de matière, ce dernier processus est appelé convection de la chaleur. Le milieu matériel, siège d'un phénomène de conduction de la chaleur, peut être

- Homogène ou hétérogène.

- Isotrope ou non isotrope.
- Avec des dimensions finies ou infinies.
- En " contact " avec des sources de chaleur internes ou externes

3.4- Régimes thermiques

Les régimes de transfert Thermique peuvent être classés comme c'est donné par Charlie Harper [89]. Si un milieu est en contact avec une source de chaleur interne ou externe, le champ de température sera noté : $T(M, t)$

On distingue alors plusieurs régimes thermiques :

- les régimes permanents : pour lesquels la température en tout point du milieu est indépendante du temps, le déséquilibre étant entretenu par les sources de chaleur.
- les régimes périodiques établis : pour lesquels la température, en tout point, effectue des oscillations périodiques indépendantes du champ de température initial
- les régimes transitoires : qui correspondent à l'évolution d'un système d'un état initial (permanent ou en équilibre) vers un état final (permanent ou en équilibre), provoquée par un changement à l'instant initial des sources; le champ de température $T(M, t)$ dépend du champ de température initial $T(M, 0)$ mais l'influence de celui-ci s'estompe avec le temps.
- les régimes variables : pour lesquels les sources évoluent constamment. Le champ de température $T(M, t)$ dépend des valeurs instantanées des sources et des évolutions antérieures.
-

3.5- Loi de Fourier

Si les variations de températures ne sont pas trop importantes, on rend compte localement des phénomènes de conduction de la chaleur par la loi de Fourier [89], à savoir le vecteur densité de flux de chaleur \vec{J}_Q pour un milieu isotrope est égal à :

$$\vec{J}_Q = -\lambda \text{grad}T \quad (14)$$

? est appelée conductivité thermique du milieu et traduit l'aptitude à conduire la chaleur.

Les tangentes en chaque point au vecteur \vec{J}_Q déterminent les lignes de flux de chaleur. Un tube de flux est constitué par un ensemble de lignes de flux s'appuyant sur un contour fermé. La loi de Fourier (14) est une loi phénoménologique [89]; les théories sur l'interprétation microscopique du processus de conduction dépendent de la nature du milieu : gaz, liquide, solide amorphe, solide cristallin ou métal ; elles sont loin d'être achevées.

3.6- L'équation de la chaleur, l'équation du bilan

Entre deux instants successifs t et $t + dt$, le premier principe de la thermodynamique pour un système, peut être écrit :

$$dE + dU = dQ + dW \quad (15)$$

dE représente la transformation, au sein du milieu, de l'énergie potentielle " chimique " en énergie calorifique ; il s'agit de l'effet Joule où l'énergie calorifique est le résultat d'une réaction exothermique ou endothermique. Ce type d'énergie est appelé source de chaleur interne.

dU est la variation de l'énergie interne.

dQ représente les échanges de chaleur aux frontières du système.

dW représente les échanges de travail aux frontières du système.

On considère un élément d'un milieu quelconque, suffisamment petit pour être homogène, de volume V et limité par une surface S .

$P(M, t)$ est la puissance calorifique volumique des sources internes, si bien que :

$$dE = \iiint_V P(M, t).dV \quad (16)$$

Les évolutions du milieu, sauf cas particulier, se font à pression constante.

$$dU + dW = dH = \iiint_V \overline{c_p \mathbf{r}} \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (17)$$

Où $\frac{\partial T}{\partial t}$ est l'élévation de température par unité de temps, \mathbf{r} et c_p représentent respectivement la masse volumique et la capacité calorifique massique à pression constante du milieu.

L'application du premier principe de la thermodynamique conduit à l'équation de la chaleur :

$$\text{div}(\mathbf{l} \overline{\text{grad} T}) - c_p \mathbf{r} \frac{\partial T}{\partial t} = -P \quad (18)$$

Si les caractéristiques thermo physiques \mathbf{l} et $c_p \cdot \mathbf{r}$ d'un matériau, ne dépendent pas de la température, alors l'équation indéfinie de la chaleur s'écrit :

$$\Delta T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P}{\mathbf{l}} \quad (19)$$

Où

$$a = \frac{\mathbf{l}}{c_p \mathbf{r}} \quad (20)$$

a est appelée diffusivité thermique du matériau et se mesure, dans le système MKSA en m^2/s

3.7- Les équations aux frontières d'un milieu

Le milieu, siège d'un phénomène de conduction, est en contact, à ses frontières, avec des fluides et/ou le vide. On traduit les échanges de chaleur par des lois " linéarisées" de type [89] :

$$\mathbf{J} = -\mathbf{l} \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{h}} \right) M_j = h_j [T(M_j, t) - T_{car}] \quad (21)$$

Où

M_j est un point quelconque de la frontière.

h_j est le coefficient d'échange de chaleur avec la source externe à température caractéristique T_{car} .

Cette loi est connue sous le nom de condition de 3ème espèce appelée aussi condition de Fourier, on peut distinguer deux cas particuliers :

Premier cas où $h_j \rightarrow \infty$

$$\text{Conduit à } T(M_j, t) = T_{car} \quad (22)$$

Puisque la densité de flux de chaleur échangée ne saurait être infinie, On dit que la température à la frontière est imposée par le milieu extérieur, cette loi est connue sous le nom de la condition de 1ère espèce appelée aussi condition de Dirichlet ou de température imposée.

Deuxième cas quand $h_j \rightarrow 0$

On aura alors

$$J = -I \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{h}} \right) M_j \quad (23)$$

Une valeur nulle de la densité de flux de chaleur correspond à une isolation thermique. Par contre, une valeur non nulle est obtenue si

$$T_{car} \gg T(M_j, t)$$

On dit que le la densité de flux de chaleur à la frontière est imposée, cette loi est connue sous le nom de condition de 2ème espèce appelée aussi condition de Neumann ou de " flux imposé ".

3.8- Cas de plusieurs milieux isotropes en contact

Pour l'étude thermique du cas de plusieurs milieux isotropes, en plus des équations indéfinies de la chaleur, propres à chaque milieu et des équations aux frontières extérieures, il

convient d'ajouter les équations aux frontières intérieures, c'est à dire au contact physique des milieux isotropes [89].

A la séparation de deux milieux, il existe une couche de transition. L'épaisseur de cette couche peut être extrêmement faible si les milieux adhèrent parfaitement l'un à l'autre. Elle peut être beaucoup plus importante s'il s'agit d'un contact de deux milieux solides présentant des irrégularités de surface, réunis par un liant (collage, soudure) ou simplement accolés avec un fluide interstitiel (air par exemple). Dans ce dernier cas, le contact ne s'effectue qu'en un certain nombre de zones de faible étendue. Deux modes de transfert se superposent :

- un transfert par conduction au niveau des zones de contact,
- un transfert complexe à travers le milieu présentant des irrégularités de surface.

Dans le cas de milieux solides conducteurs, il se produit une convergence des lignes de flux vers les zones de contact où le passage de la chaleur est plus facile, appelée « effet de constriction. ». Lorsque la conductivité du milieu interstitiel est voisine de celle des milieux en contact, l'effet de constriction devient très faible et peut être négligé.

3.9- Analyse thermique

Comme dans tous les domaines de la physique, il est fondamental avant de procéder à la résolution d'un problème et avant d'entreprendre une étude, d'en faire une analyse pratique qui conduira à des équations adaptées.

Cette analyse permet l'établissement des hypothèses, parfois volontairement simplificatrices pour obtenir une solution simple qui permet de dégager des éléments sur l'influence des différents paramètres.

En conduction de la chaleur, il conviendra de s'interroger sur :

- le type de régime de transfert.
- les échanges aux frontières et les équations qui en découlent.
- les symétries du système.

Ceci fait, la méthodologie pour obtenir les équations repose sur la conservation de l'énergie appelée "bilan énergétique". A ce stade, il conviendra d'envisager la résolution mathématique, analytique ou numérique.

3.10- Expressions mathématiques de l'équation de la chaleur

Il s'agit de connaître les expressions de ΔT pour les différentes géométries possibles. Pour cela, le mathématicien utilisera le théorème d'Ostrogradski-Green, [89] à savoir :

$$\iiint_V \text{div}(\text{grad}T) dV = \iiint_V \Delta T dV = \oiint_S \text{grad}T d\vec{S} \quad (24)$$

Nous étudions le cas où les caractéristiques thermo physiques sont constantes.

La méthode du bilan thermique revient à appliquer le premier principe de la thermodynamique sur un élément de volume adapté aux géométries et aux symétries du problème thermique.

En thermique, on appelle " mur " un système où les échanges de chaleur se produisent suivant une direction cartésienne, par exemple x et $T'(x, t)$ représente le champ de température suivant le direction x .

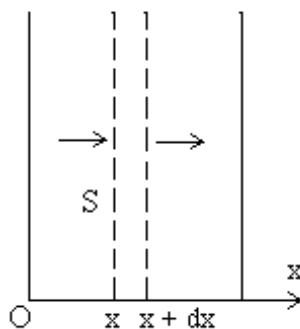


Figure (9) : Mur pour l'échange thermique

L'élément de volume adapté est compris entre les faces x et $x + dx$ de surface S arbitraire. Dans ces conditions,

$$dV = Sdx \quad (25)$$

Le flux de chaleur "entrant" par conduction par la face x est égal à :

$$-I \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x S$$

Celui "sortant" par la face $x + dx$ est égal à :

$$-I \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} S$$

L'application du premier principe conduit à :

$$-I \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_x S + PSdx = -I \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x+dx} S + \bar{c}_p \rho Sdx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P}{I}$$

Pour une symétrie de révolution sans gradient axial de température, $T(r, t)$ représente le champ de température, r étant la distance à l'axe de révolution.

L'élément de volume adapté est compris entre les cylindres coaxiaux de longueur arbitraire L et de rayons respectifs r et $r + dr$

Dans ces conditions l'élément de volume sera donné par,

$$dV = L \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \quad (27)$$

Le flux de chaleur "entrant" par conduction par la face latérale de rayon r est égal

$$-I \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_r \cdot L \cdot 2\pi \cdot r \quad (28)$$

et celui "sortant" par la face latérale de rayon $r+dr$ est égal à

$$- \mathbf{I} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r+dr} \cdot L \cdot 2 \cdot \mathbf{p} \cdot (r + dr) \quad (29)$$

L'application du premier principe conduit à :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{P}{\mathbf{I}} \quad (30)$$

3.11- Système en coordonnées Cylindriques :

Pour les systèmes qui ne varient que suivant r :

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

L'équation de la chaleur est donnée par :

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} - \frac{1}{a} \frac{dT}{dt} = - \frac{P}{\mathbf{I}} \quad (31)$$

Système à trois coordonnées cartésiennes :

$$dV = dx dy dz$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{P}{\mathbf{I}} \quad (32)$$

Système à symétrie de révolution avec gradient axial de température :

$$dV = 2\mathbf{p} r dr dz$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{P}{\mathbf{I}} \quad (33)$$

En coordonnées cylindriques (trois dimensions)

$$dV = r dr d\mathbf{J} dz$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \mathbf{J}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{P}{I} \quad (34)$$

3.12- Les régimes permanents

Il s'agit de résoudre le système d'équations linéaires Pour un milieu conducteur répondant à l'hypothèse de " barre thermique " [89] ou on régime permanent et dans un matériau isotrope, l'équation de la chaleur est une équation de Poisson :

$$\nabla^2 T = -\frac{P}{I} \quad (34\text{bis})$$

L'expression développée varie avec le système de coordonnées
Cartésiennes

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{p}{I} \quad (35)$$

Cylindriques

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \mathbf{q}^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{p}{I} \quad (36)$$

Les problèmes 1D peuvent souvent se résoudre analytiquement les problèmes 2D nécessitent souvent l'emploi de méthodes numérique traité par ordinateur. En 2D

-Cartésiennes

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = -\frac{P}{I} \quad (37)$$

-Cylindriques

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{p}{I} \quad (38)$$

Si le système est sans source on peut écrire

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (39)$$

3.13- Mise en équation d'un problème multidimensionnel

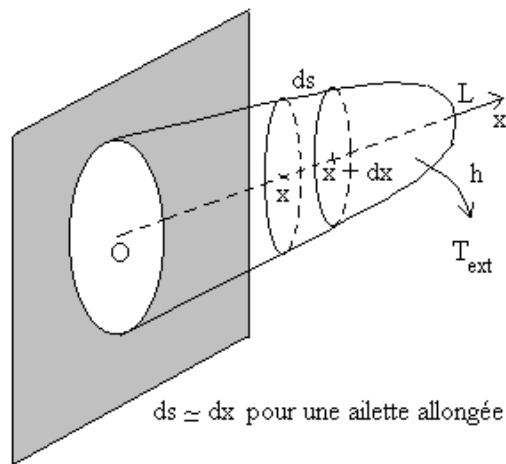


Figure (10) : Présentation du problème multidimensionnel

Le bilan thermique entre la section x et la section $x + dx$ conduit à :

$$\begin{aligned} -I \left(\frac{dT}{dx} \right)_x S(x) &= -I \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x+dx} S(x+dx) + hp(x) dx (T - T_{ext}) \\ \frac{d}{dx} \left(S \frac{dT}{dx} \right) - \frac{hp}{I} (T - T_{ext}) &= 0 \end{aligned} \quad (40)$$

$S(x)$ et $p(x)$: Sont respectivement la section et le périmètre en x .

La température extérieure sera prise comme température de référence soit $T_{ext} = 0$

Nous avons à résoudre le système d'équations où le champ de température dépend de plusieurs variables d'espace.

$$\Delta T_1(M) = 0$$

$$\left(\mathbf{I} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{h}_i} + h_i \cdot T_1 \right)_s = f_i(M_i) \quad (41)$$

La linéarité des équations permet de chercher une solution sous la forme,

$$T_1(M) = \sum_j T_1^j(M) \quad (42)$$

Avec $\Delta T_1^j = 0$ et

$$\left(\mathbf{I} \frac{\partial T_1^j}{\partial \mathbf{h}_j} + h_j T_1^j \right)_s = f_j(M_j)$$

Avec $j \neq i$

La résolution sera faite par la méthode de séparation de variables avec développement en série de fonctions orthogonales.

3.14- Méthode de Séparation de variables

Soit l'équation de la chaleur suivante :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (43)$$

Avec les conditions :

$$T(0, y) = f(y);$$

$$T(L, y) = 0$$

$$T(x, 0) = 0$$

$$T(x, e) = 0$$

Dans un premier temps, la méthode consiste à chercher une solution à variables séparées, c'est à dire sous la forme :

$$T(x, y) = g(x)h(y) \quad (44)$$

Le report dans l'équation aux dérivées partielles conduit à

$$\frac{g''(x)}{g(x)} = -\frac{h''(y)}{h(y)} = a^2 \quad (45)$$

En tenant compte du fait que le premier terme ne dépend que de x et que le second ne dépend que de y .

Les trois dernières équations aux limites pour lesquelles le second membre est nul s'écrivent

$$\begin{aligned} g(L) &= 0 \\ h(0) &= 0 \\ h(e) &= 0 \end{aligned}$$

Puisqu'elles doivent être vérifiées quel que soit y ou quel que soit x , par intégration on obtient :

$$h(y) = A \sin ay + B \cos ay \quad (46)$$

qui, après application des conditions aux limites, devient

$$h(y) = A \sin a_k y$$

Avec

$$a_k = \frac{k\pi}{e} \quad \text{et} \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

(Les valeurs possibles de $k = -1, -2, -3, \dots$ conduisent à la même solution et ne sont donc pas à considérer)

$$g(x) = C \sinh a_k (L - x) \quad (47)$$

En tenant compte de la condition aux limites

$$g(L) = 0$$

On aura

$$T(0, y) = f(y) = E \sin a_k y \sinh a_k L \quad (48)$$

Dans un deuxième temps, on remarque que, le système d'équations étant linéaire, on peut chercher une solution sous la forme d'une combinaison linéaire.

$$T(x, y) = \sum_k E_k \sin a_k y \sin a_k (L - x) \quad (49)$$

où toutes les valeurs de a_k sont possibles.

Cette combinaison est connue sous le nom de développement en série de Fourier. La dernière condition aux limites à vérifier est donnée sous la forme :

$$T(0, y) = f(y) = \sum_k E_k \sin a_k y \sin a_k (L) \quad (50)$$

Il faut maintenant déterminer les coefficients E_k par la méthode des fonctions orthogonales. Pour cela, nous multiplions chacun des membres de l'équation par $\sin a_k y$ et intégrons sur l'intervalle de variation de y . La variable d'intégration étant " muette ", nous l'appellerons y' plutôt que y . On obtient alors,

$$\int_0^e \sin a_k y' \sin a_{k'} y' dy' = 0$$

si
 $k \neq k'$

Et

$$\int_0^e \sin^2 a_k dy' = \frac{e}{2}$$

si
 $k' = k$

Le champ de température s'écrit alors :

$$T(x, y) = \int_0^e f(y') \left[\sum_k \frac{2 \sinh \frac{2p}{e} (L - x)}{e \cdot \sinh \frac{kpL}{e}} \sin \frac{kp y}{e} \sin \frac{kp y'}{e} \right] dy' = \int_0^e f(y') K(x, y, y') dy' \quad (51)$$

3.15- Champ de température à coordonnées cylindriques $T(r, J)$

Soit l'équation de la chaleur en coordonnées cylindriques r et J

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial J^2} = 0 \quad (52)$$

Pour cette équation aux dérivées partielles, les valeurs caractéristiques sont toujours fournies

La méthode de séparation de variables nous donne :

$$T(r, J) = g(r)h(J) \quad (53)$$

et conduit à :

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg}{dr} - \frac{m^2}{r^2} g = 0 \quad (54)$$

Avec

$$g(r) = A + B \ln r$$

si

$$m = 0$$

Où

$$g(r) = ar^m + br^{-m}$$

si

$$m \neq 0$$

Et

$$\frac{d^2 h}{dJ^2} + m^2 h = 0$$

$$h(J) = C + D \sin J$$

si

$$m = 0$$

Et

$$h(\mathbf{J}) = C \cos m\mathbf{J} + D \sin m\mathbf{J}$$

si

$$m \neq 0$$

L'étude des conditions aux limites :

$$1 \quad : \quad 0 \leq \mathbf{J} < 2.p$$

$$T(r, \mathbf{J}) = T(r, \mathbf{J} + 2.p)$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{J}} \right)_{\mathbf{J}} = \left(\frac{\partial T}{\partial \mathbf{J}} \right)_{\mathbf{J}+2.p} \quad (55)$$

$$1 \quad : \quad 0 \leq \mathbf{J} < \mathbf{J}_0$$

L'écriture d'une condition de type

$$\left[\frac{1}{r} \frac{dh}{d\mathbf{J}} \pm h_2 h(\mathbf{J}) \right] = 0 \quad (56)$$

N'est pas possible à cause du terme r qui ne s'élimine pas.

Les seules conditions possibles sont celles de première ou de deuxième espèce

$$h(\mathbf{J}_0 = 0) = 0$$

Et/ou

$$\left(\frac{dh}{d\mathbf{J}} \right)_0 = 0$$

Le cas particulier du cylindre plein ($r = 0$) conduit à $B = 0$ c'est à dire à

$$g(r) = A \quad \text{si} \quad \mathbf{J} = 0$$

et

$$g(r) = Ar' \quad \text{si} \quad \mathbf{J} \neq 0$$

3.16- Champ de température à coordonnées cylindriques $T(r, \theta, z)$

Considérons l'équation de la chaleur pour les coordonnées cylindriques ; (r, θ, z)

$$\frac{\partial^2(T)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2(T)}{\partial \theta^2} = 0 \quad (57)$$

La méthode de séparation de variables nous donne ;

$$T(r, \theta, z) = g(r).h(\theta).i(z) \quad (58)$$

Ce qui conduit à

$$\frac{d^2 h}{d\theta^2} + \mathbf{J}^2 h = 0$$

$$\frac{d^2 i}{dz^2} + a^2 i = 0$$

$$\frac{d^2 g}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dg}{dr} - (a^2 + \frac{\mathbf{m}^2}{r^2}).g = 0 \quad (59)$$

La direction z doit être homogène :

$$i(z) = A \cos az + C \sin az \quad (60)$$

Alors l'expression de la température sera donnée par :

$$T(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} (E_n r^n + F_n r^{-(n+1)}) P_n(\cos \theta) \quad (61)$$

3.17- Modèle physique considéré

Notre modèle physique est composé d'un seul tube en cuivre, enterré dans le sol, de 2m de longueur, 22 mm de diamètre extérieur et 20 mm de diamètre intérieur.

L'eau chaude est pompée à travers le tube horizontal se situant à 5m en dessous de la surface du sol, à l'intérieur du domaine du stockage, représenté par un cylindre (domaine de stockage) ayant un rayon de 2m et dont l'axe est traversé par le tube transportant l'eau chaude (Figure 10).

Pour le cas présent, nous avons fait les suppositions suivantes :

- Le sol est un milieu homogène continu et isotopique
- Les différentes propriétés du sol peuvent être représentées par des paramètres constants pour des valeurs fixes du taux d'humidité.
- La température du sol est toujours en dessous du point de congélation. Cette supposition est raisonnable dans une région au climat chaud.
- Le tube est enterré à une profondeur telle que la température de la surface du sol n'a pratiquement aucun effet.
- Le sol est non saturé dans la région de stockage.
- Il n'y a pas de résistance thermique entre la surface du tube et le sol.
- La dissipation de la chaleur est symétrique par rapport à l'axe du tube.

Notre modèle physique est représenté par :

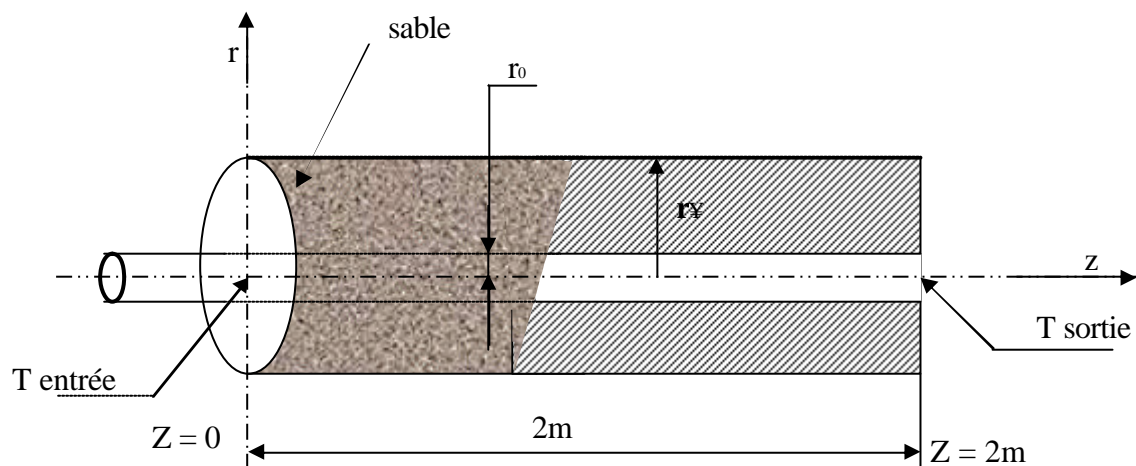


Fig. (11) : le modèle théorique simplifié

Après avoir pris en considération les suppositions relatives au modèle physique, le modèle mathématique décrivant le processus de transfert de chaleur au sein du domaine en question est représenté par l'équation suivante :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (62)$$

Où a est la diffusivité thermique.

Si les conditions aux limites sont spécifiées pour ce cas d'étude, il est possible de trouver une solution de l'équation et ainsi obtenir la distribution de la température dans le sol entourant le tube comme fonction de l'espace et du temps. La solution pour le cas stationnaire présente une particularité du problème quand le gradient

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (63)$$

Cette solution est évidemment la plus simple en comparaison avec le cas transitoire. Toutefois, elle peut servir comme une bonne approximation à long terme. C'est ce cas que l'on va considérer en premier lieu.

3.18- Cas stationnaire

L'équation différentielle aux dérivées partielles qui gouverne le transfert de chaleur du tube vers le sol en régime stationnaire dans un domaine cylindrique bidimensionnel, est la suivante :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (64)$$

Où

T est la température.

r le rayon du tube

z l'axe horizontal de symétrie traversé par le tube.

Les conditions aux limites envisagées sont :

- a) - Si l'on admet que la température sur la surface du tube dépend uniquement de z , $T(r_0, z)$ définit la température du sol à la surface de contact avec le tube ; on peut écrire alors :

$$\text{Si } r = r_0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right]_{r=r_0} = 0, \quad \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_{r=r_0} = 0 \Rightarrow T(r_0, z) = A_1 + B_1 z$$

- b)- Très loin du tube on admet que la température peut être considérée comme constante et égale à la température ambiante du sol, soit :

$$T(r_\infty, z) = T_\infty .$$

- c)- Pour une valeur constante de z , la température est fonction de r seulement. $T(r, z_0)$ et $T(r, z_l)$ sont calculées comme suit

$$z = z_0 = 0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_{z=0} = 0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{z=0} = 0 \Rightarrow T(r, 0) = a \ln r + b \quad (65)$$

On obtient

$$T(r, 0) = a \ln r + b$$

$$T(r, z_0) = a \ln r + b \quad (66)$$

Et

$$z = z_l = l \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right]_{z=l} = 0 \Rightarrow \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right]_{z=l} = 0 \Rightarrow T(r, l) = c \ln r + d$$

On obtient

$$T(r, 0) = c \ln r + d$$

$$T(r, z_l) = c \ln r + d \quad (67)$$

a , b , c et d sont des constantes.

3.19- Méthode de résolution par la séparation des fonctions

Après avoir spécifié les conditions aux limites du problème on peut passer à la résolution de l'équation (62).

Du moment que pour le cas considéré, les conditions aux limites du problème ne sont pas nulles, il convient d'admettre une solution pour l'équation (63) qui est constituée de deux parties, U et V , telles que :

$$T(r, z) = U(r, z) + V(r, z) \quad (68)$$

La fonction $V(r, z)$ est donnée en termes de conditions aux limites à r_0 et r_∞ , une façon qui permet d'introduire différents types de conditions initiales et conditions aux limites, indépendamment de la deuxième solution $U(r, z)$:

3.19.1- Expression de la fonction $V(r, z)$

La fonction $V(r, z)$ est donnée en termes des conditions aux limites à r_0 et r_∞ , décrivant et limitant le domaine physique et indépendamment de la seconde solution $U(r, z)$ on écrit alors :

$$V(r, z) = \mathbf{a}(r)T(r_\infty, z) + [1 - \mathbf{a}(r)]T(r_0, z) \quad (69)$$

Où $0 \leq \mathbf{a}(r) \leq 1$.

Pour notre cas :

$$\mathbf{a}(r) = \frac{r - r_0}{r_\infty - r_0} \quad (70)$$

$$1 - \mathbf{a}(r) = \frac{r_\infty - r}{r_\infty - r_0} \quad (71)$$

Donc l'équation (69) devient:

$$V(r, z) = \frac{r - r_0}{r_\infty - r_0} T(r_\infty, z) + \frac{r_\infty - r}{r_\infty - r_0} T(r_0, z) \quad (72)$$

La forme proposée pour la fonction $V(r, z)$ mène au résultat suivant :

$$V(r_0, z) = T(r_0, z) \quad (73)$$

$$V(r_\infty, z) = T(r_\infty, z) \quad (74)$$

Et

$$U(r_0, z) = U(r_\infty, z) = 0 \quad (75)$$

A ce point on constate qu'on a déjà une partie de la solution par la détermination de la fonction $V(r, z)$ comme fonction des conditions initiales et des conditions aux limites, généralement spécifiées à partir de l'expérience. L'effort doit être concentré sur la détermination de la deuxième partie de la solution qui est la fonction $U(r, z)$.

3.19.2- Expression de la fonction $U(r, z)$

En substituant (68) dans l'équation (63) on obtient :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = - \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (76)$$

Puisque $V(r, z)$ est déjà déterminée, on pose :

$$f(r, z) = - \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) \quad (77)$$

Ainsi

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = f(r, z) \quad (78)$$

où $f(r, z)$ est explicitement connue en termes de conditions aux limites :

$$f(r, z) = \frac{1}{(r_\infty - r_0)} \left(\frac{1}{r} T(r_0, z) - \frac{1}{r} T(r_\infty, z) + r \frac{\partial^2 T(r_0, z)}{\partial z^2} - r_\infty \frac{\partial^2 T(r_0, z)}{\partial z^2} - r \frac{\partial^2 T(r_\infty, z)}{\partial z^2} + r_0 \frac{\partial^2 T(r_\infty, z)}{\partial z^2} \right), \quad (79)$$

Et où $T(r_0, z)$ et $T(r_\infty, z)$ sont ultérieurement définies par les suppositions (a) et (b) paragraphe 3-18.

Partant des précédentes suppositions, la fonction $U(r, z)$ peut être exprimée à z_0 et z_l respectivement, par deux fonctions unidimensionnelles j et y , qui sont fonctions de r uniquement, soit:

$$U(r, z_0) = j(r) = T(r, z_0) - V(r, z_0) \quad (80)$$

$$U(r, z_l) = y(r) = T(r, z_l) - V(r, z_l) \quad (81)$$

A ce stade de calcul, on doit chercher la solution de la forme homogène de l'équation (78) par la méthode standard de séparation de variables qui prendra la forme suivante :

$$U(r, z) = U_0(r)Z(z) \quad (82)$$

Substituant dans la forme homogène de l'équation (78), on trouve:

$$\frac{\partial^2 U_0}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_0}{\partial r} + I^2 U_0 = 0 \quad (83)$$

Puisque le domaine de définition de r ne s'étend pas jusqu'à l'origine (zéro), la fonction de Bessel de seconde espèce n'est pas exclue, et la solution proposée pour $U(r, z)$ prend ainsi la forme suivante:

$$U_0(Ir) = Y_0(Ir_0).J_0(Ir) - J_0(Ir_0).Y_0(Ir) \quad (84)$$

Où J_0 et Y_0 sont les fonctions de Bessel de première et deuxième espèce d'ordre zéro, respectivement [1, 5, 6].

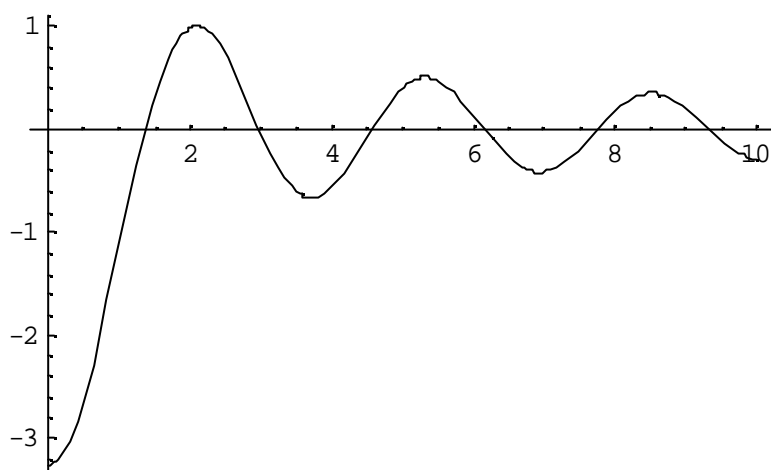
3.19.3- Fonctions de Bessel

Pour trouver les valeurs propres I de la fonction $U_0(Ir)$ dans le domaine $[r_0, r_\infty]$ on a à résoudre l'équation :

$$U_0(\mathbf{I}r_\infty) = Y_0(\mathbf{I}r_0).J_0(\mathbf{I}r_\infty) - J_0(\mathbf{I}r_0).Y_0(\mathbf{I}r_\infty) = 0 \quad (85)$$

Qui est présentée graphiquement par la courbe (18). Il est connu pour ce cas de figure que les racines de cette équation sont toutes réelles et simples, et sont, généralement une séquence infinie de nombres positifs.

$\mathbf{I}_m, m=1,2,3,\dots$ Sont les racines positives de l'équation (85).



Courbe (1): valeurs propres de la fonction $U_0(\mathbf{I}r)$

On définit, à présent, les fonctions :

$$P_1(r) = U_0(\mathbf{I}_1 r),$$

$$P_2(r) = U_0(\mathbf{I}_2 r)$$

$$P_m(r) = U_0(\mathbf{I}_m r)$$

Où

$$P_m(r) = U_0(\mathbf{I}_m r) = Y_0(\mathbf{I}_m r_0).J_0(\mathbf{I}_m r) - J_0(\mathbf{I}_m r_0).Y_0(\mathbf{I}_m r) \quad (86)$$

On peut facilement démontrer que les fonctions $P_m(r)$ forment une base dans le domaine $[r_0, r_\infty]$.

Pour

$$U_m(r_0) = U_m(r_\infty) = 0$$

$$U_n(r_0) = U_n(r_\infty) = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_m}{\partial r} \right) + \mathbf{I}_m^2 U_m(r) = 0 \quad (86-a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U_n}{\partial r} \right) + \mathbf{I}_n^2 U_n(r) = 0 \quad (86-b)$$

En multipliant l'équation (86-a) par $rU_n(r)$, et l'équation (86-b) par $rU_m(r)$, après intégration et soustraction, il vient :

$$\begin{aligned} & \int_{r_0}^{r_\infty} \left[U_n \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_m}{dr} \right) - U_m \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_n}{dr} \right) \right] dr + (\mathbf{I}_m^2 - \mathbf{I}_n^2) \int_{r_0}^{r_\infty} U_n(r) U_m(r) r dr = \\ & (\mathbf{I}_m^2 - \mathbf{I}_n^2) \int_{r_0}^{r_\infty} U_n(r) U_m(r) r dr = 0 \end{aligned} \quad (87)$$

Donc

$$\int_{r_0}^{r_\infty} U_m(r) U_n(r) r dr = 0, \quad m \neq n \quad (88)$$

Etant donné que Les fonctions $P_m(r)$ forment une base orthogonale dans l'intervalle $[r_0, r_\infty]$, la fonction $U(r, z)$ peut être développé en série de la forme :

$$U(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z) P_m(r) \quad (89)$$

On peut aussi développer la fonction $f(r, z)$ en série :

$$f(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} A_m(z) P_m(r) \quad (90)$$

Où

$$A_m(z) = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} r \cdot f(r, z) \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} r (P_m(r))^2 \cdot dr} \quad (91)$$

Pour $U(r, z)$ à z_0 et z_1 , les expressions de $\mathbf{j}(r)$ et $\mathbf{y}(r)$, selon les équations (80) et (81) sont:

$$\mathbf{j}(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \mathbf{j}_m \cdot P_m(r) \quad (92)$$

Où

$$\mathbf{j}_m = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} r \mathbf{j}(r) \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} r (P_m(r))^2 \cdot dr} \quad (93)$$

$$\mathbf{y}(r) = \sum_{m=1}^{\infty} \mathbf{y}_m \cdot P_m(r) \quad (94)$$

Avec

$$\mathbf{y}_m = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} r \mathbf{y}(r) \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} r (P_m(r))^2 \cdot dr} \quad (95)$$

$Z_m(z)$, pour l'équation (89), est donné par l'expression suivante:

$$Z_m(z) = C_m e^{I_m z} + D_m e^{-I_m z} + \frac{1}{I_m} \int_{z_0}^z sh(I_m(z-x)) A_m(x) dx \quad (96)$$

Où

$$C_m = \frac{\tilde{y}_m - j_m e^{-I_m z_0}}{2.sh(I_m z_0)} \quad (97)$$

$$D_m = -\frac{\tilde{y}_m - j_m e^{I_m z_0}}{2.sh(I_m z_0)} \quad (98)$$

et

$$\tilde{y}_m = j_m - \frac{1}{I_m} \int_{z_0}^z sh(I_m(z_0-x)) A_m(x) dx \quad (99)$$

La solution

$$T(r, z) = U(r, z) + V(r, z) \quad (100)$$

Est ensuite obtenue à partir des équations (72) et (89) qui permettent d'écrire :

$$T(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z) \cdot P_m(r) + \left[\frac{r-r_0}{r_{\infty}-r_0} T(r_{\infty}, z) + \frac{r_{\infty}-r}{r_{\infty}-r_0} T(r_0, z) \right] \quad (101)$$

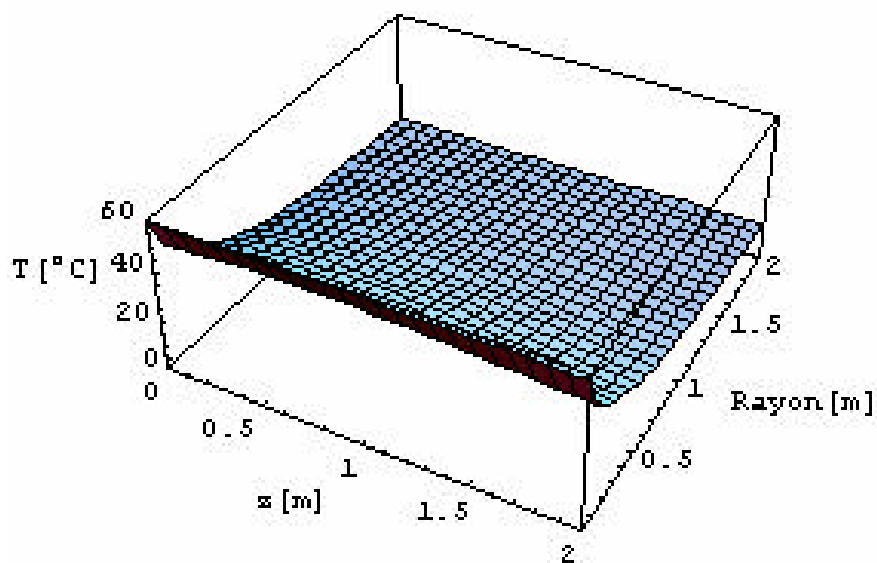
3.19.4- Résultats et discussions

Par l'utilisation du logiciel Mathematica [90] qui permet de faire facilement les calculs mathématiques les plus complexes et cela pour les l'application de la méthode et le calcul des différentes valeurs de la température pour les deux cas de figure considérés, à savoir, d'une part, l'éventualité d'un rayon du tube constant, ce qui donne l'allure des courbes décrivant l'évolution de la température dans un plan parallèle au tube et, d'autre part, le cas où l'abscisse « z » est constante, ce qui donne l'allure des courbes décrivant l'évolution

de la température dans un plan vertical au tube. Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

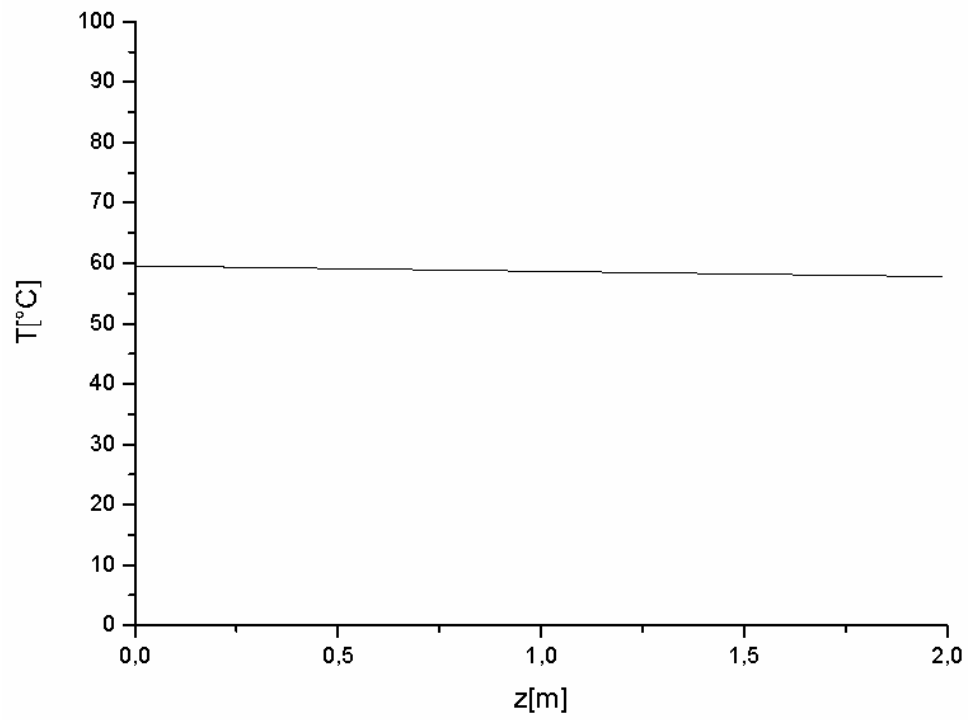
3.19.4.1 - Variation de la température le long et autour du tube .

Les courbes obtenues par la résolution de l'équation (101) décrivant la variation de la température autour du tube en fonction de r et z , sont est représentées en premier lieu en 3D, et ensuite en 2D (les cas ou le rayon r est fixe et les cas ou la longueur z est fixe)

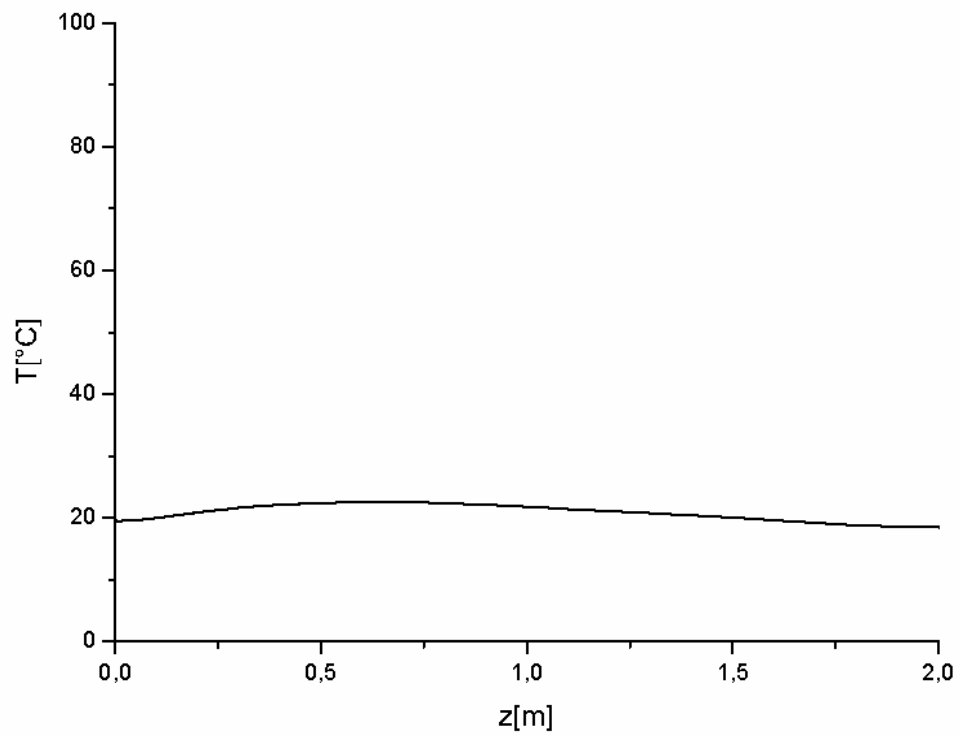


Courbe (2) : champ de température

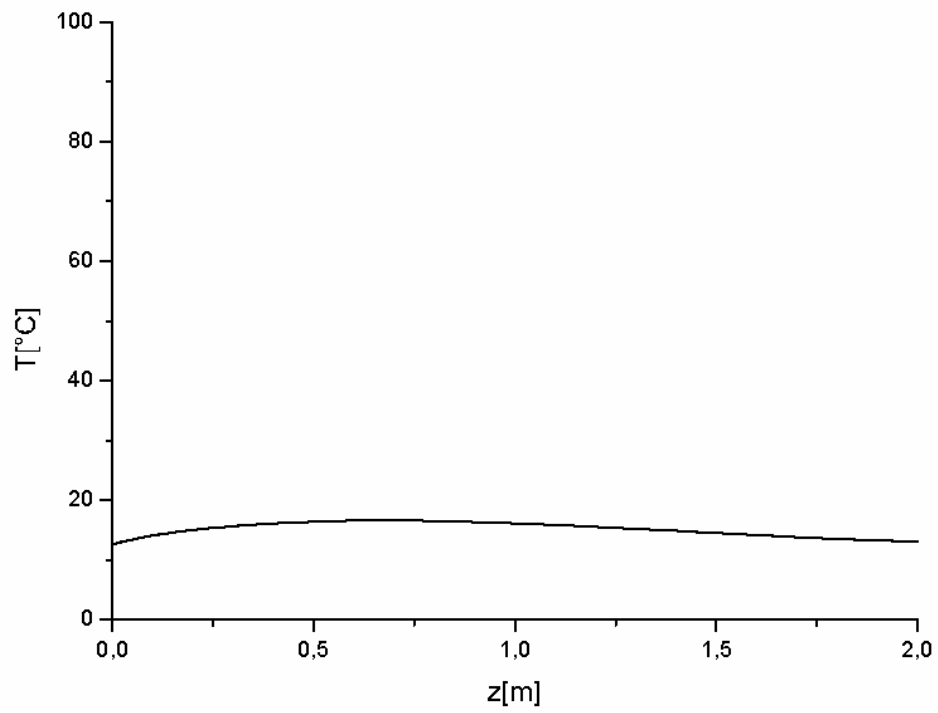
a- Evolution de la température dans le cas ou le rayon est fixe $r = r_0 = 0.012m$
 $r = 0.5m$ $r = 1.0m$ $r = 1.5m$ $r = r_\infty = 2.0m$



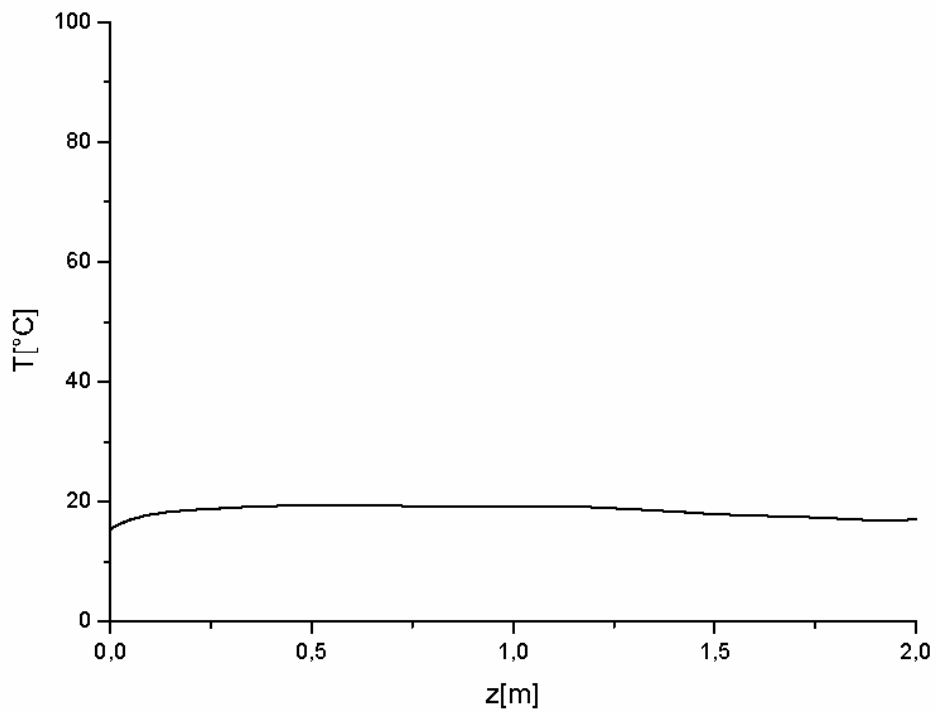
Courbe. (2.a) : Variation de la température à $r = r_0 = 0.012m$



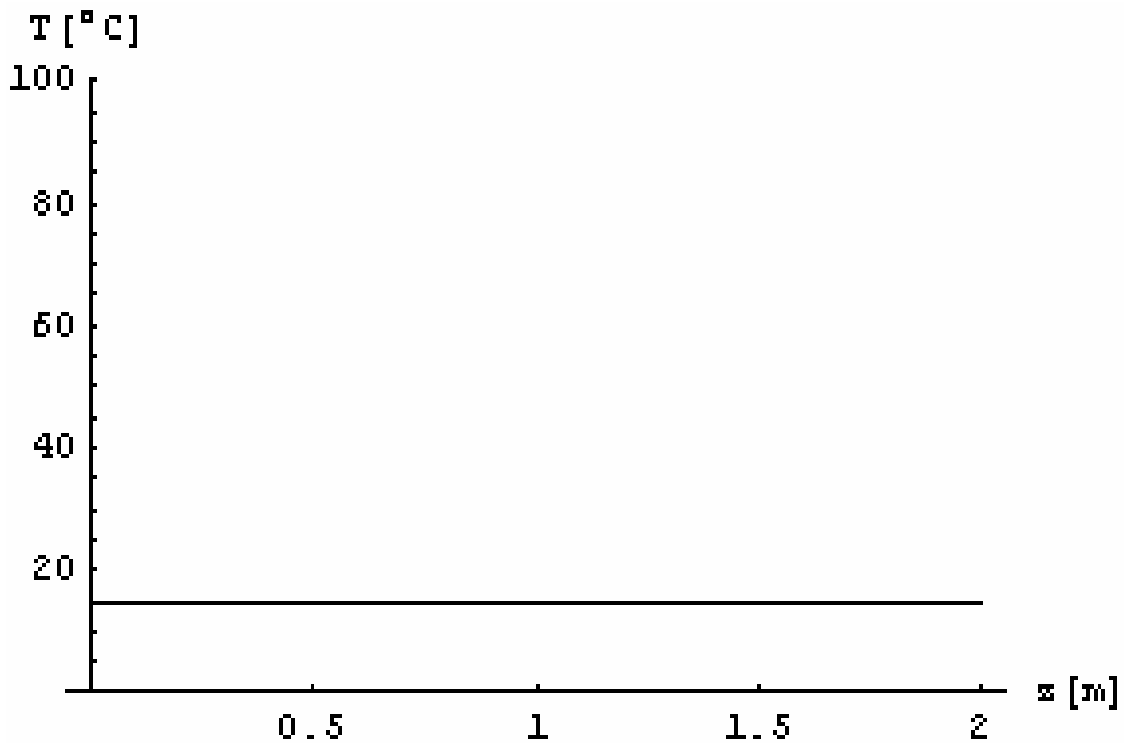
Courbe. (2.b) : Variation de la température à $r = 0.5m$



Courbe. (2.c) : Variation de la température à $r = 1.0m$

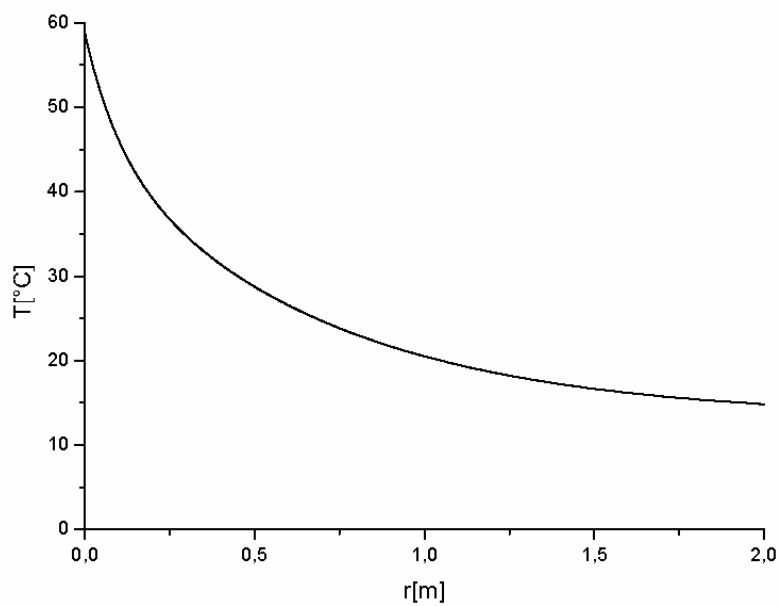


Courbe. (2.d) : Variation de la température à $r = 1.5m$

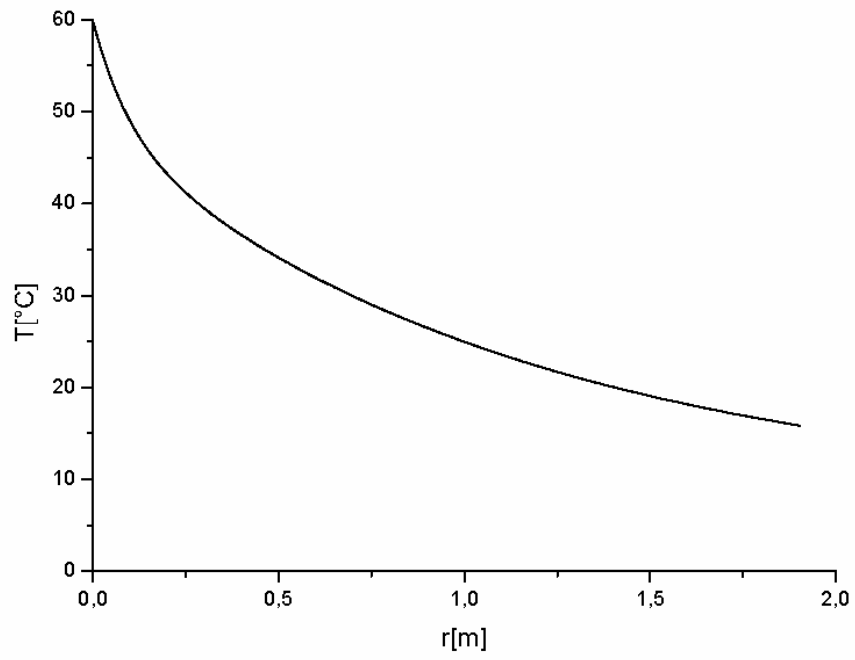


Courbe. (2.e) : Variation de la température à $r = r_{\infty} = 2.0m$

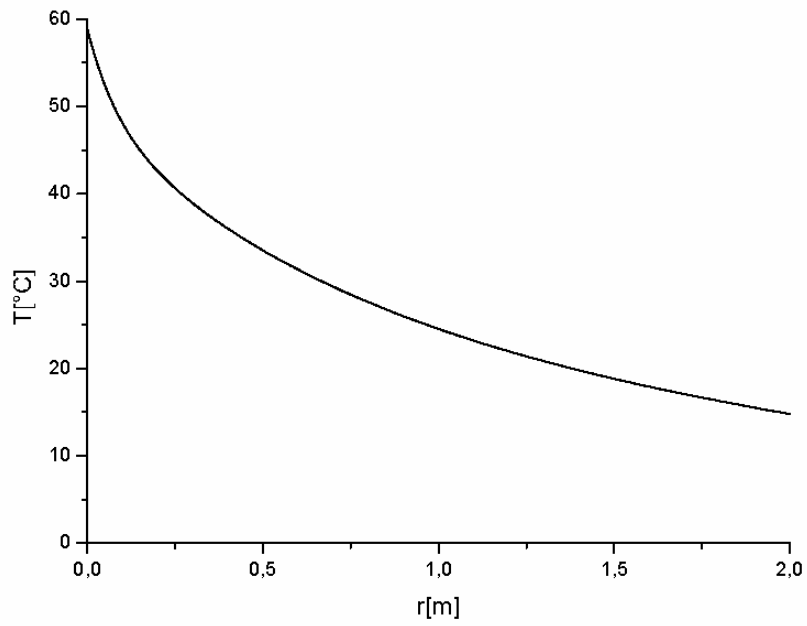
b- La variation de la température sur les plans verticaux à la surface du cylindre à l'entrée du tube $z = z_0 = 0m$ au milieu du tube $z = 0.5m$ $z = 1m$ $z = 1.5m$ et à la sortie du tube $z = z_l = 2.0m$.



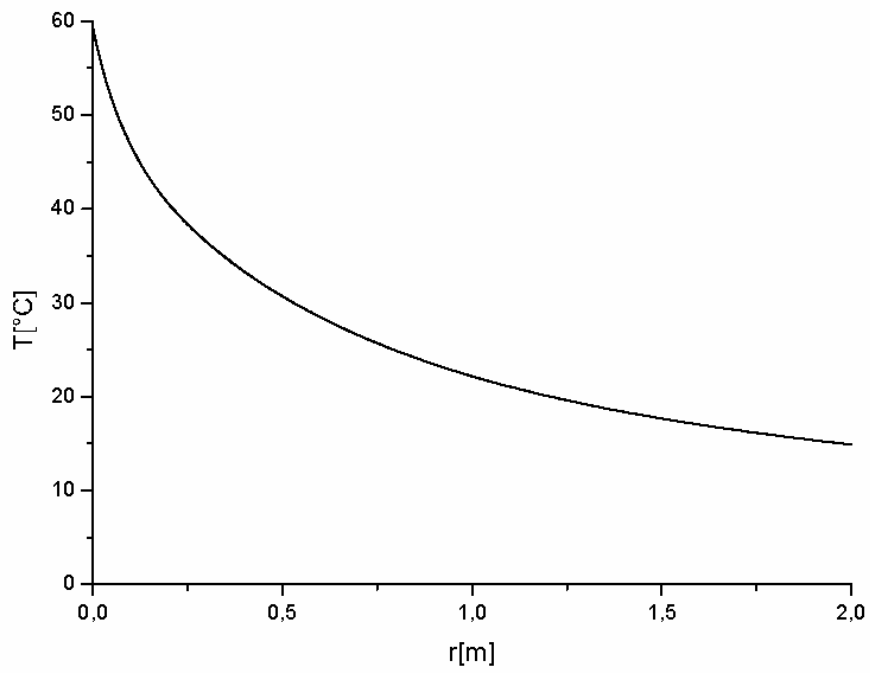
Courbe. (3.a) : Variation de la température à $z = z_0 = 0m$



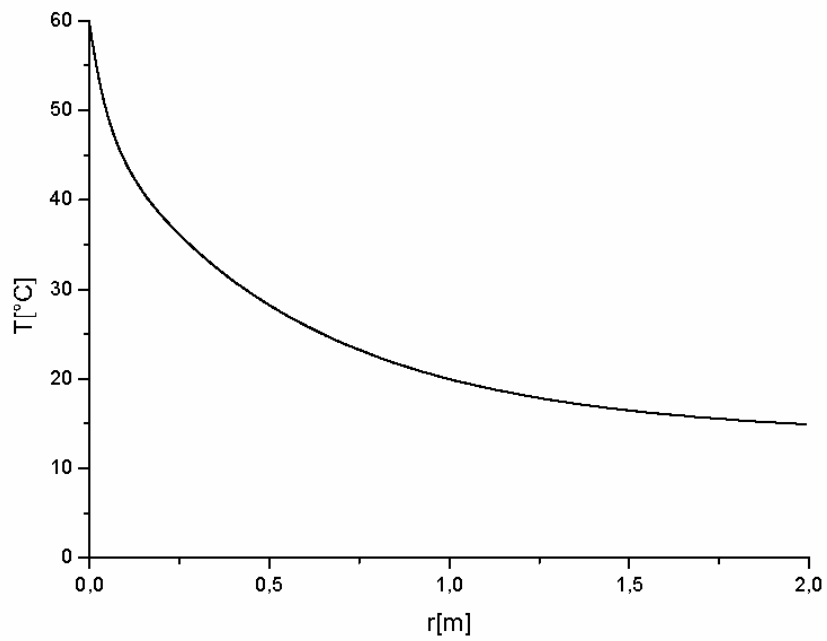
Courbe. (3.b) : Variation de la température à $z = 0.5m$



Courbe. (3.c) : Variation de la température à $z = 1m$



Courbe. (3.d) : Variation de la température à $z = 1.5m$



Courbe. (3.e) : Variation de la température à $z = z_l = 2.0m$

3.19.4.1 -Commentaires

L'analyse des courbes (2-a ... 2-e) permet de remarquer que la température l'interface de contact sol/tube ($r = r_0 = 0.012m$) est presque uniforme est égale à la température du fluide caloporteur à l'entrée du tube qui est égale à $60\text{ }^\circ\text{C}$ cela peut s'expliquer par le fait qu'il y'a absence de transfert thermique quand le processus devient stationnaire, sur les plans horizontaux passant par ($r = 0.5m$ $r = 1.0m$ $r = 1.5m$) nous constatons que la température est légèrement plus élevée dans l'intervalle $z=0.5m$ est $z=1.0 m$ est elle devient constante après, cela s'explique par le fait qu'il y'a des déperditions thermique latérales de coté et d'autre du domaine de stockage, par contre loin de tube à ($r = r_\infty = 2.0m$) la température est logiquement égale la température du sol est égale à $15\text{ }^\circ\text{C}$.

Si on regarde les courbes (3-a...3-e), on remarque que la température à ($r = r_0 = 0.012m$) égale à $60\text{ }^\circ\text{C}$ quelque soit la valeur de z et elle diminue rapidement avec l'augmentation de r cela s'explique par la faible inertie thermique du sol qui à une diffusivité très pour atteindre $15\text{ }^\circ\text{C}$ à $r = r_\infty = 2.0m$.

3.20- Cas non stationnaire

La détermination exacte de la distribution de la température dans un milieu solide (sol) autour d'un tube transportant un fluide caloporteur, implique la résolution en 2D de l'équation de la conduction de la chaleur en coordonnées cylindriques pour une configuration creuse (cylindre creux $r_0 < r < r_\infty$) au cours du temps avec des conditions aux limites spécifiées, ou déterminées à partir des températures réelles mesurées directement sur le site.

Soit l'équation de la chaleur (62) donnée par:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Avec

r est le rayon du cylindre

a est la diffusivité thermique du milieu

3.21- Conditions aux limites

Les conditions aux limites envisagées dans notre cas sont les suivantes:

- a- à $t=0$, la température initiale est supposée constante sur le domaine et égale à la température moyenne du sol T_∞

$$\text{Ainsi } T(r, z, 0) = T_\infty$$

- b- Si on admet que la température à la surface du tube dépend uniquement de z , $T(r_0, z, t)$ définit ainsi la température du sol à la surface de contact avec le tube.

- c- Très loin du tube, la température du sol est supposée constante et égale à la température ambiante du sol ; ainsi on peut écrire que: $T(r_\infty, z, t) = T_\infty$

- d- Pour une valeur constante de z , la température est fonction de r seulement, donc on peut poser: $\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = 0$

Les températures $T(r, z_0, t)$ et $T(r, z_l, t)$ sont calculées à partir de l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

Menant à :

$$T(r, z_0, t) = a \cdot \ln r + b$$

et

$$T(r, z_l, t) = c \cdot \ln r + d$$

b , c et d étant constantes.

- e- à $t=0$; $T = T(r, z, 0) = T_0$ (102)

3.22- Formulation de la solution analytique

Après avoir spécifié les conditions aux limites du problème, on procède à la formulation de la solution analytique de l'équation (62).

Du moment que ces conditions aux limites ne sont pas nulles, alors, pour notre cas, il convient de supposer que la solution de l'équation de la conduction thermique (1) est composée de deux parties U et V , ainsi nous avons ;

$$T(r, z, t) = U(r, z, t) + V(r, z, t) \quad (103)$$

3.22.1- Détermination de la fonction $V(r, z, t)$

La fonction $V(r, z, t)$ est donnée en termes des conditions aux limites à r_0 et r_∞ , décrivant et limitant le domaine physique et indépendamment de la seconde solution $U(r, z, t)$:

$$V(r, z, t) = a(r).T(r_\infty, z, t) + (1 - a(r)).T(r_0, z, t) \quad (104)$$

Où

$$0 \leq a(r) \leq 1$$

Dans notre cas

$$a(r) = \frac{r - r_0}{r_\infty - r_0}$$

$$1 - a(r) = \frac{r_\infty - r}{r_\infty - r_0}$$

et

$$V(r, z, t) = \frac{r - r_0}{r_\infty - r_0}.T(r_\infty, z, t) + \frac{r_\infty - r}{r_\infty - r_0}.T(r_0, z, t) \quad (105)$$

La forme proposée pour $V(r, z)$ mène aux résultats suivants :

$$V(r_0, z, t) = T(r_0, z, t),$$

$$V(r_\infty, z, t) = T(r_\infty, z, t),$$

et

$$U(r_0, z, \mathbf{t}) = U(r_\infty, z, \mathbf{t}) = 0 .$$

A ce stade, une partie de la solution est déjà établie par la détermination de la fonction $V(r, z, t)$ qui est une fonction des conditions initiales et aux limites données généralement par l'expérience.

On développe ensuite la deuxième solution $U(r, z, t)$ comme suit :

3.22.2- Détermination de la fonction $U(r, z, t)$

En substituant (107) dans l'équation (62) on obtient l'équation suivante:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = - \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (106)$$

On pose

$$- \left(\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \right) = f(r, z, \mathbf{t}) \quad (107)$$

et on peut écrire

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} = f(r, z, \mathbf{t}) \quad (108)$$

A partir des équations (104) et (108), on obtient :

$$f(r, z, \mathbf{t}) = \frac{1}{(r_\infty - r_0)} \left(\frac{1}{r} T(r_0, z, \mathbf{t}) - \frac{1}{r} T(r_\infty, z, \mathbf{t}) + r \cdot \frac{\partial^2 T(r_0, z, \mathbf{t})}{\partial z^2} - r_\infty \cdot \frac{\partial^2 T(r_0, z, \mathbf{t})}{\partial z^2} \right. \\ \left. - r \cdot \frac{\partial^2 T(r_\infty, z, \mathbf{t})}{\partial z^2} + r_0 \cdot \frac{\partial^2 T(r_\infty, z, \mathbf{t})}{\partial z^2} \right) \quad (109)$$

Où $T(r_0, z, \mathbf{t})$ et $T(r_\infty, z, \mathbf{t})$ sont déjà définies.

A ce nouveau stade, la solution recherchée est la solution homogène de l'équation (108). On peut alors utiliser la méthode standard de séparation de variables qui prendra la forme suivante :

$$U(r, z, \mathbf{t}) = U_0(r)Z(z, \mathbf{t}) \quad (110)$$

Comme pour la solution du cas précédent, la fonction $U(r, z, \mathbf{t})$ sera développée en série et sera de la forme suivante :

$$U(r, z, \mathbf{t}) = \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z, \mathbf{t}) \cdot P_m(r) \quad (111)$$

Pour des valeurs constantes de z et \mathbf{t} qui seront notées par z_f et \mathbf{t}_f on obtient l'expression suivante :

$$Z_m(z_f, \mathbf{t}_f) = Y_m(z_f, \mathbf{t}_f) + X_m(z_f, \mathbf{t}_f) \quad (112)$$

Il faut, ensuite déterminer les fonctions $Y_m(z_f, \mathbf{t}_f)$ et $X_m(z_f, \mathbf{t}_f)$, soit :

$$Y_m(z_f, \mathbf{t}_f) = \sum_{n=1}^{\infty} y_{m,n}(\mathbf{t}_f) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \mathbf{p} \cdot z_f}{z_l}\right) \quad (113)$$

Où la fonction $y_{m,n}(\mathbf{t}_f)$ sera donnée par

$$y_{m,n}(\mathbf{t}_f) = \left(e^{-a \cdot h \cdot z_f} \right) \cdot \left(-a \cdot \int_{z_0}^{z_f} \mathbf{a}_{m,n}(\mathbf{t}) \cdot e^{a \cdot h \cdot z_f} d\mathbf{t} + \mathbf{b}_{m,n} \right) \quad (114)$$

Avec le paramètre h qui est donné par l'expression suivante:

$$h = \mathbf{l}_m^2 + \frac{n^2 \cdot \mathbf{p}^2}{z_l^2}$$

L'expression de $\mathbf{a}_{m,n}(\mathbf{t})$ sera donnée par :

$$\mathbf{a}_{m,n}(\mathbf{t}) = \frac{2}{z_l} \cdot \int_{z_0}^{z_l} A_m(z, \mathbf{t}) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \mathbf{p} \cdot z}{z_l}\right) dz \quad (115)$$

et l'expression de $\mathbf{b}_{m,n}$ aura la forme suivante :

$$\mathbf{b}_{m,n} = \frac{2}{z_l} \cdot \int_{z_0}^{z_l} \mathbf{w}_m(z) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \mathbf{p} \cdot z}{z_l}\right) dz \quad (116)$$

On remarque que dans l'expression de $\mathbf{b}_{m,n}$ il y'a un nouveau coefficient qui apparaît, noté $\mathbf{w}_m(z)$, qui est donné par la formule suivante:

$$\mathbf{w}_m(z) = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} [T(r, z, 0) - V(r, z, 0)] \cdot r \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} [P_m(r)]^2 \cdot r \cdot dr} - X_m(z, 0) \quad (117)$$

Pour l'équation (114) il reste à établir l'expression de la fonction $A_m(z, \mathbf{t})$ qui aura la forme suivante:

$$A_m(z, \mathbf{t}) = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} f(r, z, \mathbf{t}) \cdot r \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} [P_m(r)]^2 \cdot r \cdot dr} + \left[\mathbf{l}_m^2 \cdot X_m(z, \mathbf{t}) + \frac{1}{a} \frac{\partial X_m(z, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{t}} \right] \quad (118)$$

L'expression de $X_m(z, \mathbf{t})$ est donnée par la formule suivante :

$$X_m(z, \mathbf{t}) = \mathbf{y}_m(\mathbf{t}) \cdot \frac{z}{z_l} + \mathbf{f}_m(\mathbf{t}) \cdot \frac{z_l - z}{z_l} \quad (119)$$

Il faut alors établir les expressions de $\mathbf{f}_m(\mathbf{t}_f)$ et $\mathbf{y}_m(\mathbf{t}_f)$ qui seront données par:

$$\mathbf{f}_m(\mathbf{t}) = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} [T(r, z_0, \mathbf{t}) - V(r, z_0, \mathbf{t})] \cdot r \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} [P_m(r)]^2 \cdot r \cdot dr} \quad (120)$$

et

$$\mathbf{y}_m(\mathbf{t}) = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} [T(r, z_l, \mathbf{t}) - V(r, z_l, \mathbf{t})] \cdot r \cdot P_m(r) \cdot dr}{\int_{r_0}^{r_\infty} [P_m(r)]^2 \cdot r \cdot dr} \quad (121)$$

L'expression de la fonction $X_m(z_f, \mathbf{t}_f)$ de l'équation (119) est, ensuite, calculée à partir des fonctions $\mathbf{y}_m(\mathbf{t}_f)$ et $\mathbf{f}_m(\mathbf{t}_f)$, soit :

$$X_m(z_f, \mathbf{t}_f) = \mathbf{y}_m(\mathbf{t}_f) \cdot \frac{z_f}{z_l} + \mathbf{f}_m(\mathbf{t}_f) \cdot \frac{z_l - z_f}{z_l} \quad (122)$$

A partir des équations de V et U suivantes :

$$U(r, z, \mathbf{t}) = \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z, \mathbf{t}) \cdot P_m(r)$$

$$V(r, z, \mathbf{t}) = \frac{r - r_0}{r_\infty - r_0} \cdot T(r_\infty, z, \mathbf{t}) + \frac{r_\infty - r}{r_\infty - r_0} \cdot T(r_0, z, \mathbf{t})$$

L'expression de la température sera donnée par :

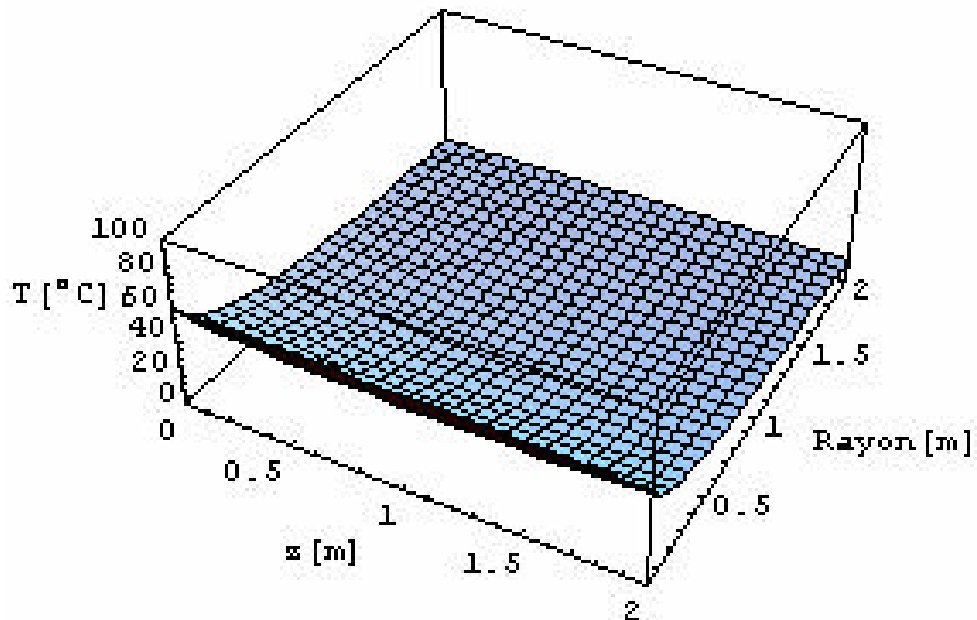
$$T(r, z, \mathbf{t}) = U(r, z, \mathbf{t}) + V(r, z, \mathbf{t})$$

$$T(r, z, \mathbf{t}) = \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z, \mathbf{t}) \cdot P_m(r) + \left[\frac{r - r_0}{r_\infty - r_0} \cdot T(r_\infty, z, \mathbf{t}) + \frac{r_\infty - r}{r_\infty - r_0} \cdot T(r_0, z, \mathbf{t}) \right] \quad (123)$$

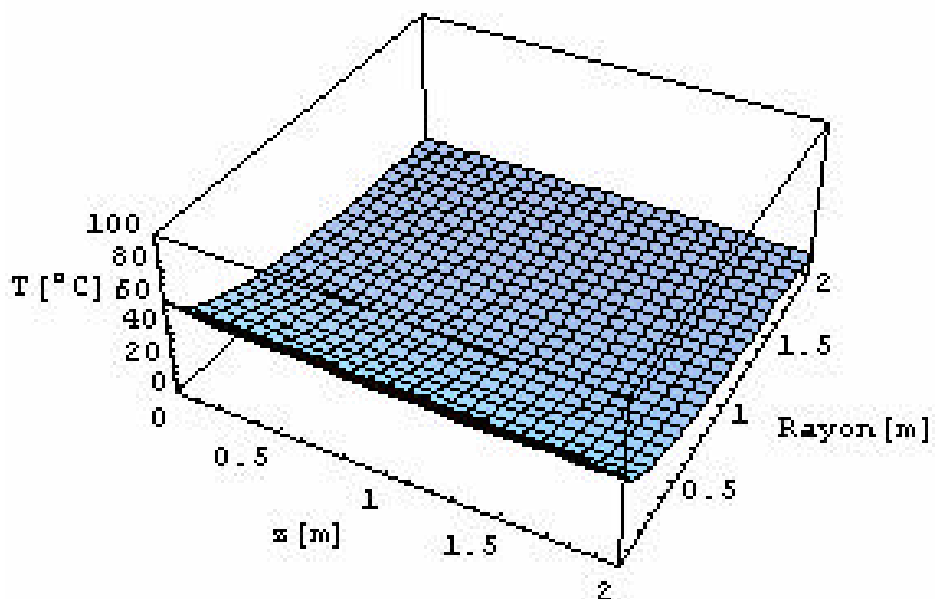
3.22.3-Evolution de la température en 3D et en 2D au cours du temps

Les solutions $T(r, z, \mathbf{t})$ et leurs évolutions axiales et radiales en 3D sont représentées par les courbes suivantes obtenues par l'utilisation du logiciel Mathematica [90] pour résoudre l'équation [123]:

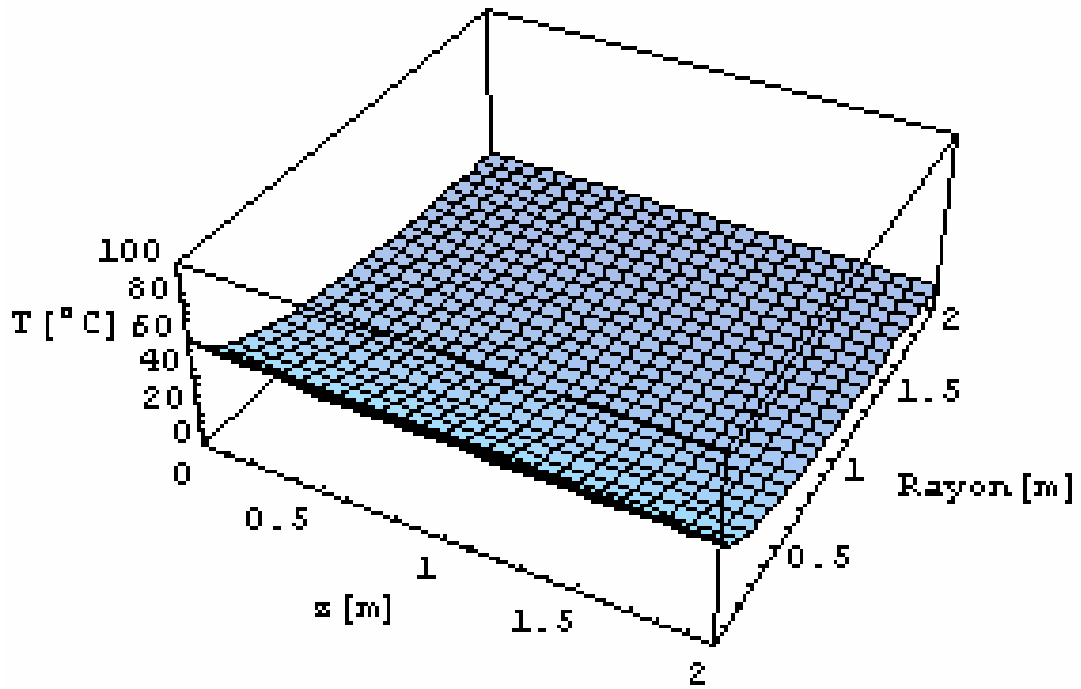
- a- Champ de température en « 3D » en fonction de r et z après la circulation du fluide caloporteur à l'intérieur du tube enterré dans le sol durant 15, 30, 60 et 120 minutes.



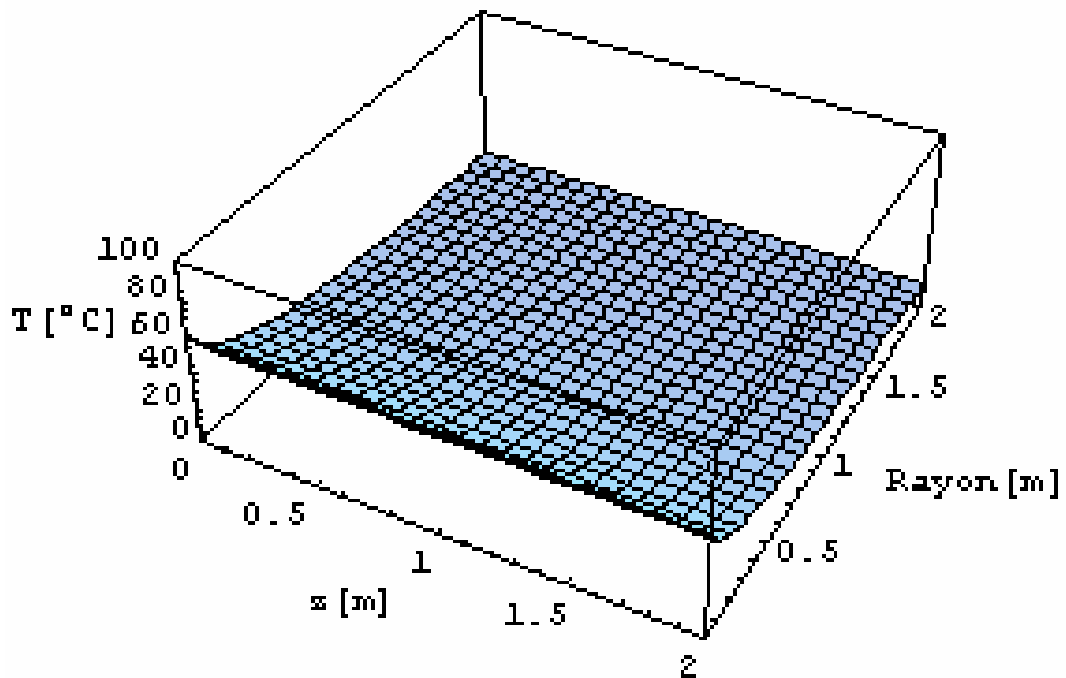
Courbe (4): le champ de température à $t = 0.25h$



Courbe (5): le champ de température à $t = 0.50h$

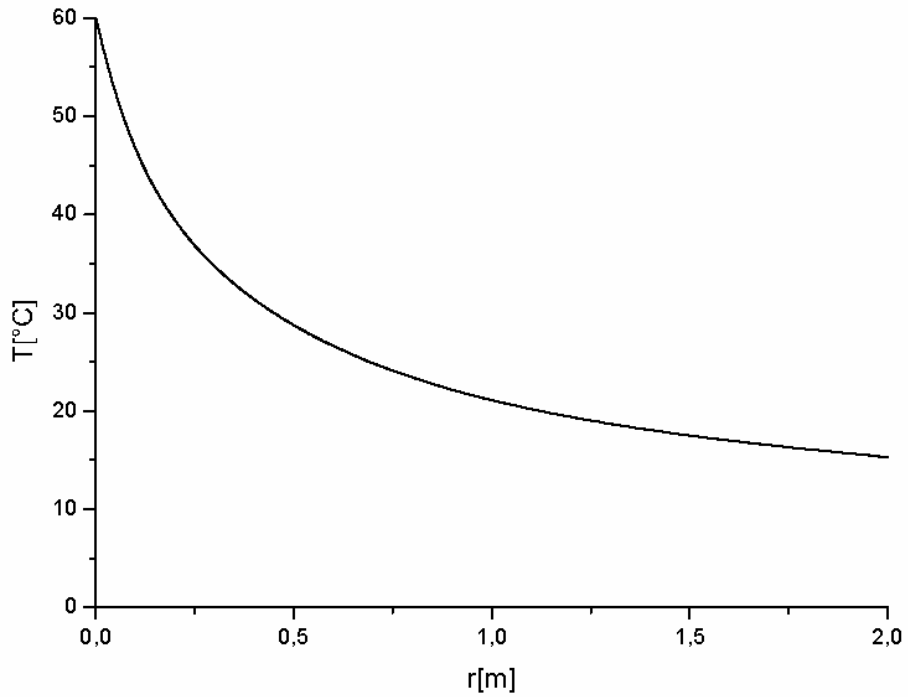


Courbe (5): le champ de température à $t = 1.00h$

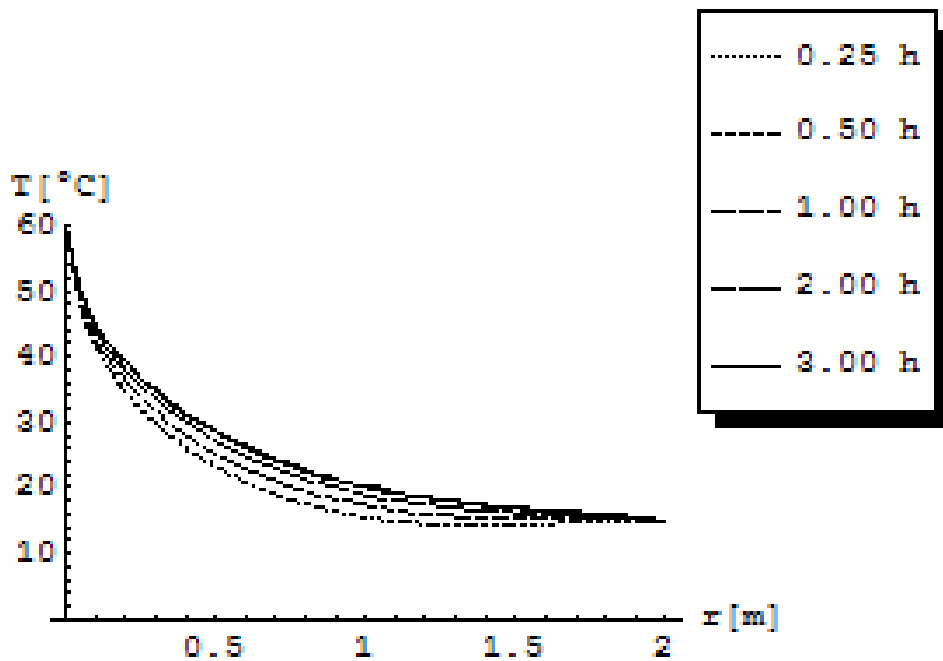


Courbe (6): le champ de température à $t = 2.00h$

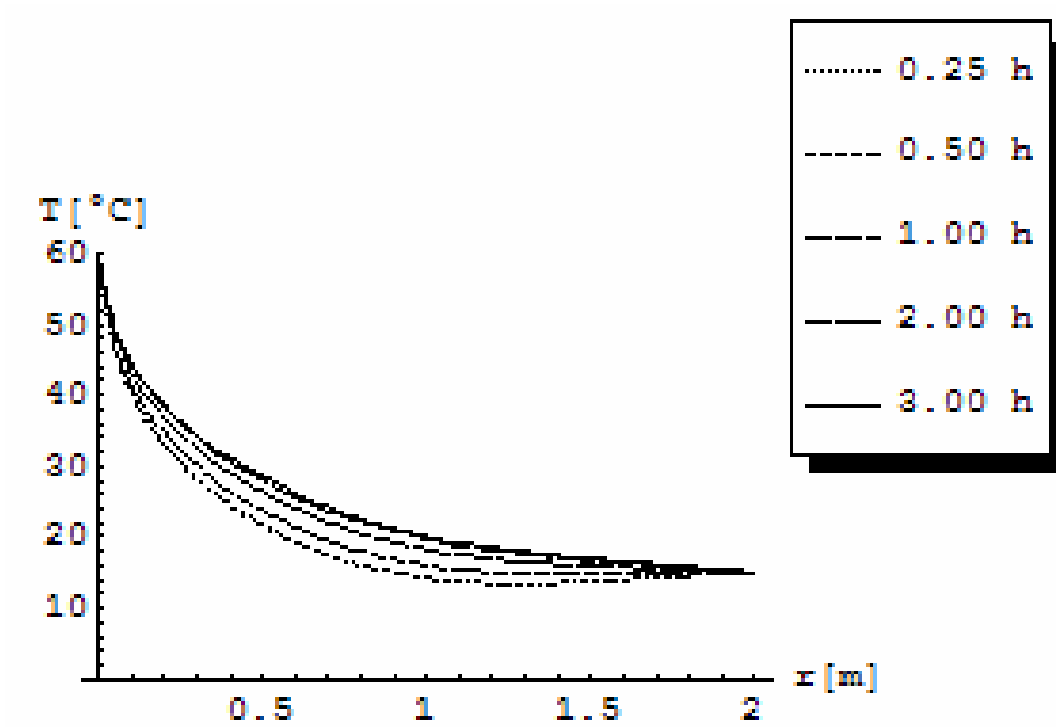
b- L'évolution de la température autour du tube pour des valeurs fixe de z ($z = 0.0m, z = 0.5m, z = 1.0m, z = 1.5m, z = 2.0m$) est pour des périodes bien déterminées (0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 heures) est représentée par les différentes courbes suivantes :



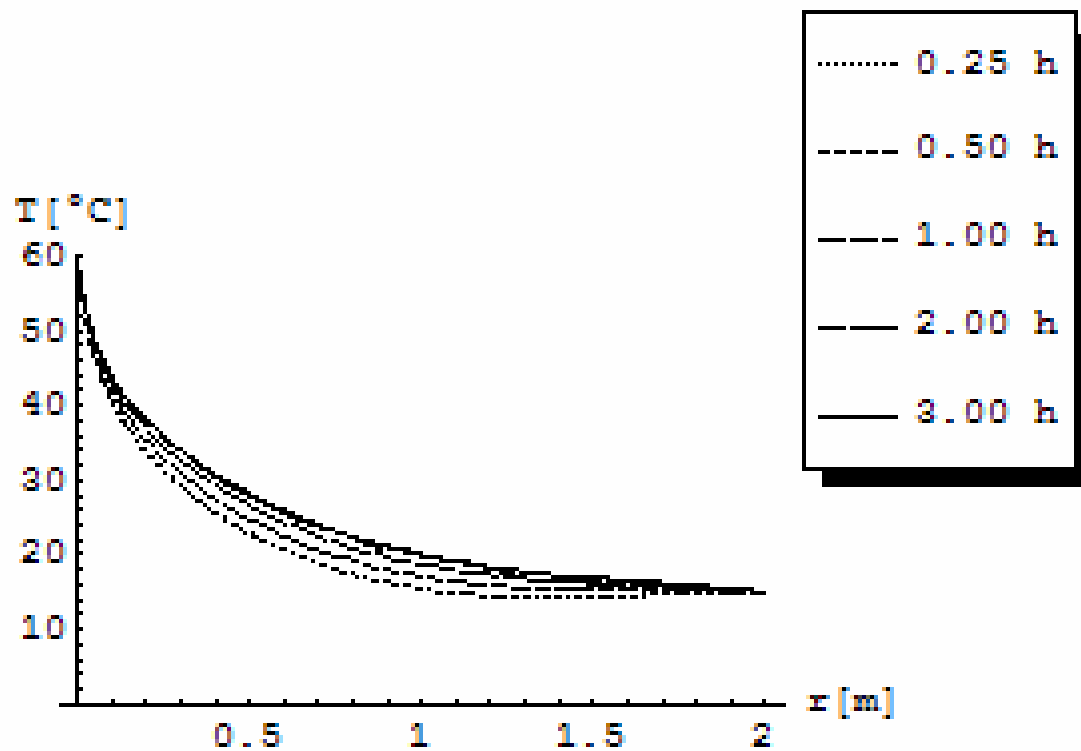
Courbe (7): variation de la température avec le temps à $z = 0.0m$



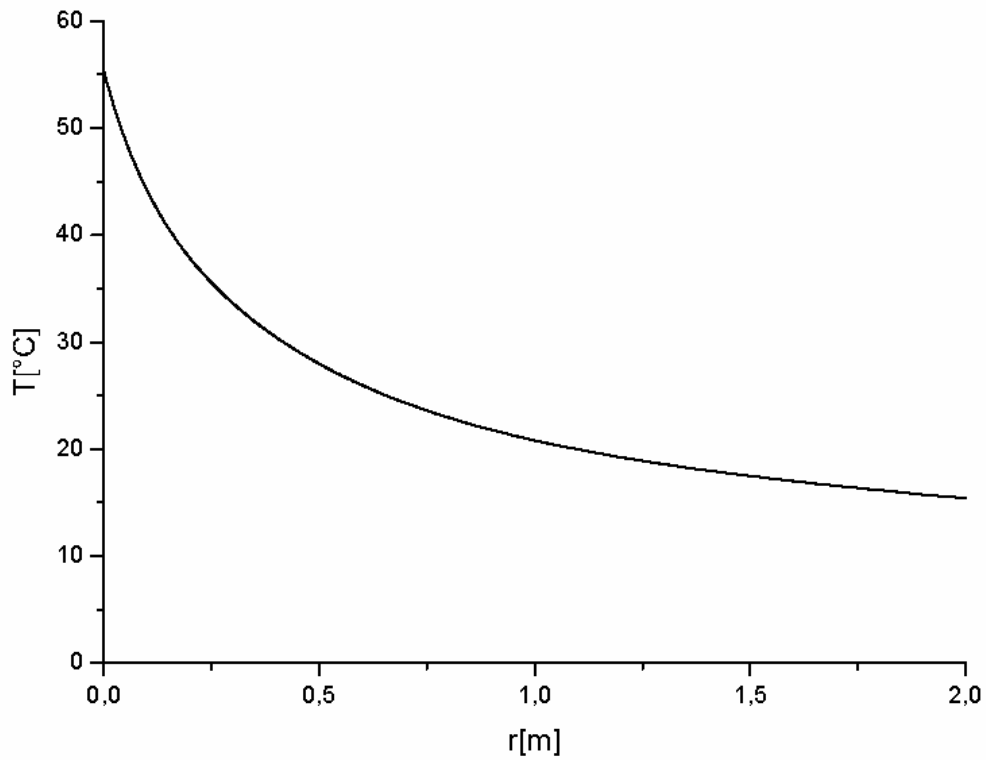
Courbe (8): variation de la température avec le temps à $z = 0.5m$



Courbe (9): variation de la température avec le temps à $z = 1.0\text{m}$

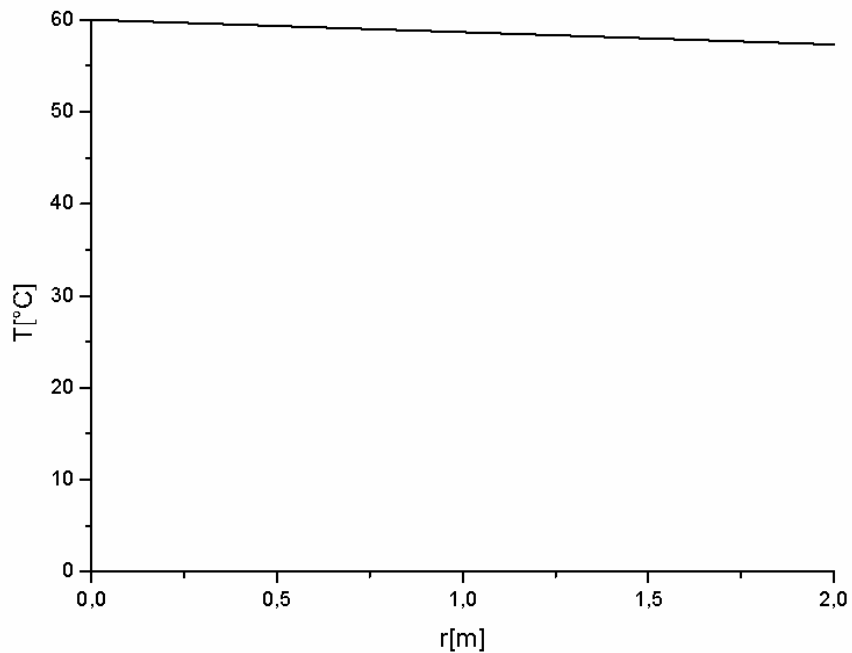


Courbe (10): variation de la température avec le temps à $z = 1.5\text{m}$

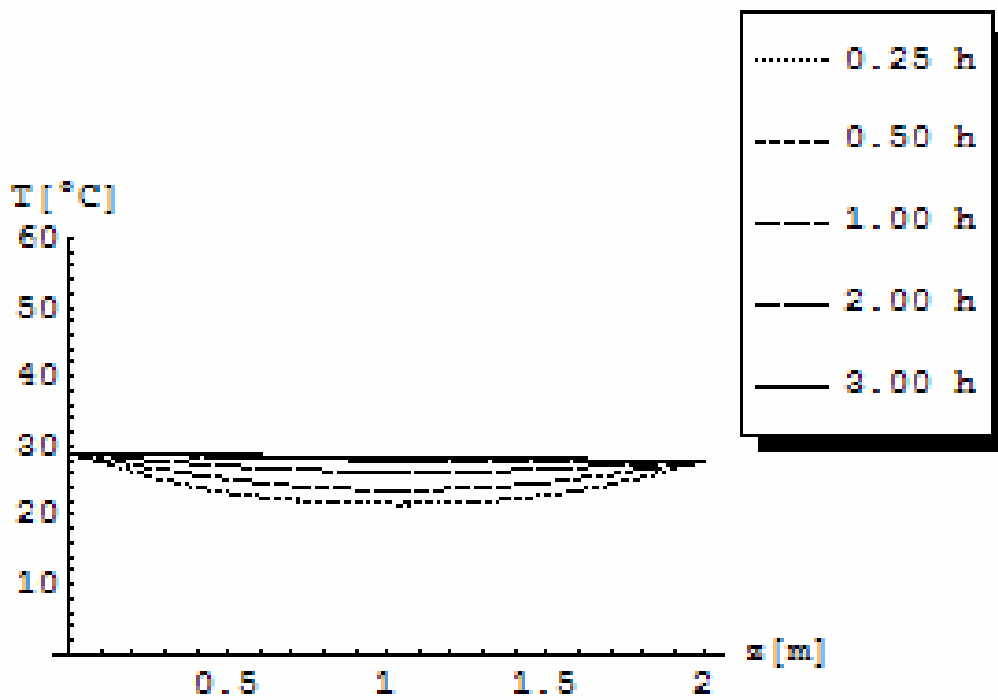


Courbe (11): variation de la température avec le temps à $z = 2.0m$

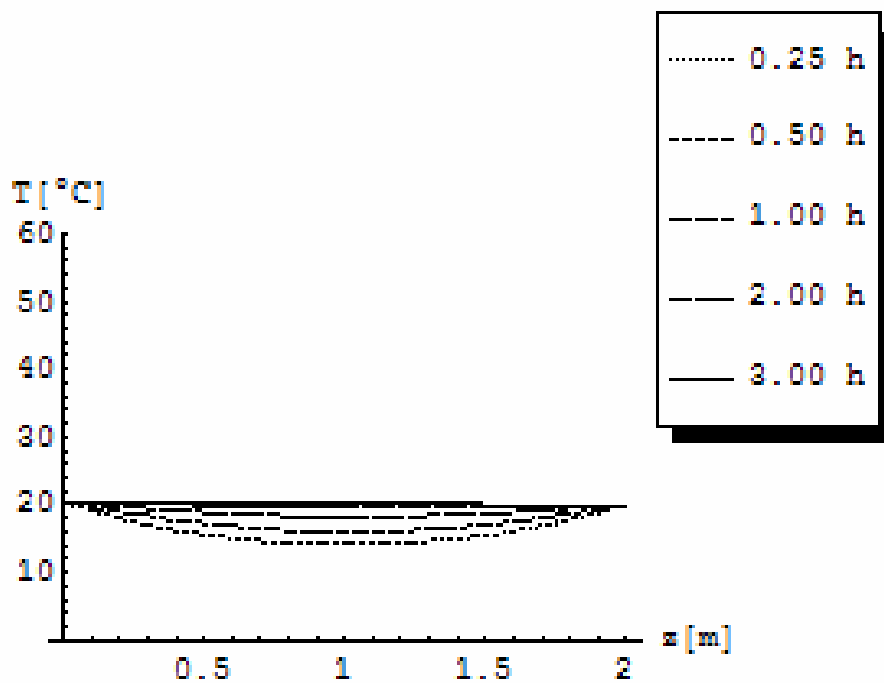
c- L'évolution de la température autour du tube pour des valeurs fixe de r ($r = r_0 = 0.012m, r = 0.5m, r = 1.0m, r = 1.5m, r = 2.0m$) est pour des périodes bien déterminées (0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 heures) est représentée par les différentes courbes suivantes : $T_i = 60^\circ C$



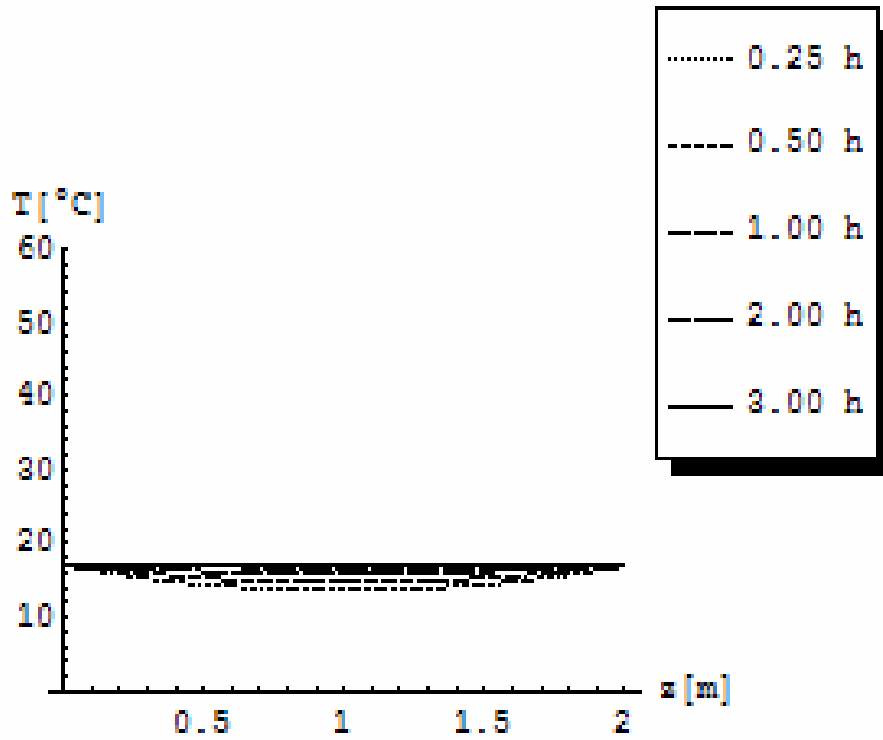
Courbe (12): variation de la température avec le temps à $r = r_0 = 0.012m$



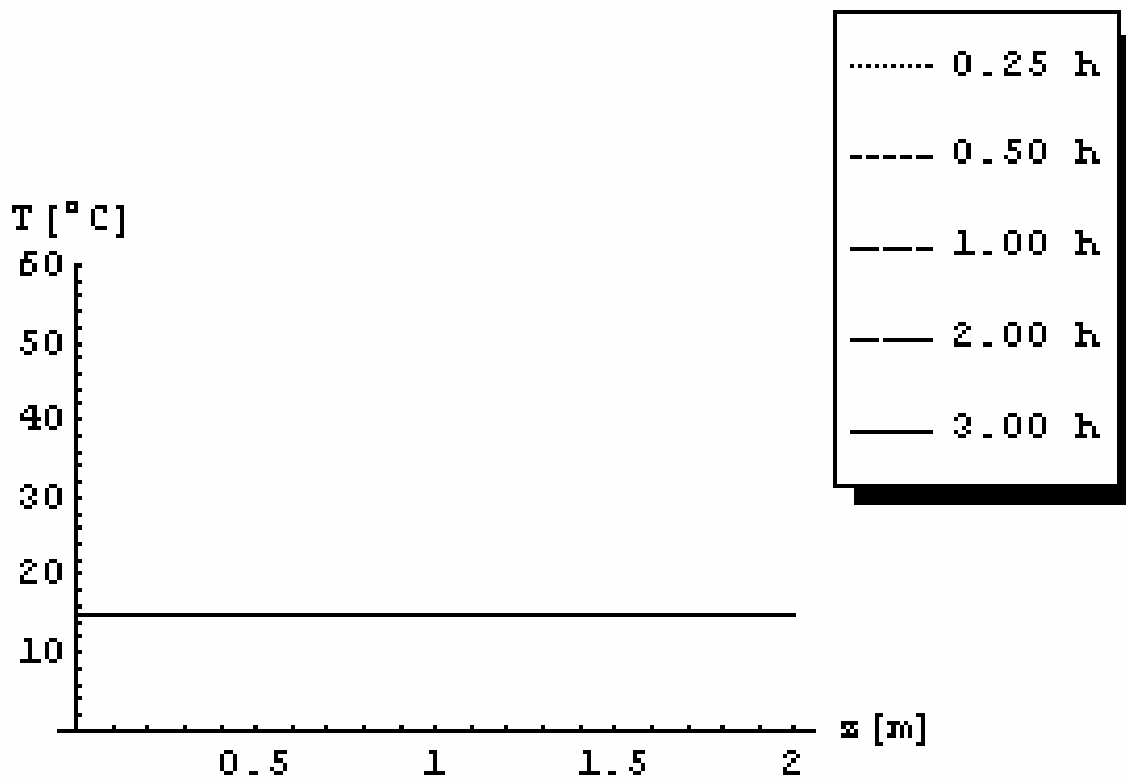
Courbe (13): variation de la température avec le temps à $r = 0.5m$



Courbe (14): variation de la température avec le temps à $r = 1.0m$



Courbe (15): variation de la température avec le temps à $r = 1.5m$



Courbe (16): variation de la température avec le temps à $r = 2.0m$

3-22-4. Commentaires

L'ensemble des courbes (8...11) nous renseignent sur l'évolution de la température autour de tube enterré dans le sol et les courbes (9...16) nous informent sur l'évolution de la température le long de tube nous constatons que l'allure des courbes est la même que pour le cas stationnaire car les courbes 2-e et 16 sont identiques et les courbe 3-e et 11 sont les mémés qui veut dire que l'utilisation de la méthode pour le cas non pendant un bon moment nous donnera les mémés résultats que pour le cas stationnaire.

3.23 Analyse et discussions

La solution de l'équation de la chaleur (62) est établie pour le domaine de stockage choisi, avec une configuration cylindrique, et la supposition que ce domaine est un milieu homogène, continu et isotrope. Il est caractérisé particulièrement par le fait qu'il possède des propriétés thermique constantes dans les deux directions r et z avec un écoulement de chaleur purement radial. Dans un premier temps la solution est obtenue pour le cas où le domaine de stockage de chaleur est alimenté par une source de chaleur linéaire que représente le tube horizontal enterré dans le sol Fig. (1). Le champ de température est déterminé au sein de ce domaine. Les conditions aux limites au contact du tube avec le sol sont décrites par une fonction linéaire $T(r_0, z)$, et les température de l'eau à l'entrée et à la sortie du tube sont, respectivement, $T_i=60$ °C et $T_o=54$ °C.

Les différentes courbes représentent la solution analytique spéciale d'une équation bidimensionnelle de conduction de la chaleur en coordonnées cylindriques pour les cas stationnaire et non stationnaire, avec la nouvelle idée de présenter la solution comme la somme de deux fonctions. Nous constatons que les résultats obtenus par l'application de cette méthode pour le cas non stationnaire tendent au cours du temps vers les résultats obtenus par son application pour le cas stationnaire.

Il faut remarquer que la méthode analytique utilisée jusqu'à présent pour résoudre l'équation de la chaleur bidimensionnelle en coordonnées cylindriques est la méthode de Green, mais cette méthode est limitée par la condition que le cylindre concerné est un cylindre plein $r_0 = 0$, [93] ce qui ne permet pas son utilisation pour le cas où le domaine de stockage considéré est un cylindre creux $r_0 \leq r \leq r_\infty$.

Pour vérifier, la condition $r_0 = 0$ pour le cas stationnaire seulement a été imposée pour et le calcul de la température par l'utilisation de la méthode de séparation de fonctions, les valeurs obtenues pour quelques points sont identiques à celle obtenues par la méthode de GF «Green Function».

Il faut maintenant étudier le comportement de cette méthode avec des conditions aux limites imposées aléatoirement (conditions initiales périodiques) par exemple et voir comment se comporte cette approche à travers les résultats obtenus.

Et afin de valider cette approche il est nécessaire de faire une comparaison des résultats obtenus par l'utilisation de cette méthode avec des résultats issus de l'expérience pour voir si la distribution de la température autour du tube dans les deux directions r et z est compatible.

Chapitre 4

Validation et application de la méthode analytique

4.1-Application de la méthode de séparation de fonctions : Cas général

Afin d'examiner l'applicabilité de la méthode de séparation de fonctions, un cas théorique plus général est proposé avec des conditions aux limites et initiales, prises dans le but de voir la consistance de cette approche pour un cas plus global et de tester ses performance afin d'étendre son application à d'autres problèmes similaires. La solution analytique recherchée, dans ce cas de figure, concerne la résolution de l'équation de la chaleur avec des conditions initiales périodiques (sinusoïdales) pour des variations très fortes dans les deux directions spatiales, pour un domaine relativement petit. L'expression de la température le long du tube est, alors, donnée par la formulation sinusoïdale suivante :

$$T(r_0, z) = 60 + 60 \frac{\sin \left[\left(\frac{z}{2} \right) 1.95p \right]}{2} \quad (124)$$

et des conditions logarithmiques suivant « r » à savoir :

$$T(r, z_0) = a \ln r + b$$

et

$$T(r, z_l) = c \ln r + d .$$

Où a, b, c et d sont des constantes.

Les conditions imposées au fluide caloporteur, à savoir la température d'entrée et de sortie, sont respectivement :

$$T_i = T(0,0) = 60^\circ\text{C}$$

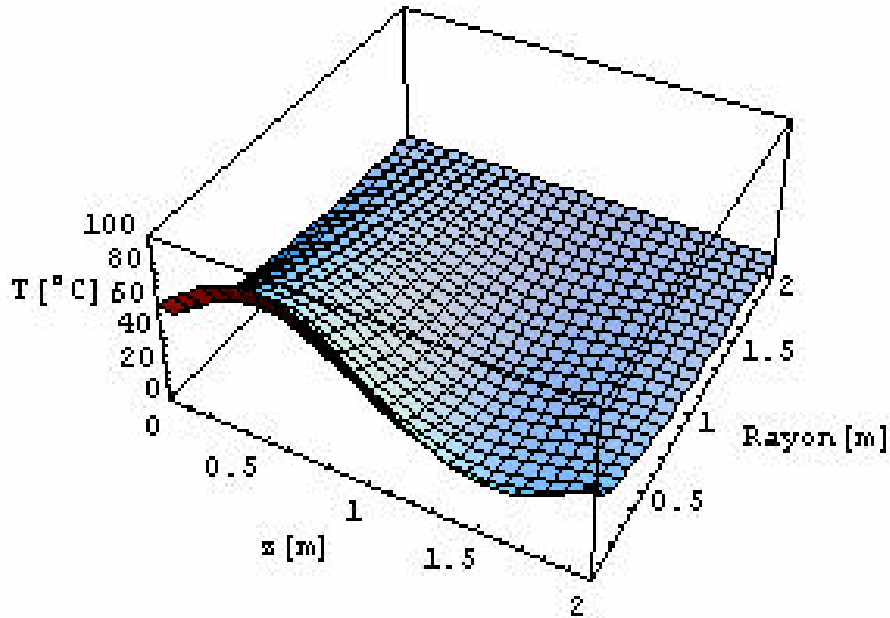
et

$$T_o = T(0,2) = 54^\circ\text{C}$$

Les résultats de l'application sont illustrés par les courbes présentées dans les deux paragraphes suivants :

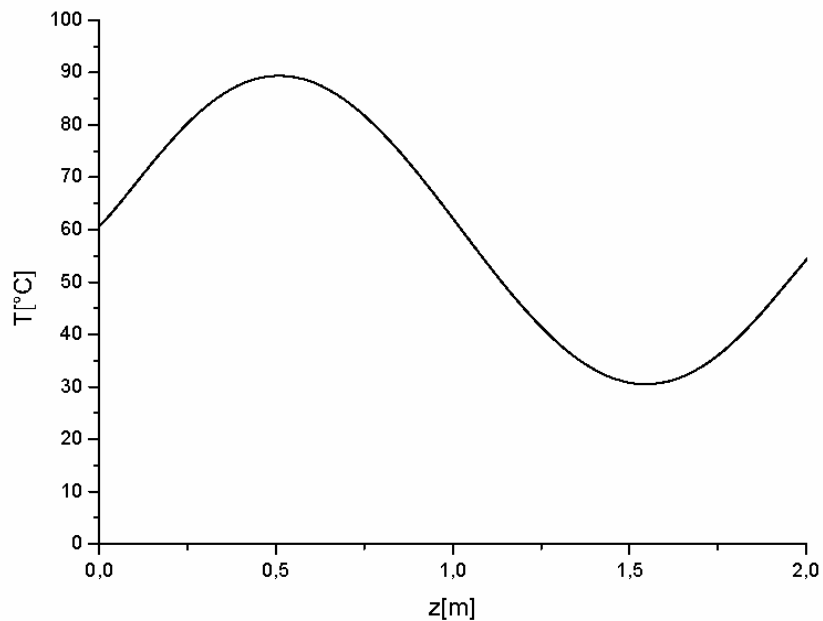
4.1.1- Variation de la température autour du tube

1) l'évolution de la température en 3D autour et le long du tube enterré dans le sol pour des conditions aux limites périodiques est représentée pour la courbe suivante :

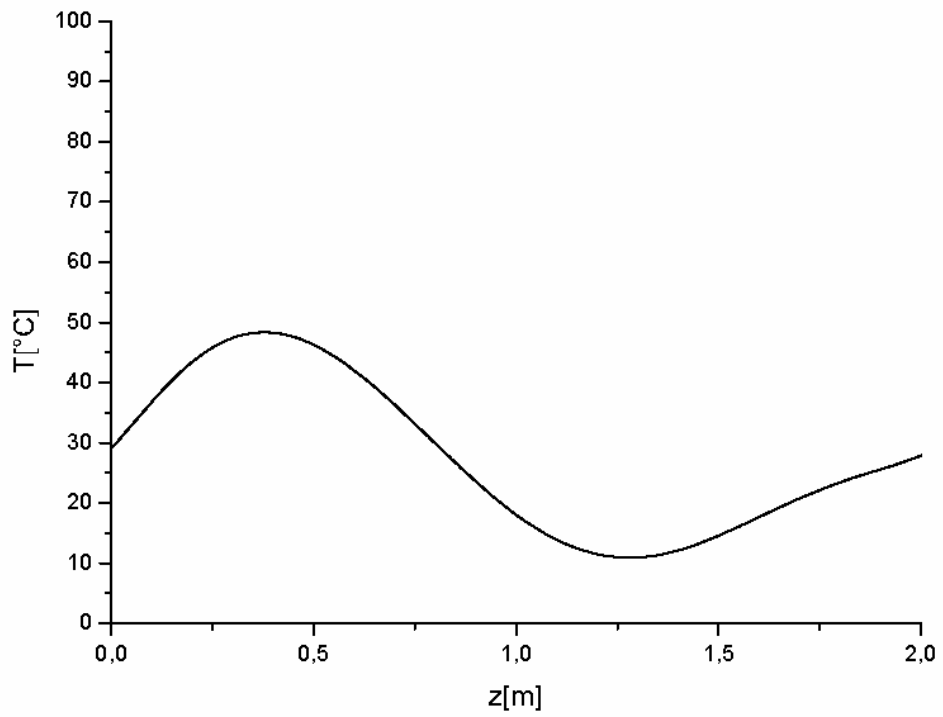


Courbe. (17-a) : champ de température

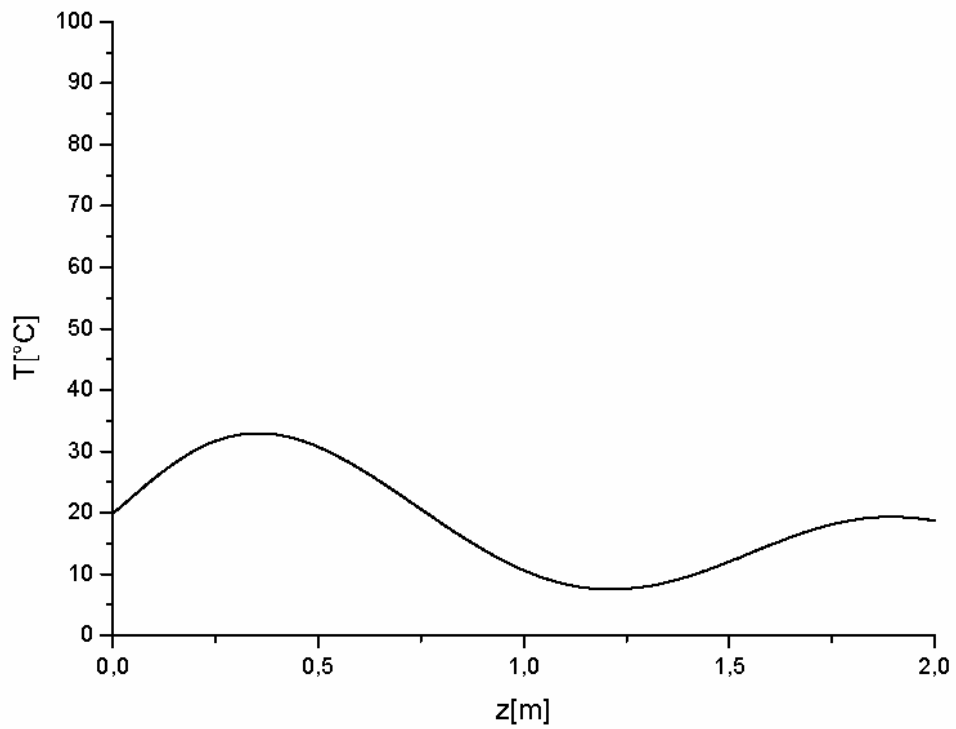
a- Evolution de la température le long du tube pour des valeurs de r fixes



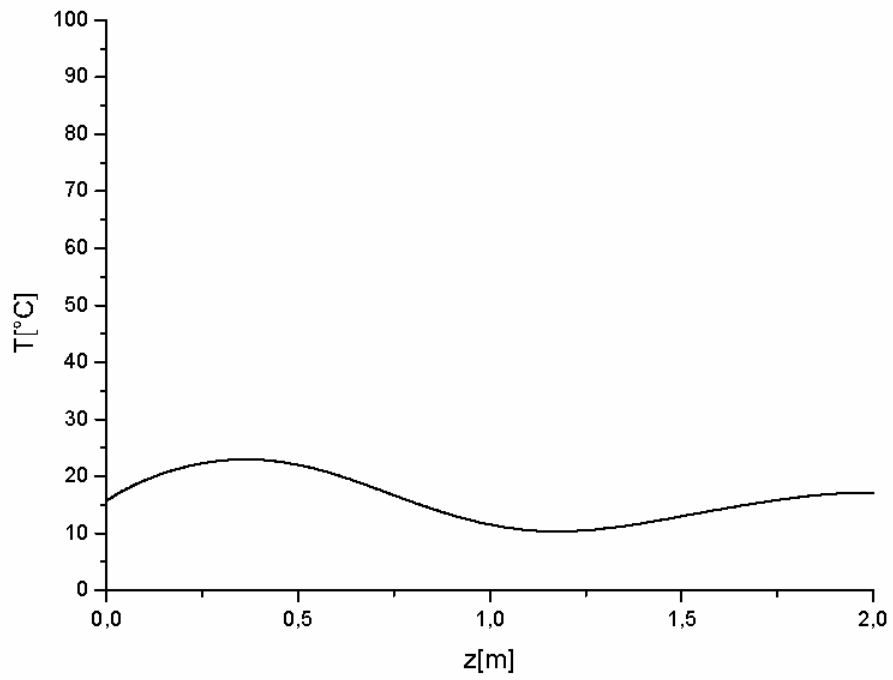
Courbe (17-b) : Variation de la température avec Z (m) à $r = r_0 = 0.012m$



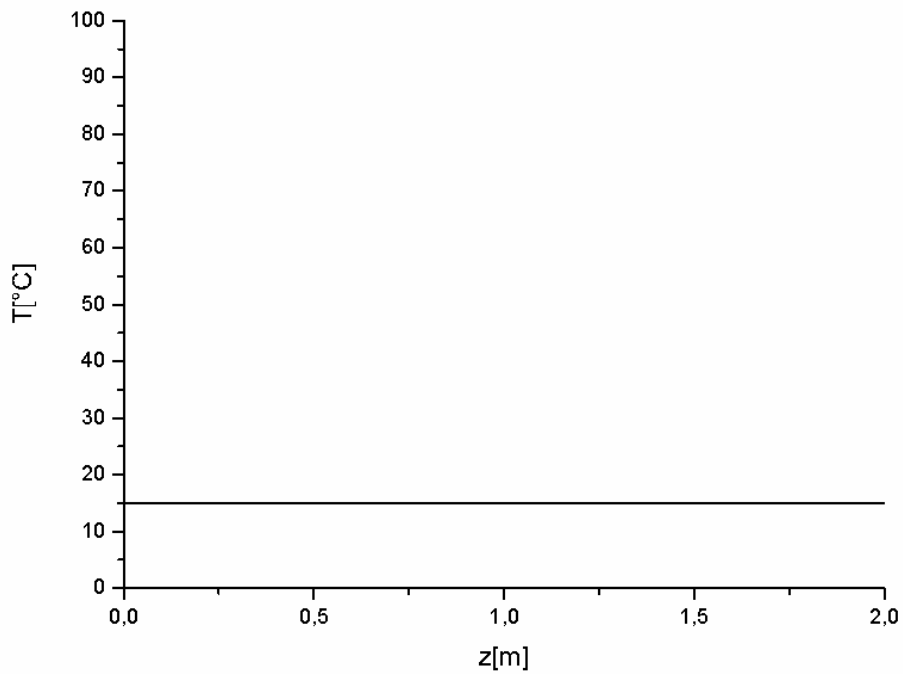
Courbe (17-b) : Variation de la température avec Z (m) à $r = 0.5m$



Courbe (17-b) : Variation de la température avec Z (m) à $r = 1.0m$

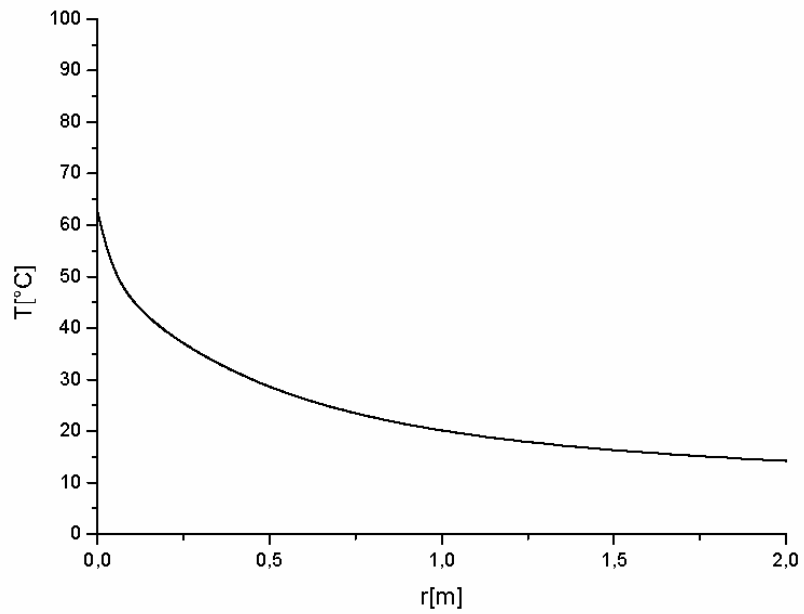


Courbe (17-b) : Variation de la température avec Z (m) à $r = 1.5m$

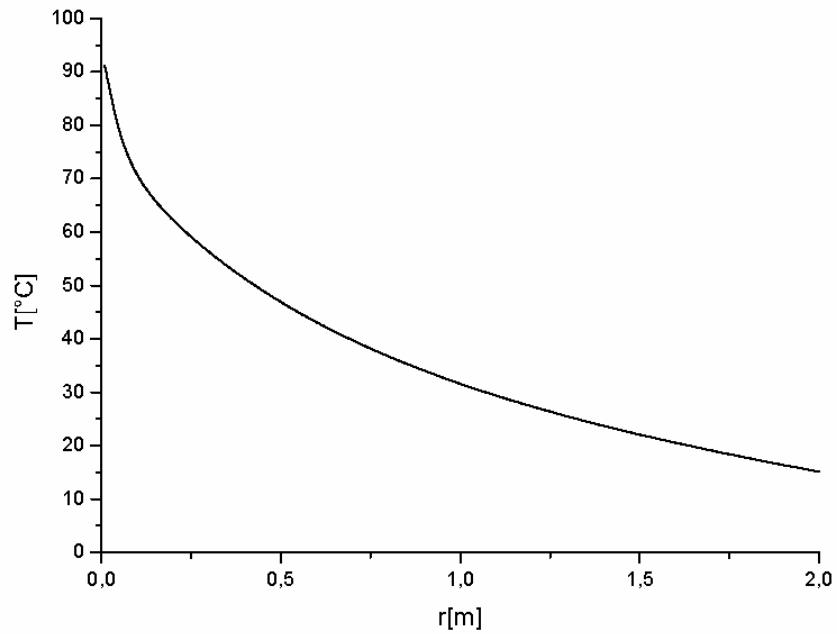


Courbe (17-b) : Variation de la température avec Z (m) à $r = r_{\infty} = 2.0m$

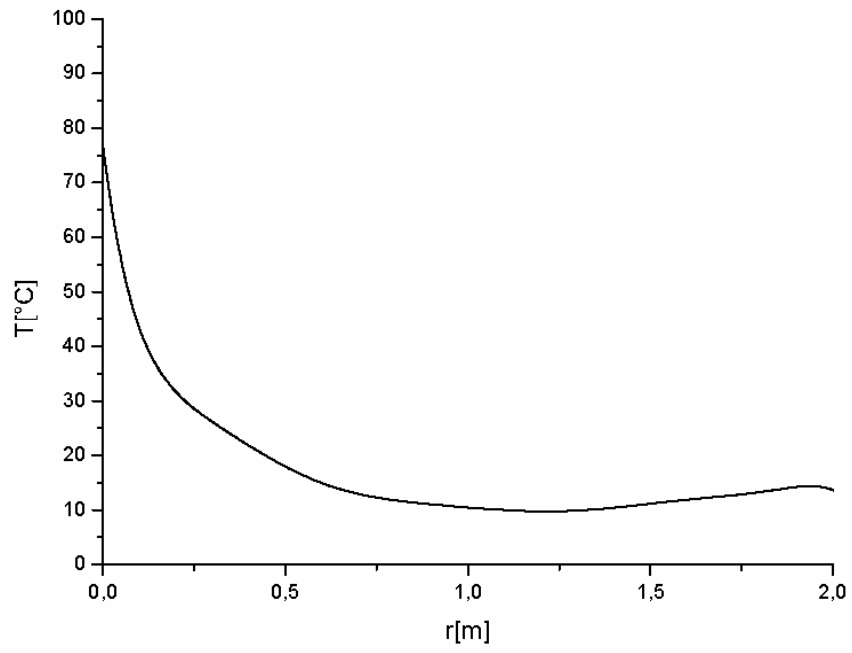
b- Evolution de la température autour du tube pour des valeurs de z fixes



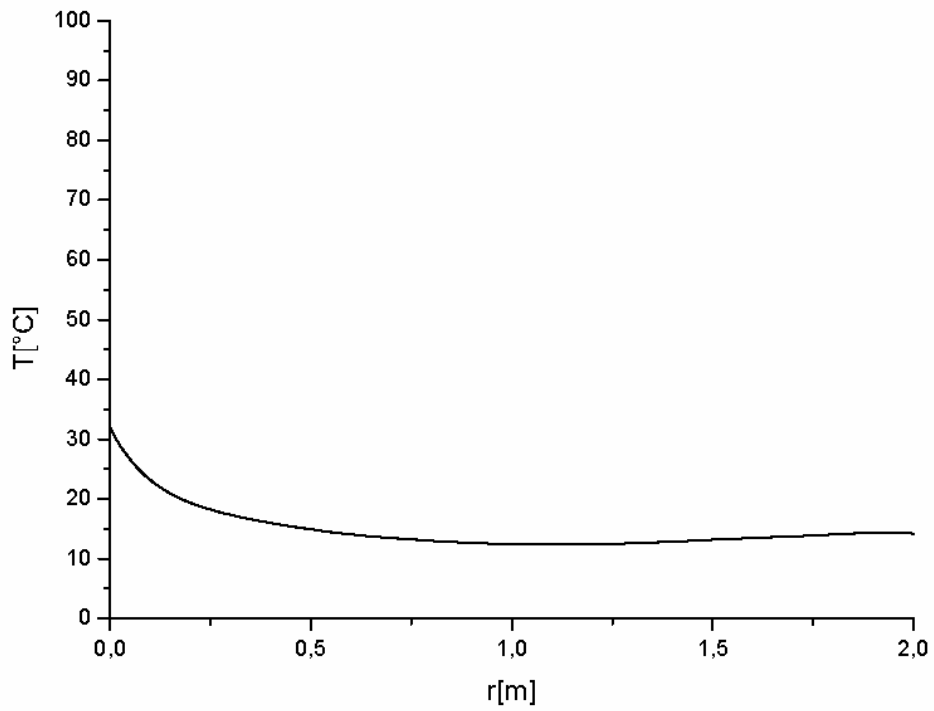
Courbe (18-a) : Variation de la température avec r (m) à $z = z_0 = 0m$



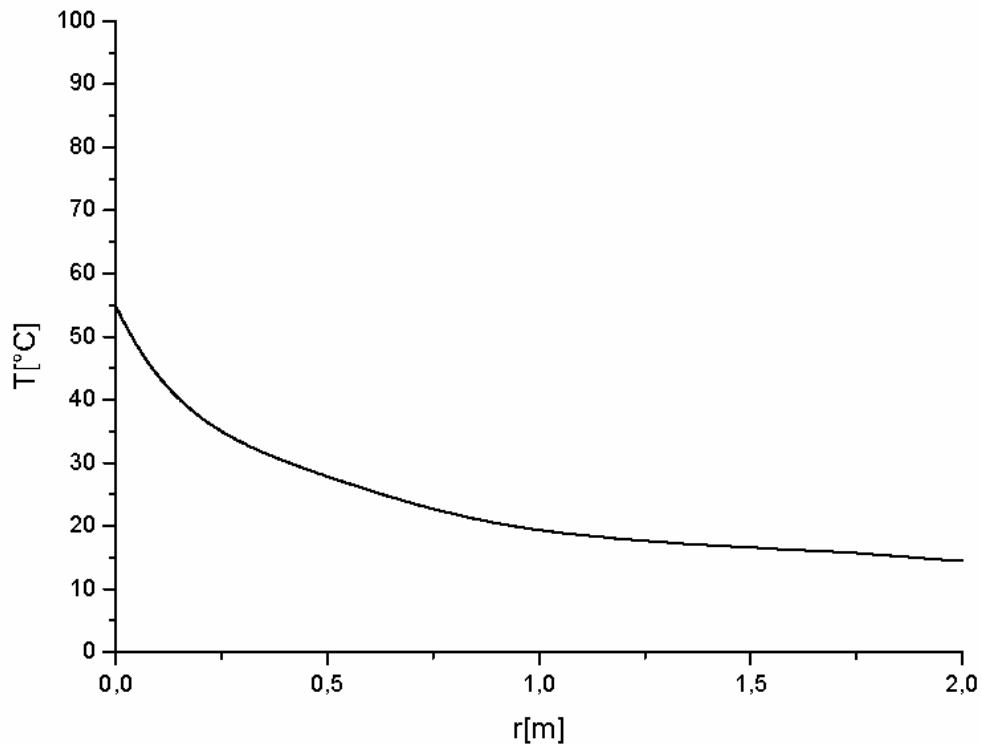
Courbe (18-b) : Variation de la température avec r (m) à $z = 0.5m$



Courbe (18-c) : Variation de la température avec r (m) à $z = 1m$



Courbe (18-d) : Variation de la température avec r (m) à $z = 1.5m$



Courbe (18-e) : Variation de la température avec r (m) à $z = z_l = 2.0m$

4.1.3- Résultats et commentaires

Avant d'aller à un cas d'application concret et avant toute confrontation avec des données de l'expérimentales, il est plus commode de tester la méthode à un cas caractérisé par des conditions aux frontières représentant des variations aiguës, graphiquement ; c'est une courbe de température distordue le long du tube. Quoiqu'elle soit théorique ou irréaliste elle peut servir comme test à la convergence de la méthode à un résultat physiquement plausible, ce qui est le cas de l'application de la méthode analytique à un cas général pour des conditions aux frontières représentant une fonction sinusoïdales suivant z et logarithmiques suivant r, nous constatons que les solutions obtenues varient d'une façon continue à travers le domaine tout entier.

Les courbes (de 17-a à 17-e) nous donnent une idée claire sur la variation de la température suivant z et à différent rayons du domaine, on constate qu'on s'éloignant du tube source l'effet des conditions initiales est amortie par l'inertie thermique du sole jusqu'à

épouser la courbe limite qui présente la température initiale du sol. La même conclusion peut être tirée pour les courbes 18-a, à 18-e, représentant l'évolution de la température dans les directions r (dans des plans passant par des valeurs de z constantes), pour des conditions aux frontières logarithmiques.

Cette application est présentée afin d'évaluer la réponse de notre modèle de solution, la problématique pour ce cas de figure n'est qu'une situation extrême qui peut s'imposer lors du traitement d'un cas réel. L'analyse systématique des résultats exprime un comportement en concordance avec les lois de la physique fondamentale. Elle a, en effet, mis en évidence une atténuation de la variation en s'éloignant de la source de chaleur linéaire, c'est-à-dire avec l'augmentation de la résistance thermique. Bien que les simplifications faites sur les propriétés thermiques du sol, ainsi que son homogénéité supposée, peuvent constituer une entrave devant une prédiction d'un champ de température décrivant fidèlement le cas réel, il y a là une possibilité de prédiction acceptable pour mesurer l'ampleur de l'influence des propriétés déjà pris en considération, ouvrant le chemin pour la mise en valeur de la procédure mathématique proposée pour la solution pour des cas possédant des conditions aux frontières plus compliquées.

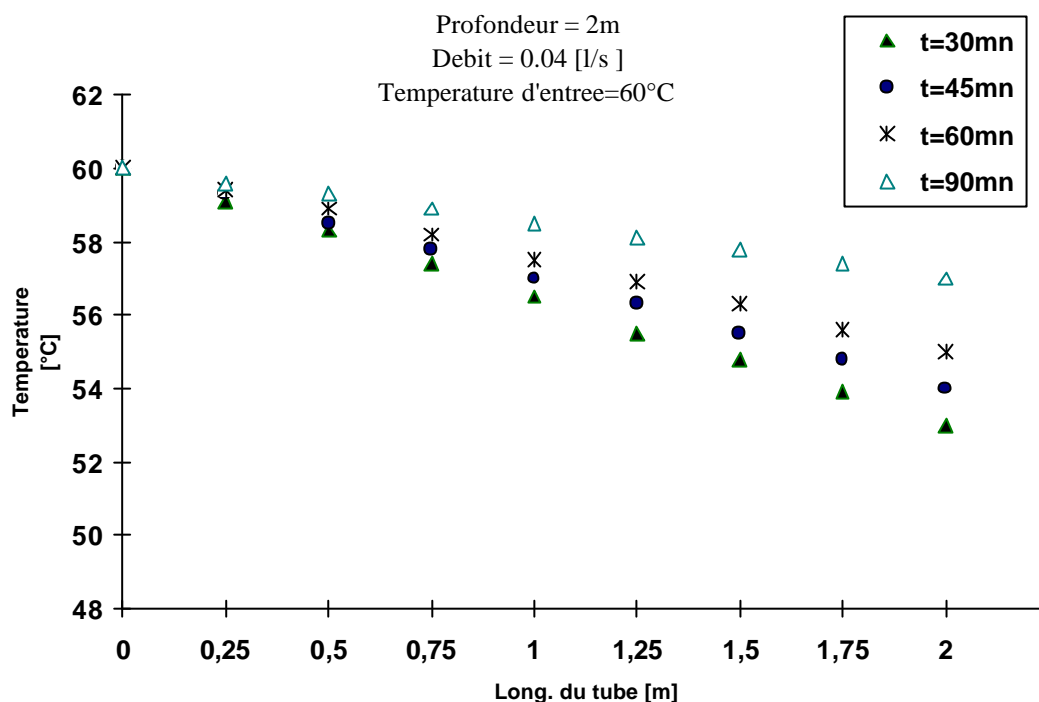
4.2- Comparaison théorie expérience

4.2.1- Résultats expérimentaux

Il s'agit de l'étude de la possibilité d'utiliser la terre humide non saturée et non homogène comme un réservoir de chaleur et de calculer à l'aide des mesures prélevées la quantité de chaleur cédée à la terre par un fluide chaud, circulant dans un tuyau enterré à différentes profondeurs. L'énergie qui sera transmise au sol est l'énergie thermique solaire, par exemple. La chaleur sera dissipée dans le sol pendant le régime chaud (objectif de notre étude), et extraite par le processus inverse pendant le régime froid. Pour pouvoir valider le modèle analytique proposé, seules les courbes décrivant le champ de distribution des températures autour et le long du tube transportant le fluide caloporteur pendant le régime de chauffage [92] qui peuvent donner une valeur à notre mode de stockage.

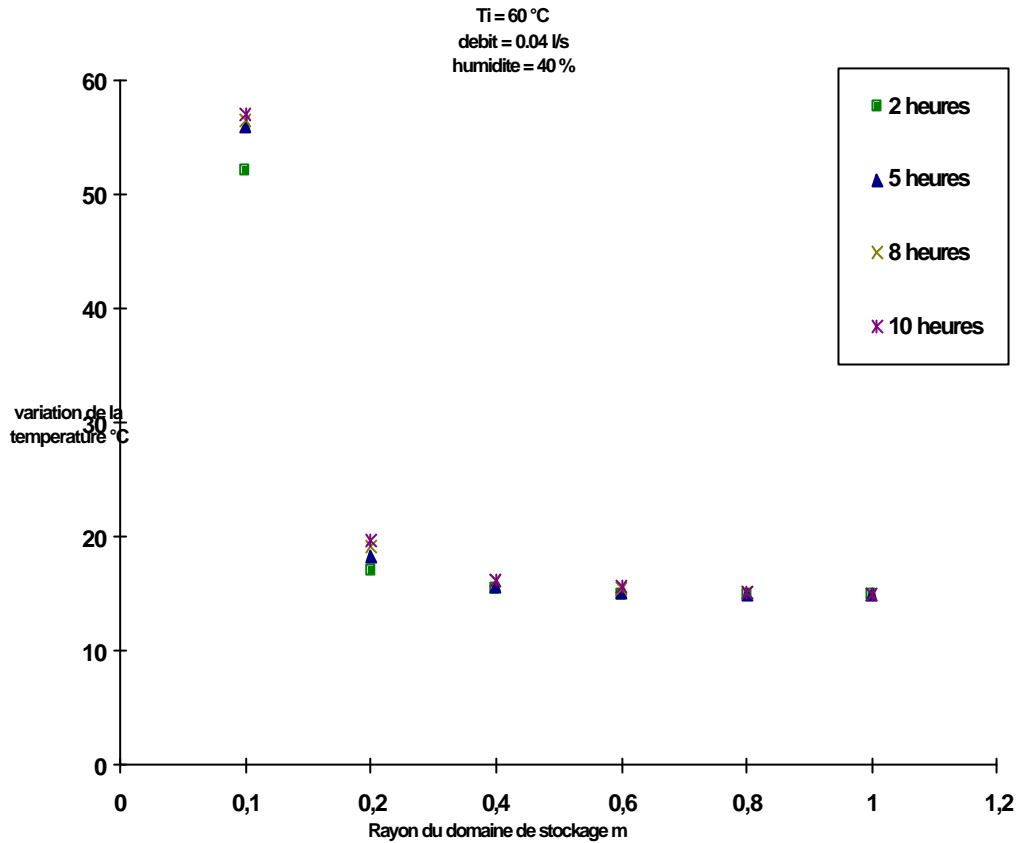
Les courbes 20 et 21 suivantes représentent la variation de la température avec la variation du rayon du domaine du stockage et la variation de la longueur du tube au cours du temps.

Le tube est enterré à une profondeur de 2 m dans un sol avec une teneur en eau de 40 %, le fluide caloporteur circule avec un débit de 0.04 (l/s) avec une température d'entrée de 60 °C. Les courbes 20 indiquent que la variation de la température le long du tube est linéaire est qu'elle diminue le long du tube mais que la température du même point augmente avec le temps[92].



Courbe (20) : Variation de la température avec le rayon du domaine du stockage au cours du Temps

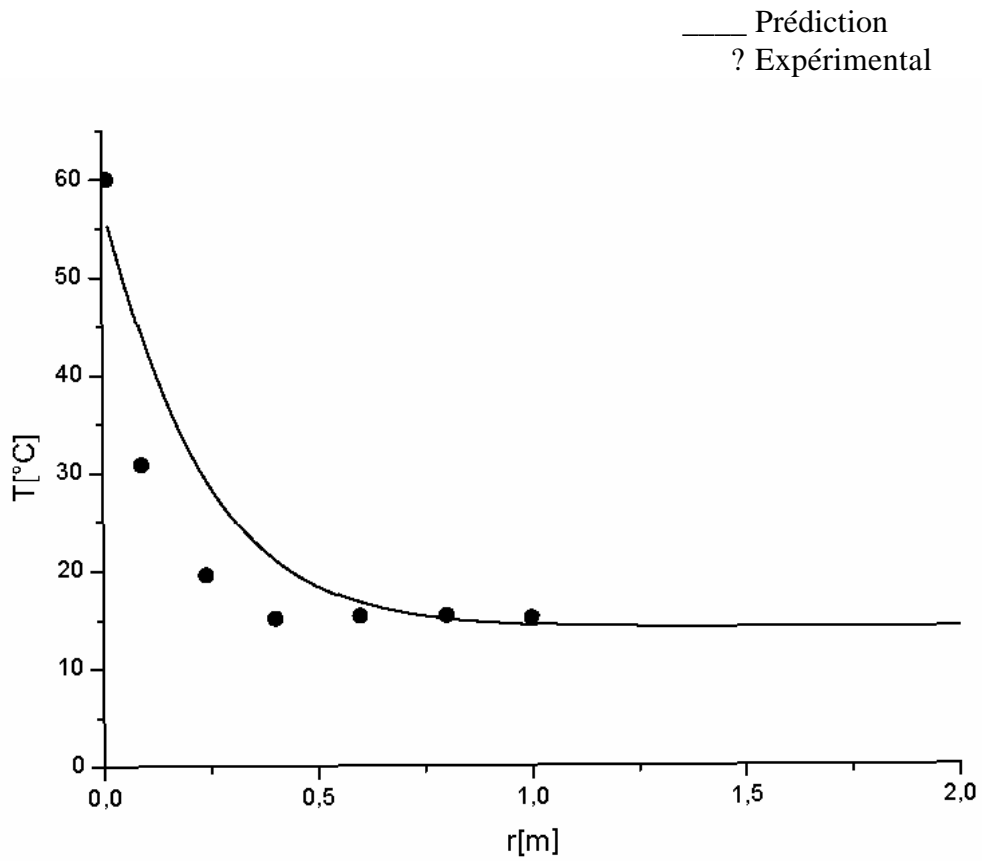
Par contre les courbes 21 indique que la variation de la température avec la variation du rayon du domaine du stockage qu'elle diminue assez rapidement tout en s'éloignant du tube cela est du à l'inertie thermique du sol qui est très grande (résistance au transfert thermique) cela est lié à la diffusivité thermique du sol qui est très petite , d'autre part on remarque que la température de chaque point du domaine de stockage augmente avec le temps cela veut dire qu'il y'a accumulation de la chaleur dans le sol humide.



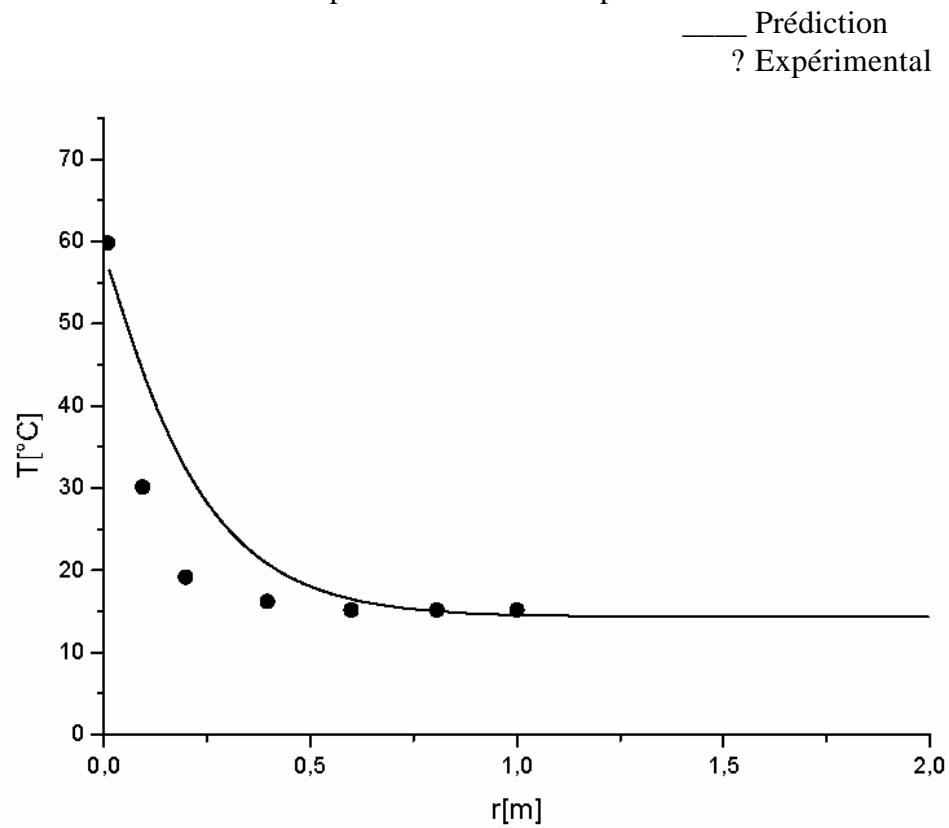
Courbe (21) : Variation de la température le long du tube au cours du temps. °C

4.2.2- Variation de la température autour du tube, comparaison « théorie-expérience »

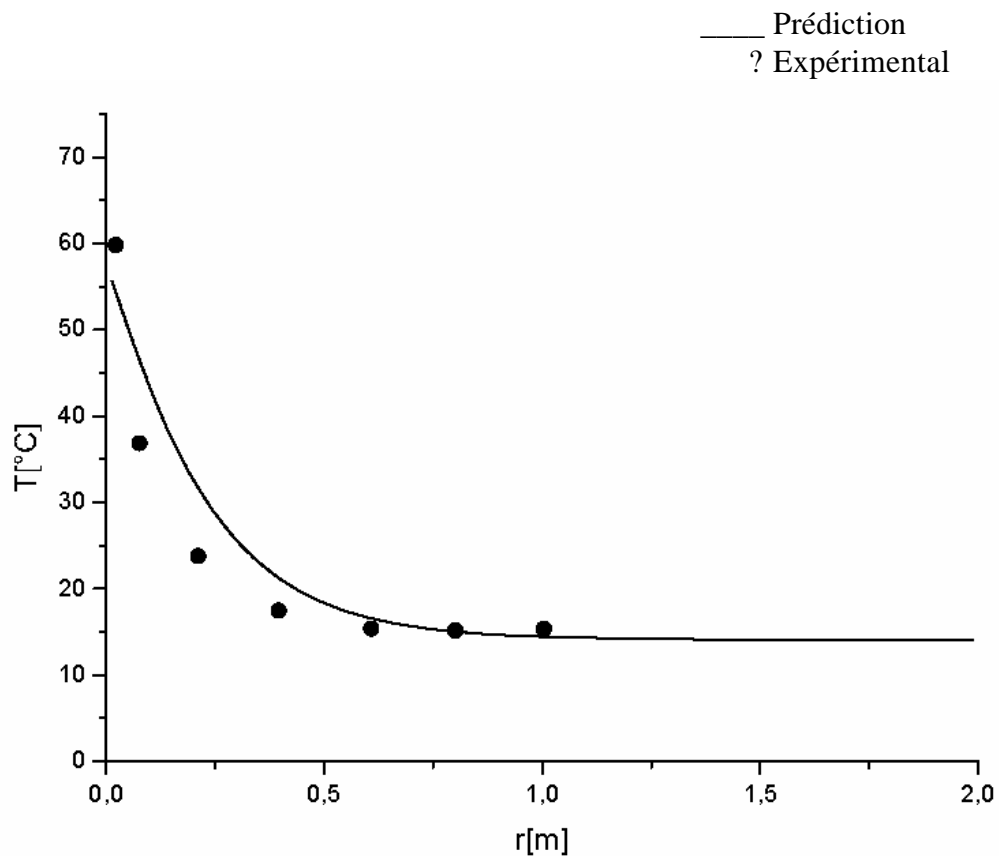
Dans le but de conforter les résultats de l'approche analytique proposée, il a été procédé à une confrontation des résultats théoriques obtenus avec ceux d'une expérience menée pour, approximativement, les mêmes conditions de fonctionnement. Il s'agit de résultats concernant l'évolution de la température du sol en fonction du rayon du domaine de stockage, dans le plan passant par l'entrée du tube transportant le fluide caloporteur ($z=0$). Différentes périodes de chauffage sont considérées, à savoir après deux heures, cinq heures, huit heures et dix heures. L'ensemble est représenté par les graphes suivants. On remarque que les courbes expérimentales et analytiques représentées ont la même allure décrivant ainsi le même phénomène thermique et quoiqu'elle ne coïncident pas parfaitement au début de l'expérience (courbe 22-a et courbe 22-b) elles convergent vers les mêmes résultats au cours du temps (courbe 22-c et courbe 22-d) on peut conclure que la méthode proposée pour résoudre l'équation de la chaleur bidimensionnelle en coordonnées cylindriques pour un cylindre creux $r_0 \leq r \leq r_\infty$ est valable.



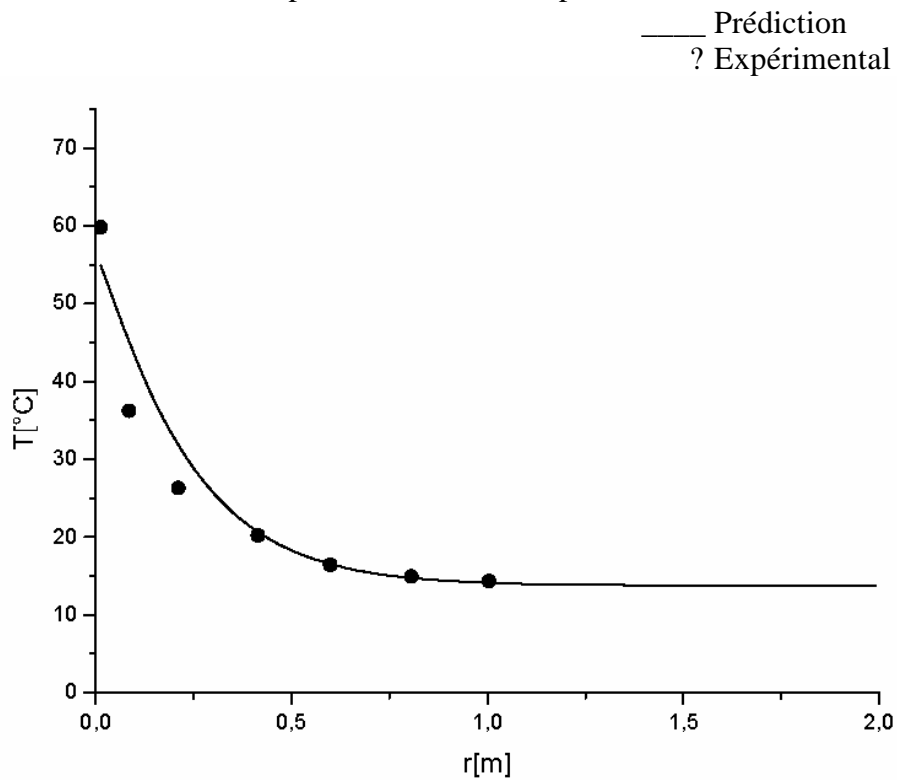
Courbe (22-a) : Variation de la température autour du tube après 2heures
 Comparaison « théorie-expérience »



Courbe (22-b) : Variation de la température autour du tube après 5heures
 Comparaison « théorie-expérience »



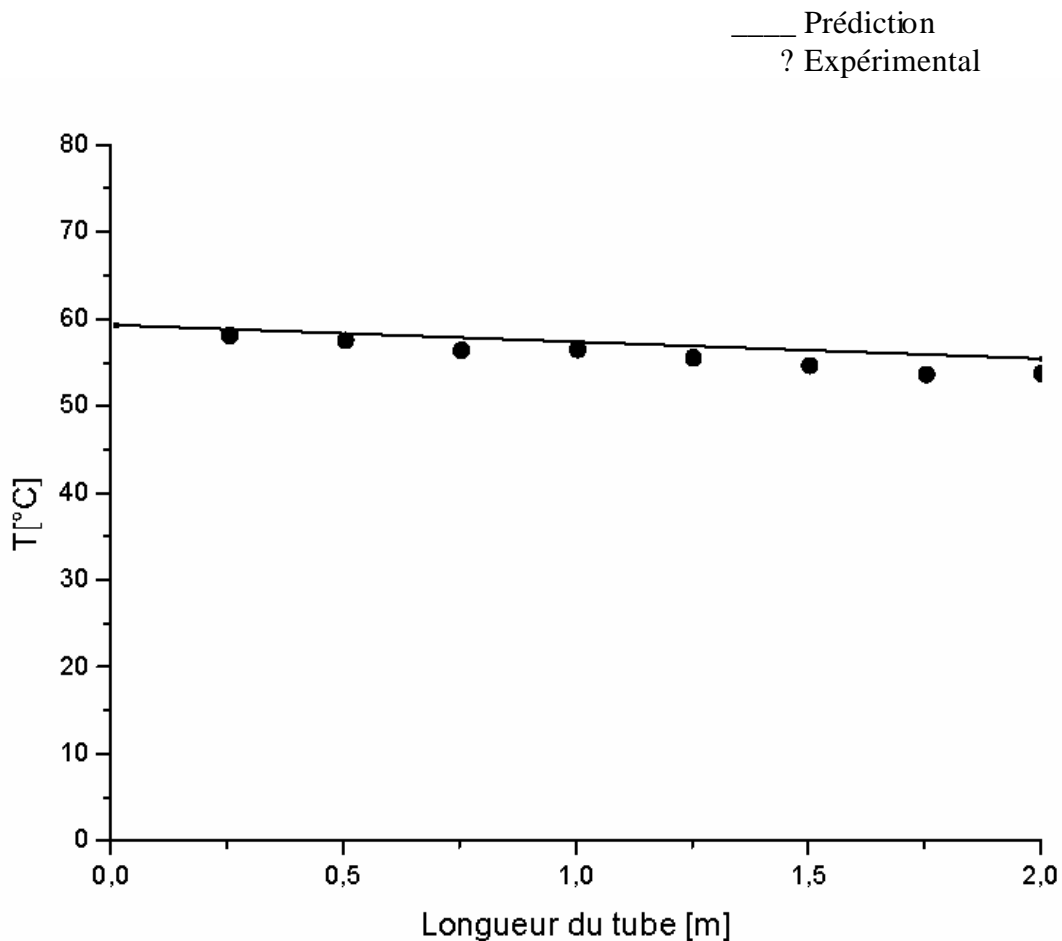
Courbe (22-c) : Variation de la température autour du tube après 8heures
 Comparaison « théorie-expérience »



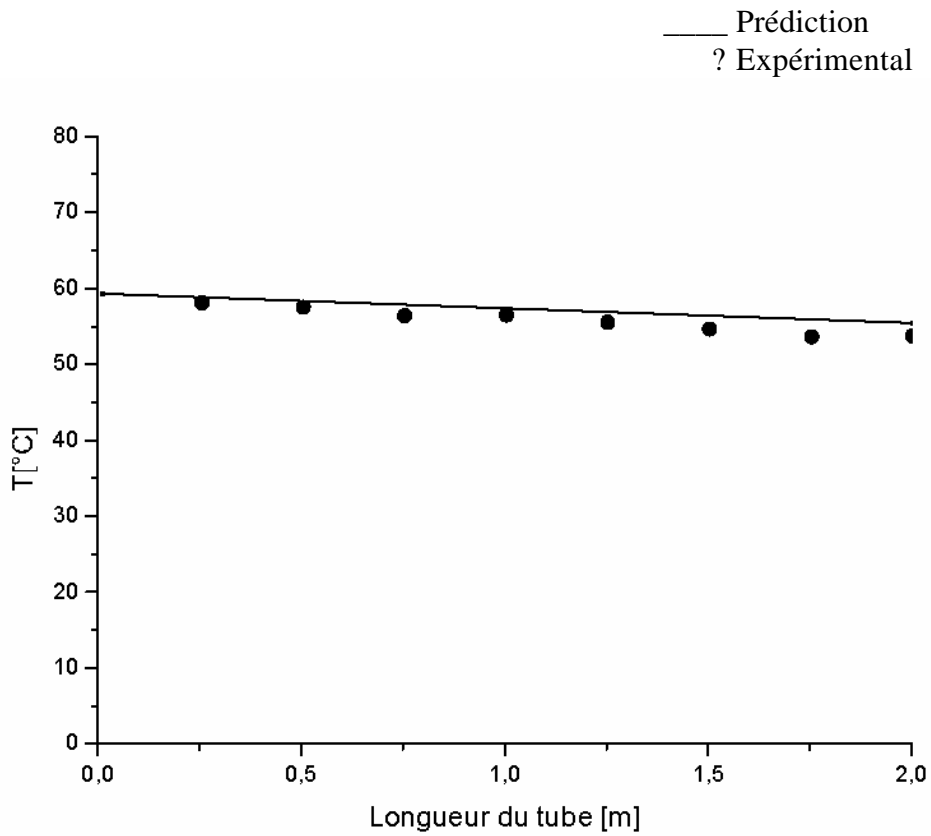
Courbe (22-d) : Variation de la température autour du tube après 10heures
 Comparaison « théorie-expérience »

4.2.3- Variation de la température le long du tube. Comparaison « théorie-expérience »

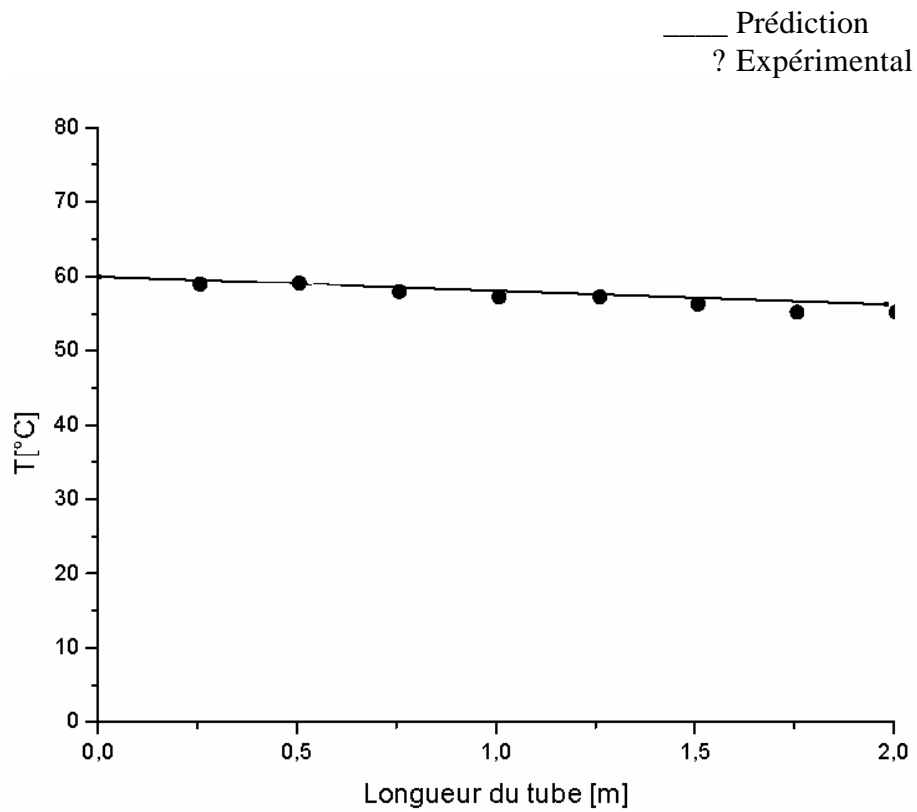
La confrontation des résultats « expérience/théorie » et l'analyse de l'évolution de la température de la surface de contact tube/sol ($r = r_0 = 0.011$ m) en fonction de la position longitudinale le long du tube transportant le fluide caloporteur, pour plusieurs périodes de chauffage à savoir après une 30mn, 45mn, 1 heure et 1 h 30, est donnée par les différentes courbes ci-dessous. Il apparaît que les courbes expérimentales et analytiques représentent ont la même allure décrivant ainsi le même phénomène thermique le long du tube et qu'elles coïncident presque parfaitement (courbe 23-a et courbe 22-3) dès le début de l'expérience et convergent vers les mêmes résultats au cours du temps on peut conclure que la méthode proposée pour résoudre l'équation de la chaleur est valable et



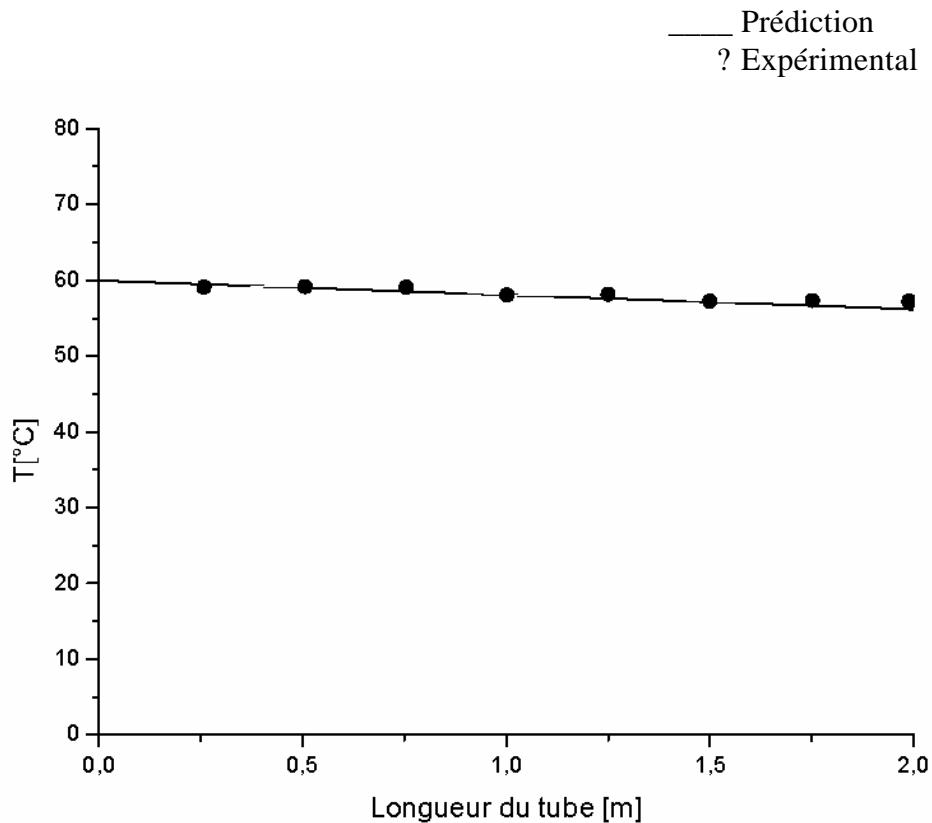
Courbe (23-a) : Variation de la température le long du tube, Comparaison « théorie expérience » Après 0.5 heure (30mn)



Courbe (23-b) : Variation de la température le long du tube, Comparaison « théorie expérience » après 0.75 heure (45mn)



Courbe (23-c) : Variation de la température le long du tube, Comparaison « théorie expérience » après 1 heure (60mn)



Courbe (23-d) : Variation de la température le long du tube, Comparaison « théorie expérience » après 1.5 heure (90mn)

Commentaires :

L'analyse des différentes courbes (22-a.....) et (23-a....) permet de remarquer que l'évolution des résultats obtenus par l'application de la méthode de séparation de fonction pour résoudre l'équation de conduction de la chaleur au cours du temps est identique aux résultats obtenus pour les mêmes conditions (profondeur, humidité du sol, diffusivité thermique du sol, température d'entrée du fluide caloporteur et son débit) cela permet d'affirmer la consistance de l'approche proposée.

4.2.4-Discussion des résultats

La vérification de l'exactitude des résultats de l'utilisation de cette approche analytique développée pour la résolution de l'équation de conduction thermique par les résultats et mesures issue de l'expérimentation permet une validation bien contrôlée de l'un comme de l'autre. On constate que cette confrontation « expérience-théorie » concernant l'évolution de la température du sol en fonction du rayon du domaine de stockage, sur le plan

passant par l'entrée du tube transportant le fluide caloporteur, pour différentes périodes de chauffage, exprimées par les courbes (22a à 22d) se caractérise par une coïncidence plus ou moins acceptable compte tenu des hypothèses simplificatrices considérées au départ pour l'établissement des conditions initiales et aux limites, pour tester la méthode analytique proposée.

Pour le cas de la variation de la température en fonction de z , les résultats obtenus par la méthode analytique coïncident parfaitement avec ceux fournis par l'expérience, comme c'est visiblement représenté sur les courbes (23a à 23d), ce qui laisse prédire que la méthode analytique proposée est valable pour la résolution de l'équation de la chaleur (équation elliptique) en 2D pour un cylindre creux ($a \leq r \leq b$; dans notre cas $a = r_0 = 0.011\text{m}$, $b = r_\infty = 2\text{m}$).

4.4-Détermination des dimensions du domaine de stockage.

Les courbes (22) décrivant la distribution de la température en fonction du rayon du domaine de stockage (autour du tube) nous permettent de constater qu'après une période de stockage (passage de fluide caloporteur dans le tube allant jusqu'à 10 heures, qui correspond moyennement à une période de stockage journalier de 8h du matin jusqu'à 18h de l'après midi), et qu'à partir d'une distance de la surface du tube égale au maximum à 1mètre, la température reste constante et égale à la température du sol. Cette distance ($r = 1\text{ m}$), peut être assimilée au rayon du domaine de stockage. Ce domaine de stockage de la chaleur dans le sol devient alors un cylindre de 2m de diamètre. Pour une configuration utilisant plusieurs tubes parallèles horizontaux la distance optimale séparant deux tubes successifs doit donc être égale à 2m.

4.5-Caractéristiques du stockage

A partir des deux cas considérés pour la validation de l'approche analytique (l'application à un cas général, et la validation théorie-expérience), on peut proposer l'extension de son application pour d'autres cas de transfert en faisant varier les différents paramètres mis en jeu (nature du milieu, conditions initiales et aux limites, position et puissance de la source de chaleur, etc.)

Parmi les résultats qu'il est possible d'extraire, il y a l'application pour la détermination des caractéristiques du domaine de stockage, dont, entre autres :

- le coefficient global de transfert de chaleur,
- la puissance de stockage,
- la quantité de chaleur stockée et destockée
- le rendement de stockage.

4.5.1-Coefficient global de transfert de chaleur

Pour déterminer le coefficient global de transfert de chaleur entre le fluide caloporteur circulant dans le tube et le sol environnant, on va déterminer la puissance de stockage de chaleur cédée par le fluide et celle reçue par le sol. Ainsi, la puissance thermique cédée par le tube est donnée par:

$$P = \dot{m}_p c_p (T_e - T_{msf})$$

Avec

P = La puissance cédée par le fluide caloporteur par unité de temps (W)

\dot{m}_p = débit massique du fluide caloporteur (kg/s)

C_p = chaleur spécifique du fluide caloporteur (KJ/kg. °C)

T_e = température d'entrée du fluide caloporteur (°C)

T_{msf} = température de sortie du fluide caloporteur (°C)

La puissance thermique reçue par le sol, quant à elle, est donnée par :

$$P = \frac{A.G.(T_{mf} - T_{ms})}{t_s}$$

Avec

A = la surface extérieure du tube (m^2), t_s = l'intervalle de temps [s]

T_{mf} = température moyenne du fluide caloporteur [$^{\circ} K$]

T_{ms} = température moyenne du domaine de stockage [$^{\circ} K$], G = coefficient global de transfert de chaleur

Par l'utilisation de l'expression suivante de la température :

$$T(r, z, t) = [U(r, z, t) + V(r, z, t)]$$

La puissance cédée par le fluide pendant la période de chauffage sera donnée par l'expression suivante :

$$P = m_p \cdot c_p \left[\frac{\int_0^{t_s} (T_e - T_{sf}) dt}{\Delta t} \right]$$

avec :

$$T_{sf} = T(r_0, z_l, t) = U(r_0, z_l, t) + V(r_0, z_l, t)$$

D'où :

$$P = m_p \cdot c_p \left[\frac{\int_0^{t_s} (T_e - [U(r_0, z_l, t) + V(r_0, z_l, t)]) dt}{t_s} \right]$$

m_p = le débit massique du fluide caloporteur (kg/s)

t_s = la durée de stockage [heures]

C_p = la chaleur spécifique du fluide caloporteur (W/kg. $^{\circ}C$)

T_e = la température d'entrée du fluide caloporteur ($^{\circ}C$)

$T_{sf} = T(r_0, z_l, t)$ = la température de sortie du fluide caloporteur au cours du temps ($^{\circ}C$)

De même, la puissance reçue par le sol pendant la période de chauffage est donnée par l'expression suivante :

$$P = \frac{A.G.(T_{mf} - T_{ms})}{\Delta t}$$

Où T_{mf} = La température moyenne de fluide. Elle sera donnée par l'expression suivante :

$$T_{mf} = \frac{\int_0^{z_l} \int_0^{t_s} [U(r_0, z, t) + V(r_0, z, t)] dz dt}{z_l \cdot t_s}$$

T_{ms} = température moyenne du domaine de stockage donnée par l'expression suivante :

$$T_{ms} = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{t_s} [U(r, z, t) + V(r, z, t)] dr dz dt}{r_\infty \cdot z_l \cdot t}$$

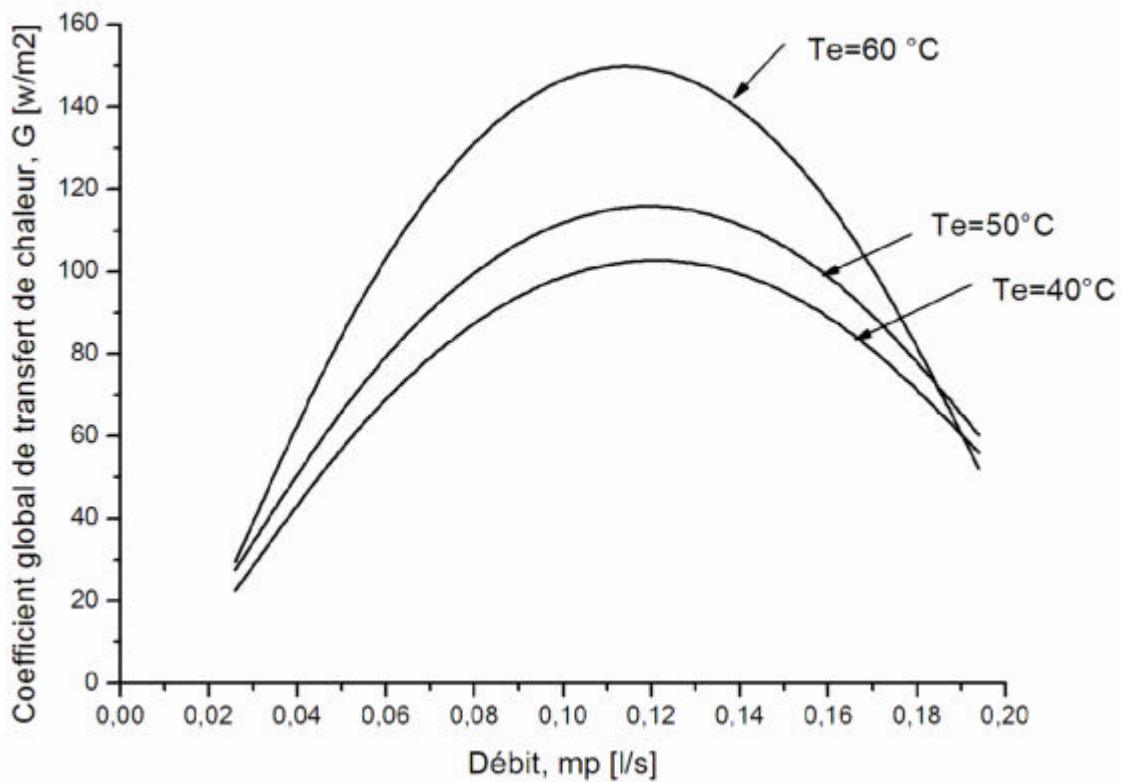
Le bilan énergétique donne ensuite:

$$\frac{A.G.(T_{mf} - T_{ms})}{t_s} = m_p \cdot C_p \cdot \left[\frac{\int_0^{t_s} (T_e - T(r_0, z_l, t)) dt}{t_s} \right]$$

D'où :

$$G = \frac{\Delta t \cdot m_p \cdot C_p \cdot \left[\frac{\int_0^{t_s} (T_e - T(r_0, z_l, t)) dt}{\Delta t} \right]}{A.(T_{mf} - T_{ms})}$$

Ce coefficient global du transfert thermique peut être représenté sur la figure suivante.



Courbes (24) : Coefficient global de transfert de chaleur en fonction du débit de fluide caloporteur pour différentes T_e

4.5.2-La puissance de stockage :

La puissance reçue par le sol est donnée par la formule suivante :

$$P = c_{ps} \cdot (T_{ms} - T_{\infty}) \cdot \frac{M}{\Delta t}$$

M est la masse du domaine de stockage [kg], donnée par :

$$M = \rho_s \cdot \rho \cdot r_{ds}^2 \cdot z_l$$

où :

ρ_s = la masse volumique du sol (kg/m^3)

T_{ms} = la température moyenne du volume de stockage, donnée par :

$$T_{ms} = \frac{\int_{r_0}^{r_\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{t_s} [U(r, z, t) + V(r, z, t)] dr dz dt}{r_\infty \cdot z_l \cdot t}$$

L'expression de la puissance de stockage dans la masse M du sol (le domaine de stockage), est donnée par :

$$P = c_{ps} \cdot \left[\left(\frac{\int_{r_0}^{r_\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{t_s} [U(r, z, t) + V(r, z, t)] dr dz dt}{r_\infty \cdot z_l \cdot t_s} \right) - T_\infty \right] \cdot \left[\frac{r_s \cdot p \cdot r_\infty^2}{t_s} \right]$$

Avec

r_∞ = le rayon du domaine de stockage qui est égal à 1 m

z_l = la longueur du tube transportant le fluide calorifique (égale à 2m)

T_∞ = la température du sol avant le chauffage (égale à 15 °C)

r_s = la masse volumique du sol sablonneux, estimée à 1550 kg/m³

c_{ps} = la capacité calorifique dont la valeur, pour notre cas, est de 0.8 (kJ/kg.°C) .

t_s = la durée de stockage [h]

Pour connaître la variation, avec l'humidité H du sol, de la puissance stockée, il faut introduire l'expression de la capacité calorifique basée sur la formule de De Vries [8], soit :

$$c_{ps} = c_{cte} + c_q \cdot H$$

Où

$$c_{cte} = 1.26 \times 10^3 \text{ (kJ/m}^3 \text{ K)} \quad \text{et} \quad c_q = 4.2 \times 10^3 \text{ (kJ/m}^3 \text{ K)} \quad \text{et} \quad H(\%)$$

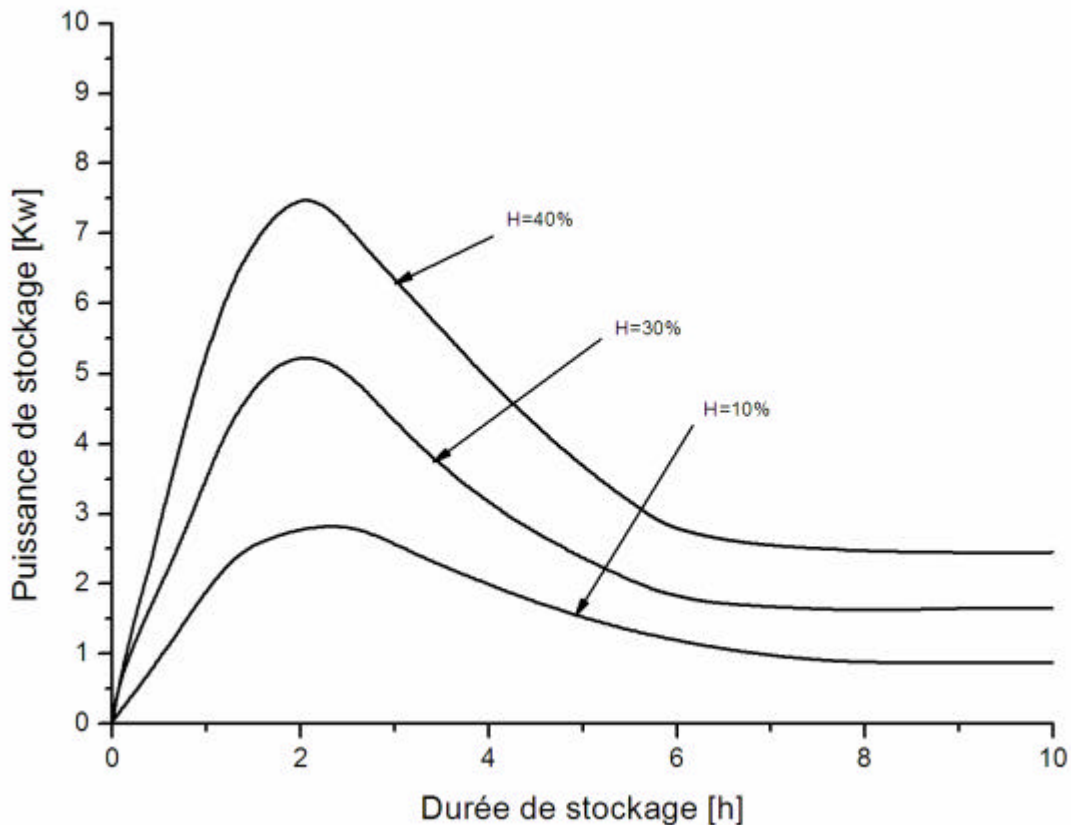
Comme :

$$P = (c_{cte} + c_q \cdot H) \cdot \left[\left(\frac{T_{ms}}{r_\infty \cdot z_l \cdot t_s} \right) - T_\infty \right] \cdot \left[\frac{p \cdot z_l \cdot r_\infty^2}{\Delta t} \right]$$

Alors

$$P = (1.26 + 4.2.H) \times 10^3 \cdot [T_{ms} - T_{\infty}] \left[\frac{P \cdot z_l \cdot r_{\infty}^2}{t_s} \right]$$

La puissance cédée sera exprimée pour différentes humidités 10%, 30% et 40 % par les courbes suivantes :



Courbe (25) : Puissance de stockage

4.5.3-La quantité de chaleur stockée :

La quantité de chaleur stockée Q dans le domaine de stockage pendant le jour, sera donnée par :

$$Q = \int_0^t P dt$$

où P est la puissance de stockage :

$$P = c_{ps} \cdot (T_{ms} - T_{\infty}) \cdot \frac{M}{t}$$

Soit :

$$Q = c_{ps} \int_0^{t_s} \left[[T_{ms} - T_{\infty}] \cdot \frac{r_s \rho \cdot r_{\infty}^2}{t} \right] dt$$

4.5.4-La quantité de chaleur déstockée :

Pendant la nuit, le circuit inverse sera mis en marche pour la récupération de la chaleur stockée Q' qui sera exprimée par :

La quantité de chaleur déstockée est

$$Q' = \int_0^{t_d} P' dt$$

P' étant la puissance de déstockage :

$$P' = -c_{ps} \cdot [T_{ms} - T_{md}] \frac{M}{t'}$$

soit :

$$Q' = -c_{ps} \int_0^{t_d} \left[\frac{(T_{ms} - T_{md}) \cdot M}{t'} \right] dt$$

où :

T_{md} = la température moyenne du domaine du stockage après déstockage [°K]

t_d = la durée de l'opération de déstockage. [Heures]

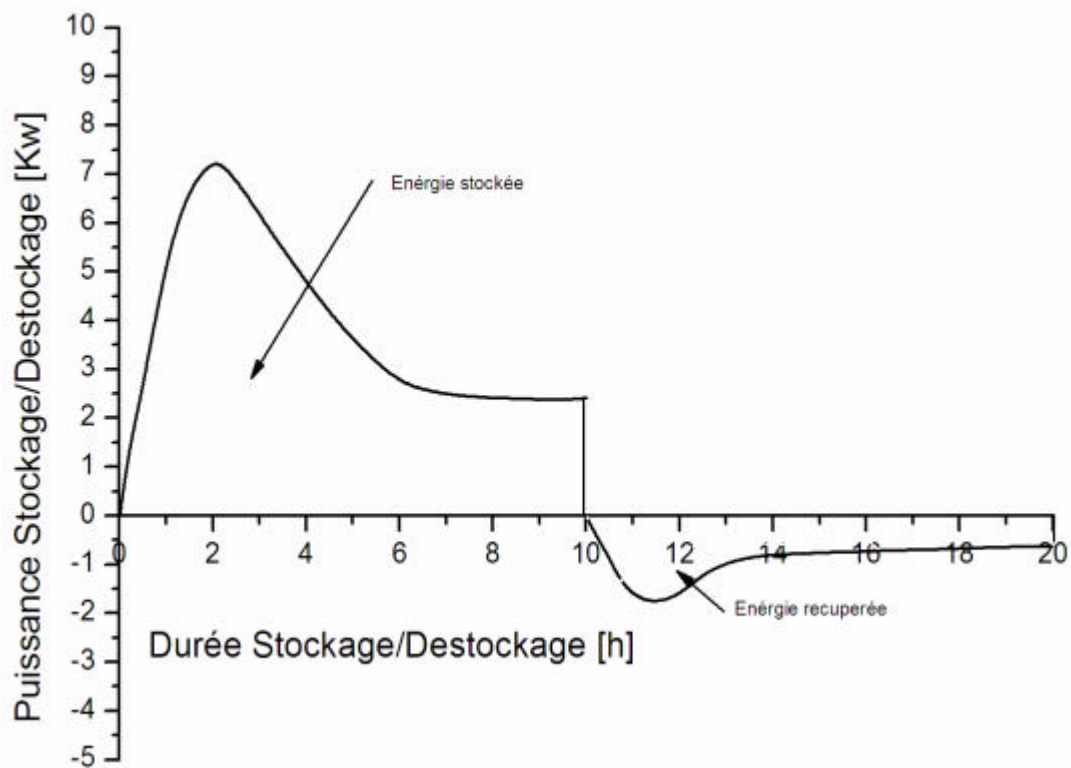
M = la masse du domaine de stockage [kg].

Avec $T_e = T(r_0, z_0, t)$, $0 < t < t_d$ comme condition initiale, on obtient :

$$T_{md} = \left[\frac{\int_{r_0}^{\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{t_d} [U(r, z, t) + V(r, z, t)] dr \cdot dz \cdot dt}{r_{\infty} \cdot z_l \cdot t'} \right]$$

et

$$P' = -c_{ps} \cdot T_{ms} \cdot \left[\frac{\int_{r_0}^{\infty} \int_0^{z_l} \int_0^{t_d} [U(r, z, t) + V(r, z, t)] dr \cdot dz \cdot dt}{r_{\infty} \cdot z_l \cdot t'} \right] \cdot \frac{p \cdot z_l \cdot r_{\infty}^2}{t_d}$$



Courbe (26) : Opération Stockage/déstockage

4.5.5-Le rendement d'un stockage thermique :

L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle de stockage. À la fin d'un cycle, le système de stockage retrouve son état initial. Le rendement d'un cycle correspond au rapport entre la quantité d'énergie récupérée et la quantité d'énergie que l'on a cherché initialement à stocker, soit :

$$h = \frac{|Q'|}{Q}$$

En effet, chacune des deux opérations de stockage et de déstockage induit invariablement des pertes d'énergie ou de matière : une partie de l'énergie initiale n'est pas réellement stockée et une partie de l'énergie stockée n'est pas réellement récupérée. Le rendement d'un cycle de stockage d'énergie dépend énormément de la nature du stockage et des systèmes physiques mis en oeuvre pour assurer les opérations de stockage et de déstockage.

Les résultats, pour quelques degrés d'humidité, donnés, sont représentés dans le tableau suivant :

Humidité du sol [%]	Q quantité de chaleur stockée [KJ]	Q' quantité de chaleur déstockée [KJ]	Rendement du stockage [%]
10	24.95	6.97	28
30	38.41	9.32	24
40	61.09	11.28	19

Le tableau ci-dessus indique que l'augmentation de l'humidité du sol favorise le transfert de chaleur vers le sol est augmentant ainsi la quantité de chaleur stockée, par contre on remarque que pour le déstockage de la chaleur la quantité de la chaleur récupérée par le circuit inverse diminue avec l'augmentation de l'humidité et de ce fait diminue le rendement du stockage.

Cela peut s'expliquer par le fait que pendant le déstockage le phénomène de transfert thermique se fera dans les deux directions vers le tube de déstockage et vers le sol loin du tube qui a une température toujours inférieure à la température du domaine de stockage.

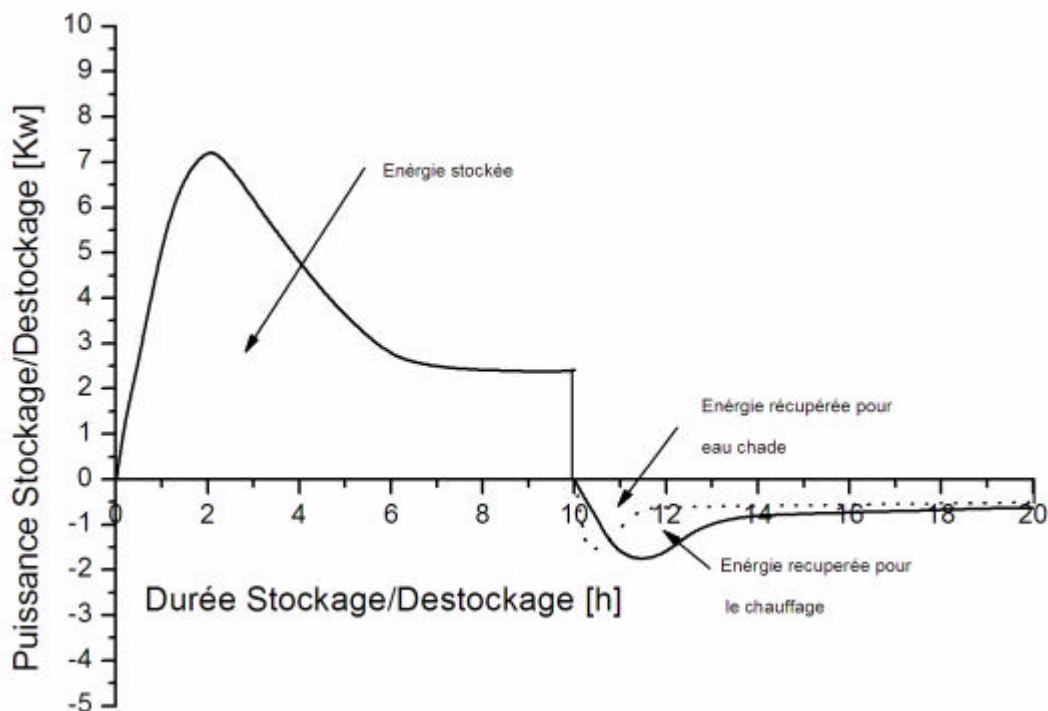
4.5.6-Comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée

Pour pouvoir faire une comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée, on fait la comparaison entre son utilisation pour le chauffage et son application pour la fourniture de l'eau chaude. On se place, pour cela, dans le cas d'une teneur en eau de 30 %, pour un débit du fluide caloporteur de 0.2l/s.

Pour la fourniture de l'eau chaude et étant donné que l'eau qui entre dans le tube pour récupérer de la chaleur est toujours $T_e = T(r_0, z_0, t) = 15^\circ\text{C}$

Par contre pour le chauffage, l'eau qui entre dans le tube circule dans un circuit fermé alors pendant le temps de déstockage $0 \leq t \leq t_d$ la température d'entrée sera donnée par $T_e = T(r_0, z_0, t)$, On obtient :

Usage	T_e °C	Q quantité de chaleur stockée [KJ]	Q' quantité de chaleur déstockée [KJ]	Rendement du stockage [%]	Durée effective
Chauffage	15	38.41	9.32	24	De 2 à 2h30mn
Eau chaude sanitaire	$T_e = T(r_0, z_0, t)$ $0 < t < t_d$	38.41	3.97	10	30mn



Courbe (27) : Comparaison entre stockage et déstockage pour le chauffage et la fourniture de l'eau chaude

4.5.7-Commentaires :

On remarque que la quantité de chaleur stockée dans le sol augmente avec l'augmentation de son humidité mais la quantité de chaleur récupérée par le système de déstockage (système inverse) n'est pas très importante et donne un faible rendement de stockage. Cela est probablement dû aux pertes de chaleur vers le sol environnant.

D'autre part on note que pour une durée de stockage de 10 heures, on a une durée de déstockage effective (chaleur récupérée et qui peut être utilisée) de seulement 2.5 heures environ (voir courbes de déstockage) et la chaleur récupérée pendant le reste du temps n'est pas très importante et de ce fait insignifiante.

Pour améliorer le rendement de stockage il faut prévoir :

- un bon isolement du domaine de stockage
- un débit de fluide caloporteur qui favorise le transfert de chaleur (courbe 24)
- l'augmentation du nombre de tubes transportant le fluide caloporteur, en les disposant verticalement et horizontalement,
- l'utilisation de tous les tubes pour le stockage
- l'utilisation des tubes au centre pour le déstockage (les tubes extérieurs joueront le rôle d'isolants thermiques) (fig.8).
- la réduction du temps de déstockage.

Enfin, la meilleure rentabilisation pour toute installation de stockage thermique souterrain journalier, semble être celle pour laquelle l'énergie récupérée est utilisée plutôt pour le chauffage que pour l'eau chaude.

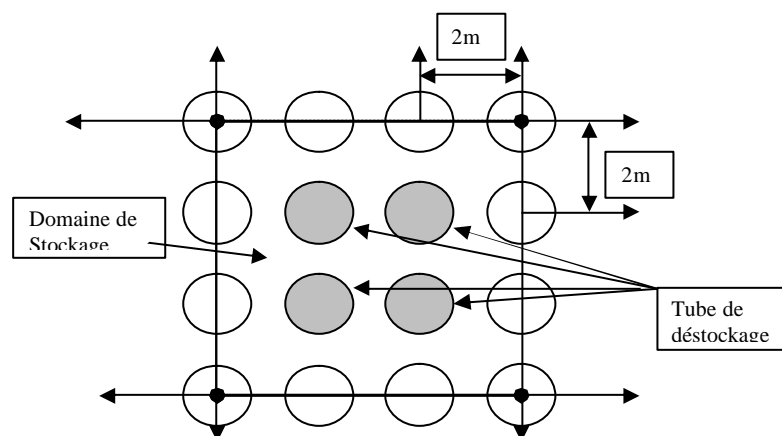


Fig. (8) : Système stockage/ déstockage à plusieurs tubes

4-5-8- Conclusion

Une validation de la méthode de séparation de fonctions pour résoudre l'équation de la chaleur a été faite par une comparaison directe avec des résultats issus de l'expérimentation pour les mêmes conditions (profondeur, humidité du sol, diffusivité thermique du sol, température d'entrée du fluide caloporteur et son débit), et son application à un cas général avec des conditions aux limites périodiques nous ont permis d'affirmer la consistance de l'approche proposée, les résultats obtenus ont été ensuite utilisés pour calculer les caractéristiques du stockage (quantité de chaleur stockée, quantité de chaleur récupérée, et le rendement du stockage), nous concluons que le stockage journalier de la chaleur dans un sol humide ne peut être rentable que si on améliore les méthodes de récupérations de l'énergie stockée.

Conclusion générale

L'objectif principal de cette recherche était l'établissement d'un modèle mathématique pour la détermination du champ de température dans un domaine de stockage de chaleur. L'équation de la chaleur est résolue dans le cas d'un domaine cylindrique avec l'hypothèse que le sol est homogène, continu et isotrope, caractérisé par les propriétés physiques fixes dans les deux directions r et z , et avec un écoulement de la chaleur purement radial. Les propriétés thermiques du sol considéré ont été obtenues expérimentalement. La chaleur est cédée au sol est due au passage de l'eau chaude dans un tube de cuivre enterré horizontalement dans le sol à une profondeur de 6 m.

Une nouvelle approche est adoptée pour trouver la solution analytique spéciale de l'équation de la conduction thermique bidimensionnelle en coordonnées cylindriques. Elle se base sur l'idée de présenter une solution comme la somme de deux fonctions, ce qui constitue l'originalité du travail.

Une première fonction décrit les conditions aux limites et initiale. Elle limite le domaine du phénomène de transfert et décrit les variations de la température aux frontières (frontières du domaine). La deuxième fonction donne la propagation de la température à l'intérieur du domaine précédent.

L'approche proposée est appliquée dans un premier temps pour obtenir la solution de l'équation de la chaleur bidimensionnelle décrivant le champ de température dans un

domaine de stockage de la chaleur pour le cas stationnaire puis pour le cas non stationnaire, avec une seconde application purement théorique, proposée dans le but de tester le modèle dans le cas de variations considérables des conditions initiales le long du tube.

La solution de l'équation de la chaleur (62) est obtenue pour le domaine de stockage avec une configuration cylindrique, en supposant que ce domaine est un milieu homogène, continu et isotrope. Il est caractérisé particulièrement par le fait qu'il possède des propriétés thermiques constantes dans les deux directions radiale et axiale avec un écoulement de chaleur purement radial. Le champ de température est déterminé au sein du domaine en question, alimenté par une source de chaleur linéaire que représente le tube horizontal enterré dans le sol. Du fait des conditions imposées, dans un domaine relativement petit, on constate que l'évolution de la température dans les deux directions r et z garde une allure continue et raisonnable, et donne une réelle compatibilité avec le modèle physique ainsi qu'avec les courbes d'expérimentation, et cela malgré les variations spatiales importantes.

Dans le même domaine décrit précédemment, la seconde application est purement théorique. Elle est proposée dans le but de tester le modèle de solution dans le cas de variations considérables dans les conditions initiales, le long du tube. Comme attendu pour ce cas, l'évolution de la température dans les deux directions r et z garde une allure continue et raisonnable (Courbes. (17-a...), Courbes (18-a....)) montrant une réelle compatibilité avec le modèle physique. D'autre part et comme on l'a montré à travers l'application de la méthode de séparation de fonctions pour un cas général, les résultats obtenus sont exacts, ce qui veut dire qu'elle peut être étendue pour la résolution de l'équation différentielle bidimensionnelle du second degré à d'autres types de configuration avec différents états de frontière ou pour résoudre l'équation non linéaire de conduction de la chaleur en faisant varier éventuellement les différentes propriétés thermiques.

La résolution analytique proposée peut ainsi contenir une quantité significative de paramètres physique et peut être employée pour vérifier des modèles numériques plus complexes de l'écoulement thermique dans les solides. De ce fait, et à la lumière des considérations théoriques faites pour un tel procédé, les perspectives d'étendre l'utilisation de cette nouvelle approche pour des cas plus complexes sont prometteuses, commençant par la solution de l'équation de conduction de la chaleur, pour s'étendre au cas des propriétés thermiques variables du sol.

Références bibliographiques :

1. Le livre vert sur l'Europe, la politique européenne de recherche et de développement, Rapport du parlement européen 2005.
2. Simon A., Lemaire J, Boissel P. & P. Maître "A joint experimental and theoretical study". Competition between agostic WCH and HWCH⁺: J. Chem. Phys., 115, 2510-2518, 2001.
3. Velardj.R., Seenraj.RV, Hafner.B., Faber, C. And Schwarzerk.K "Heat transfer enhancement in a latent heat storage system" 1999, Solar energy, Vol. 65, No 3, pp 171- 180.
4. Despois, J; Nougrède, F" 1977 «Stockage souterrains de chaleur » Revue Générale de Thermique, 184, 357-366. April 1978
5. HOUPEURT, A. (1975). Eléments de mécanique des fluides dans les milieux poreux. Editions Technip.
6. R. Alvarez, Effect of temperature on soil microbial biomass and its metabolic quotient in situ under different tillage systems , Biology and Fertility of Soils , Volume 19, Numbers 2-3 / February, 1995 pages 227-230
7. Aston, D "Soil temperature data 1958-1972" , Environment Canada, Atmospheric Environment Service, CLI-2-73, 1973.
8. De Vries, D. A., and N. H. Afgan., Heat transfer in soils, in Heat and Mass Transfer in the Biosphere, I. Transfer processes in plant environment (Wiley, New York, 1975) pp. 1-28
9. Gold, L.W "Influence of surface conditions on ground temperatures" , Can. J. Earth Sci., Vol. 4, p. 199-208, Apr. 1967
10. G. P. Williams et L. W. Gold «Les températures du sol », Digest de la Construction au Canada, 180F, pp. 5, February, 1977
11. Ladislaus Rybach & Burkhard Sanner "Ground-Source heat pump systems, THE EUROPEAN EXPERIENCE" GHC BULLETIN, March 2000.
12. A. Busso, A. Georgiev, P. Roth, "Underground Thermal energy storage –first thermal response test in south America". worrld Climate & Energy Event, 1-5 December 2003, Rio de Janeiro, Brazil.

13. DL Slegel and LR Davis, "Transient heat and mass transfer in soils in the vicinity of heated porous pipe" 1977, ASME J. Heat Transfer, 99, 541—546.
14. Gilpin, R.R., and B.K.Wong. 1975. "The ground temperature regime and its relationship to soil properties and ground surface cover." ASME paper 75-WA/HT-9
15. Michael P. Deru et Allan T. Kirkpatrick, "Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings Part 1—Analysis and Modeling" Journal of Solar Energy Engineering -- February 2002 Volume 124, Issue 1, pp. 10-16.
16. Krarti, M. and Claridge, D., "Two Dimensional Heat Transfer from Earth-Sheltered Buildings", ASME Journal of Solar Energy Engineering, Volume 112, pp. 43-50, 1990
17. L L Boyer, "Earth Sheltered Structures" Annual Review of Energy, November 1982, Vol. 7, Pages 201-219
18. Bligh, T.P., and Knoth, B.H "A thermal study of earth sheltered residence", , U.S., DOE Solar Passive Division Report, DOE/DE-AC03-80SF11508, pp. 1-395, December 1982.
19. Kasakura, T. and M. Hasatani, R&D needs –"drying of sludges. Drying" Technology, 1996. 14(6): p. 1389-1401.
20. TARNAWSKI, V.R., LEONG, W.H., WAGNER, B., REUSS, M. & SCHULZ, H. (1990),"Heat and Moisture Interactions in High Temperature Ground Heat Storage", Z. Angew. Geowiss. H. 9, pp. 131-151, Giessen
21. M.SOZEN and K. VAFAI, Analysis of the non-thermal equilibrium condensing flow of a gas through a packed bed M.SOZEN and K. VAFAI Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 33, No. 6, pp. 1247-1261, 1990.
22. Bensabat, J., C. Doughty, E. Korin, A. Nir, and C.-F. Tsang, "Validation experiments of seasonal thermal energy storage models in unsaturated soils", presented at Jigastock 88, Journees internationales sur le stockage de l'energie thermique et la geothermie appliquee, Versailles, France, October 17-20, 1988.

23. Hadron J.-C & Raybach L, Commission fédérale de géothermie et du stockage souterrain de chaleur ,de 1975 à 1995 Rapport final. Office Fédéral de l'énergie Berne.
24. Mostafa A. Karam, "A Thermal Wave Approach for Heat Transfer in a Non uniform Soil" Soil Science Society of America Journal 64:1219-1225
25. R.A. Feddes, "Some physical aspects of heat transfer in soil "1973, ISHS Acta Horticulturae 27, ISSN 0567-7572 vol 1 pages 39.
26. J.P. DUMAS, "Le stockage du froid par chaleur latente " Techniques de l'Ingénieur Tome Génie Energétique (2002) BE 9 7751-22.
27. Y. Nassar , A. ElNoaman, A. Abutaima, S. Yousif and A. Salem, "Evaluation of the underground soil thermal storage properties in Libya" Renewable Energy Volume 31, Issue 5 , April 2006, Pages 593-598
28. C.-H. Lai, C. S. Ierotheou, C. J. Palansuriya and K. A. Pericleous, "Performance Evaluation of a Distributed Algorithm for an Inverse Heat Conduction problem" The Computer Journal 2001 44(3):214-220; doi:10.1093/comjnl/44.3.214.
29. V Mityushev. "Steady heat conduction of a material with an array of cylindrical holes in the non linear case" IMA Journal of Applied Mathematics 1998 61(1):91-102; doi:10.1093/imamat/61.1.91
30. L. E. Payne and J. C. Song "On a proposed model for heat conduction "Journal of Applied Mathematics Advance Access published online on January 31, 2006 ,
31. Bangti Jin , Yao Zheng , Liviu Marin "The method of fundamental solutions for inverse boundary value problems associated with the steady-state heat conduction in anisotropic media", International Journal for Numerical Methods in Engineering Volume 65, Issue 11 , Pages 1865 – 1891 Published Online: 26 Oct 2005.
32. Yiorgos-Sokratis Smyrlis Andreas Karageorghis , "The Method of Fundamental Solutions for Stationary Heat Conduction Problems in rotationally Symmetric Domains", SIAM Journal on Scientific Computing archive Volume 27 , Issue 4 2006 , Pages: 1493 - 1512 Year of Publication: 2006 ISSN:1064-8275

33. Piotr Duda , Jan Taler, “ Numerical method for the solution of non-linear two-dimensional inverse heat conduction problem using unstructured meshes”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, Volume 48, Issue 6 , Pages 881 – 899.
34. G. Karami , M. R. Hematiyan,” A boundary element method of inverse non-linear heat conduction analysis with point and line heat sources” 2000, *Communications in Numerical Methods in Engineering*, Volume 16, Issue 3 , Pages 191 – 203 ,
35. Kevin O'Neill, “Boundary integral equation solution of moving boundary phase change problems” , *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, Volume 19, Issue 12 , Pages 1825 – 1850, 1983.
36. M. Piechowski ,” Heat and mass transfer model of a Ground Heat Exchanger: theoretical development”, *International Journal of Energy Research* , 1999, Volume 23, Issue 7 , Pages 571 – 588
37. H. R. Busby, D. M. Trujillo, “Numerical solution to a two-dimensional inverse heat conduction problem” Trujillo *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, Volume 21, Issue 2 , 1983 Pages 349 – 359 .
38. H.-J. Reinhardt, “ A numerical method for the solution of two-dimensional inverse heat conduction problems” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005 , Volume 32, Issue 2 , 1990 Pages 363 – 383 .
39. S. Ali Pourhashemi , Oliver J. Hao , Ramesh C. Chawla ”An experimental and theoretical study of the nonlinear heat conduction in dry porous media “ *International Journal of Energy Research*,1999, Volume 23, Issue 5 , 1998 Pages 389 – 401.
40. Hywel Rhys Thomas , Chi Leung Welkin Li, “Modelling heat and moisture transfer in unsaturated soil using a finite difference self-implicit method on parallel computer” , 1998, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* Volume 21, Issue 6 , Pages 409 – 419 .
41. Hydrus, H. Saito, J. Simunek, B. R. Scanlon, and R. C. Reedy “Numerical Analysis of Coupled Water, Vapor and Heat Transport in the Vadose Zone Using AGU” Fall Meeting, San Francisco, California, December 5–9, 2005

42. Moncef Krarti, Pirawas Chuangchid, and Pyeongchan Ihm “Analysis of Heat and Moisture Transfer Beneath Freezer Foundations”-Part II, Journal of Solar Energy engineering, May 2004 -- Volume 126, Issue 2, pp. 726-731
43. Souad Amjad, Abdelhalim Abdelbaki and Zaki Zrikem “Transfer functions method and sub-structuration technique for two-dimensional heat conduction problems in high thermal mass systems Application to ground coupling problems” Energy and Buildings, 2003 Volume 35, issue 6 , Pages 593-604
44. . Carslaw HS, Jaeger JC. “Conduction of heat in solids”. Clarendon Press, Oxford, U.K.1946.
45. Glen E.M., , “Analytical methods in conduction heat transfer,” 1998, AMCHT Publications
46. Miller w. “Symmetry and separation of variables” (Reading, MA: Addison-wasley). 1977.
47. dolye PW and Vassiliou PJ .Int. J. Nonlinear Mech. 1998:33-315.
48. M. S. Ingber, “An efficient boundary element method for a class of parabolic differential equations using discretization in time” 2005 Numerical Methods for P D E, Volume 3, Issue 3 , Pages 187 - 197
49. Chang Y, Kang CS, Chen DJ,”The use of fundamental Green’s functions for the solution of problems of heat conduction in anisotropic media” 1973. Int J Heat Mass Transf ;vol 16:pages 1905-1918
50. Shaw R. “An integral equation approach to diffusion”. Int J Heat Mass transf 1974;17:693- 9.
51. Cunan DAS, Cross M, Lewis BA., “A preliminary analysis of boundary element methods applied to parabolic partial differential equations” 1980, Computational Mechanics Publications, p. 179-90.
52. Wrobel LC, Brebbia CA. “The boundary element method for steadystate and transient heat conduction”. In: Lewis RW, Morgan K, editors. Numerical methods in thermal problems. Swansea: Pineridge Press, 1979. p. 58-73.

53. Lesnic D, Elliott L, Ingham DB. "Treatment of singularities in time-dependent problems using boundary element method." *Engng Anal Boundary Elem* 1995;16:65-70.
54. Coda HB, Venturini WS. "Further improvements on 3-D treatment BEM elastodynamic analysis" *Engng Anal Boundary Elem* 1996;17: 231-43.
55. Divo E, Kassab A. "A generalized BEM for steady and transient heat conduction in media with spatially varying thermal conductivity". In: Goldberg M, editor. *Boundary integral methods: numerical and mathematical aspects*. Southampton, Boston: Computational Mechanics Publications, 1999. p. 37-76.
56. Rizzo F, Shippy DJA. "Method of solution for certain problems of transient heat conduction". *AIAA J* 1970;8:2004-9.
57. Liggett JA, Liu PLF. "Unsteady flow in confined aquifers": boundary integral methods. *Water Resour Res.* 1979;15:861-6.
58. Boulard T., Razafinjohany E. and Baille A. "Heat and water vapour transfer in agricultural greenhouse with an underground heat storage system," part 1 and 2. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1989: 45: 175-194
59. Hollmuller P and Lachal B. "Buried pipe systems with sensible and latent heat exchange: validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring". Published in 9th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2005. p. 411-418.
60. Dayan A and Merbaum AH. "Temperature distributions around buried pipe networks in soil with a temperature dependent thermal conductivity". *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1984;27:3: 409-417.
61. H. R. Thomas "A nonlinear analysis of two-dimensional heat and moisture transfer in partly saturated soil", 2005 *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* Volume 12, Issue 1 , Pages 31 – 44
62. Z. Q. Chen, M. H. Shi, W. P. Yu," Investigation of heat and moisture migration in unsaturated soil under natural boundary conditions," *Heat Transfer - Asian Research* , 1999 Volume 28, Issue 1, , Pages: 3-17

63. H. R. Thomas, S. W. Rees, N. J. Sloper ,”Three-dimensional heat, moisture and air transfer in unsaturated soils”, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics Volume 22, Issue 2, Date: February 1998, Pages: 75-95
64. A.W. Fan, W. Liu, “Simulation of the daily change of soil temperature under different conditions” Heat Transfer - Asian Research , 2003Volume 32, Issue 6, Pages: 533-544
65. Gopal B. Reddy , “Analysis of heat transfer characteristics of an unsaturated soil bed: a simplified numerical method” International Journal of Energy Research, 2001, Volume 25, Issue 15, Pages: 1333-1344
66. M. Piechowski, “Heat and mass transfer model of a Ground Heat Exchanger: theoretical development” ,International Journal of Energy Research ,1999,Volume 23, Issue 7, , Pages: 571-588.
67. S. Ali Pourhashemi, Oliver J. Hao, Ramesh C. Chawla , “An experimental and theoretical study of the nonlinear heat conduction in dry porous media, International Journal of Energy Research, 1999 Volume 23, Issue 5, Pages: 389-401
68. Barry J. Dempsey “A mathematical model for predicting coupled heat and water movement in unsaturated soil”,International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics , 1978, Volume 2, Issue 1, Pages: 19-34
69. Hüseyin Öztürk,”Comparison of energy and exergy efficiencies of an underground solar thermal storage system”, International Journal of Energy Research ,2004 Volume 28, Issue 4, Pages: 341-353
70. Benny Bøhm, “On transient heat losses from buried district heating pipes” International Journal of Energy Research,2000, Volume 24, Issue 15,p 1311-1334
71. M. Piechowski, “Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: validation and sensitivity analysis” International Journal of Energy Research,1998 Volume 22, Issue 11, Pages: 965-979
72. Z. Q. Chen, M. H. Shi, W. P. Yu,” Investigation of heat and moisture migration in unsaturated soil under natural boundary conditions” Heat Transfer - Asian Research, 1999 ,Volume 28, Issue 1, Date: 1999, Pages: 3-17

73. Recep Yumrutaş, Mehmet Kunduz, Teoman Ayhan,” Investigation of thermal performance of a ground coupled heat pump system with a cylindrical energy storage tank”, *International Journal of Energy Research* 2003, Volume 27, Issue 11, 1051-1066.
74. Makoto Tago, Koji Morita, Masahiro Sugawara, Tadashi Fujita,” Heat extraction characteristics by coaxial heat exchanger” *Heat Transfer - Asian Research* 2005, Volume 34, Issue 7, Pages: 496-513
75. L.L.Vasiliev, “Heat pipes for ground heating and cooling” *Heat Recovery Systems and CHP* 1988 , Volume 8, Issue 2, Pages 125-139
76. M. Balghouthi , S. Kooli, A. Farhat, H. Daghari and A. Belghith ‘Experimental investigation of thermal and moisture behaviours of wet and dry soils with buried capillary heating system”, *J. Solar energy* Volume 79, Issue 6 2005, Pages 669-681
77. R. E. S. Moya, A. T. Prata and J. A. B. Cunha Neto, ‘Experimental analysis of unsteady heat and moisture transfer around a heated cylinder buried into a porous medium”, *International Journal of Heat and Mass Transfer* , 1999, Volume 42, Issue 12 , Pages 2187-2198
78. Hendrick J. H., Havens J. A., 1973. Heat transfer models for subsurface, water pipe, soil warming system. *J. Environ. Qual.*, 2 (2), 188-196
79. Thierry BOULARD, 1984, Modèle analytique de chauffage du sol par tuyaux enterrés. Vérification expérimentale et complément théorique, *Agronomie* 4(10),945-955
80. Person J. P., 1981. Caractérisation des propriétés thermohydrauliques d’un sol non saturé. Application au transfert ou au stockage d’énergie par systèmes enterrés. Thèse Dr-Ing., Univ. Sci. Médic. Inst. Nat. Polytechn., Grenoble, 155 p.
81. CLAESSION, J., A. DUNAND, ‘Heat extraction from the ground by horizontal pipes: a mathematical analysis’, Stockholm, Swedish Council for Building Research, 1983.
82. Alpert M. E., & al ,1976. Soil temperature and heat loss for a hot water pipe network buried in irrigated soil. *J. Environ. Qual.*, 5 (4), 111-119.
83. Baille A., Boulard T., 1980. Quelques résultats concernant l’utilisation des rejets thermiques des centrales pour le chauffage du sol par tuyaux enterrés. *X elV*

Journées de l'Hydraulique. Soc. Hydrotechn. Fr., Paris, 16-18 septembre 1980,
Quest. V, 111-117.

84. Boersma L& al., 1974. A systems analysis of the economic utilisation of warm water discharge from power generation stations. Bull. n 48, Eng. Exp. Stn. Oreg. State Univ. Corvallis, 248 p.
85. KOSCHENZ, M., B. LEHMANN., ' Thermoaktive Bauteilsysteme tab's, Dübendorf, EMPA 2000.
86. SAWHNEY, R.L. and U. Mahajan, "Heating and cooling potential of an underground air-pipe system", International Journal of Energy Research, 1994, vol. 18, pp. 509-524.
87. J.P. Demailly ; "*Analyse numérique et équations différentielles*" ; éditions Mc Graw-Hill, 2^{ème} édition, 1978
88. M. Sibony & J. Cl. Mardon ; "*Analyse numérique I : Systèmes linéaires et non linéaires*"; éditions Herman, 1982.
89. Charlie Harper, "Analytic Methods in Physics" 1999 WILEY-VCH Verlag Berlin GmbH, Berlin ISBN: 3-527-40216-0
90. *Mathematica* 5.2, logiciel de calcul.
91. A Musy, M Soutter « Physique du sol » Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR)
92. Benchatti, A., 1995, "Stockage de l'énergie solaire dans le sol," Mémoire de Magister, USTHB, Alger, Alegria.
93. J. Beck, K. Cole, A. Haji-Sheikh, and B. Litkouhi, "Heat Conduction Using Green's Function" published by Hemisphere, 1992 Last modified 10 November 2006

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	3
LISTE DES SYMBOLES	4
LISTE DES FIGURES	5
COURBES ET GRAPHES	5
ABSTRACT	7
INTRODUCTION GENERALE	8
CHAPITRE 1	10
STOCKAGE THERMIQUE	10
1.1- Energie et développement durable	11
1.2- Energies renouvelables	11
1.3- Évolution et limites et de l'utilisation de l'énergie renouvelable	13
1.4- Le stockage de l'énergie renouvelable.	14
1.5- Types de stockage de l'énergie :	14
1.5.1- Le stockage hydraulique.	15
1.5.2- Systèmes de stockage chimique	15
1.5.3- Le stockage par voie photochimique.	15
1.5.4- Stockage sous forme d'énergie cinétique	16
1.6- Energie solaire	17
1.7- Installations solaires	19
1.7.1- Les installations pour la préparation d'eau chaude sanitaire	19
1.7.2- Les installations pour des applications plus étendues	20
1.8- Limites de l'énergie solaire.	21
1.9- Stockage de l'énergie solaire (thermique).	21
1.10- Systèmes de stockage thermique	22
1.11- les caractéristiques d'un système de stockage thermique.	23
1.12- Le stockage thermique dans le sol (souterrain).	24
1.13- Le milieu souterrain	26
1.14- Zone saturée et zone non saturée dans les milieux souterrains	27

1.15-Characteristiques thermique du sol	28
1.15.1- Capacité calorifique	29
1.15.2- Conductivité thermique	29
1.16-Température du sol	30
1.17- Profil de température du sol	31
1.18- Humidité du sol	32
1.18.1- Caractéristiques de la phase liquide du sol	32
1.18.2- Influence de la teneur en eau sur les caractéristiques thermiques du sol	32
1.19-Transfert de chaleur dans le sol	33
1.20- Transfert de chaleur par migration	34
1.21- Influence des différents paramètres sur la température du sol	34
1.22- Propriétés du sol et variations de température de la surface	35
1.23- Calcul et variation de la température du sol	36
1.24- Comportement général des températures du sol	37
1.25- Avantage du stockage thermique dans le sol	39
CHAPITRE 2	41
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	41
2.1- Recherche bibliographique	42
2.2-Analyse et Commentaires	62
2.3- Conclusions sur le transfert de chaleur et de masse dans le sol.	63
2.4- Modèles déjà utilisés.	65
2.4.1- Système à circuit fermé Vertical	65
2.4.2- Système à circuit fermé horizontal	66
2.4.3- Conception des boucles des systèmes des circuits fermés	68
2.5- Conclusion	69
CHAPITRE 3	70
APPROCHE ANALYTIQUE	70
3.1- Introduction	71
3.2-Discretisation du problème thermique	72
3.3- Systèmes thermiques	73
3.4- Régimes thermiques	74
3.5- Loi de Fourier	74

3.6- L'équation de la chaleur, l'équation du bilan	75
3.7- Les équations aux frontières d'un milieu	76
3.8- Cas de plusieurs milieux isotropes en contact	77
3.9- Analyse thermique	78
3.10- Expressions mathématiques de l'équation de la chaleur	79
3.11- Système en coordonnées Cylindriques :	81
3.12- Les régimes permanents	82
3.13- Mise en équation d'un problème multidimensionnel	83
3.14- Méthode de Séparation de variables	84
3.15- Champ de température à coordonnées cylindriques $T(r, J)$	87
3.16- Champ de température à coordonnées cylindriques $T(r, q, z)$	89
3.17- Modèle physique considéré	89
3.18- Cas stationnaire	91
3.19- Méthode de résolution par la séparation des fonctions	92
3.19.1- Expression de la fonction $V(r, z)$	93
3.19.2- Expression de la fonction $U(r, z)$	94
3.19.3- Fonctions de Bessel	95
3.19.4- Résultats et discussions	99
3.20- Cas non stationnaire	106
3.21- Conditions aux limites	107
3.22- Formulation de la solution analytique	108
3.22.1- Détermination de la fonction $V(r, z, t)$	108
3.22.2- Détermination de la fonction $U(r, z, t)$	109
3.22.3- Evolution de la température en 3D et en 2D au cours du temps	112
3-22-4. Commentaires	120
3.23 Analyse et discussions	120
CHAPITRE 4	122
VALIDATION ET APPLICATION DE LA METHODE ANALYTIQUE	122
4.1-Application de la méthode de séparation de fonctions : Cas général	123
4.1.1- Variation de la température autour du tube	124
4.1.3- Résultats et commentaires	129
4.2- Comparaison théorie expérience	130
4.2.1- Résultats expérimentaux	130
4.2.2- Variation de la température autour du tube, comparaison « théorie- expérience »	132
4.2.3- Variation de la température le long du tube. Comparaison « théorie-expérience »	135

4.2.4-Discussion des résultats	137
4.4-Détermination des dimensions du domaine de stockage.	138
4.5-Caractéristiques du stockage	139
4.5.1-Coefficient global de transfert de chaleur	139
4.5.2-La puissance de stockage :	142
4.5.3-La quantité de chaleur stockée :	144
4.5.4-La quantité de chaleur déstockée :	145
4.5.5-Le rendement d'un stockage thermique :	147
4.5.6-Comparaison entre les différents usages de l'énergie récupérée	148
4.5.7-Commentaires :	149
CONCLUSION GENERALE	150
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	152