

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDELHAMID IBN BADIS - MOSTAGANEM

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL ET ARCHITECTURE



N° D'ODRE : D...../2022

## THÈSE

Présentée pour obtenir

**LE DIPLÔME DE DOCTORAT EN LMD**

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique et Environnement

Par

**BOURAOUI Wissem**

### **MODELISATION DU PHENOMENE DE TRANSFERT THERMIQUE DANS LE SOL**

Soutenu publiquement le 22/02/2022, devant le jury composé de :

Mr MISSOUM Hanifi	Professeur	Président	Université de Mostaganem
Mme BOUROKBA Souad Amel	MC-A	Membre	UST- Oran
Mme BOUSMAHA Mohammed	MC-A	Membre	UST- Oran
Mme LAREDJ Nadia	Professeur	Encadreur	Université de Mostaganem
Mr. MALIKI Mustapha	MC-A	Co-Encadreur	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2021-2022

## **Remerciements**

*Même si cette thèse est un travail personnel, je souhaite ici rendre hommage et exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et à son aboutissement.*

*Mes remerciements s'adressent tout d'abord à ma directrice de thèse, le Professeur LAREDJ Nadia pour son soutien constant, sa confiance et ses conseils précieux et avisés à la hauteur de ses compétences et de ses réelles qualités humaines.*

*J'exprime ma profonde gratitude à mon Co-encadreur, Mr MALIKI Mustapha MC-A à l'université de Mostaganem, pour m'avoir initiée à cette discipline depuis la préparation de mon master et le remercie infiniment de son soutien amical et bienveillant, de sa serviabilité, sa patience ainsi que de la générosité scientifique dont il a fait preuve à mon égard durant ces longues années.*

*Je remercie le Professeur MISSOUM Hanifi (de l'UMAB), le Docteur BOUROKBA Souad Amel (de l'USTO) et le docteur BOUSMAHA Mohammed (de l'USTO) d'avoir accepté de juger mon humble travail.*

*Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance à Mme BELAS Nadia, Professeur à l'université de Mostaganem, de m'avoir orientée et soutenue tout au long de mon parcours.*

*Par ailleurs, je remercie sincèrement mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, toujours à se surpasser pour me faciliter la vie au maximum afin que je puisse me consacrer à la réalisation de ce rêve. Plus particulièrement ma mère de m'avoir transmis l'amour de l'enseignement, d'avoir participé activement au développement de l'outil mathématique autour duquel s'articule cette thèse.*

*Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance à ma sœur Rym, qui malgré son travail prenant et ses lourdes responsabilités, s'est toujours montrée disponible et a beaucoup participé dans la rédaction de ce manuscrit. Je la remercie aussi pour sa grande aide se rapportant aux efforts de traduction vers l'anglais et surtout pour son soutien moral infaillible et persévérant.*

*Je tiens, tout particulièrement, à témoigner une vive reconnaissance à mon époux, Abdenour, pour son soutien et ses encouragements sincères depuis le début de cette aventure. Je le remercie d'essayer toujours de s'occuper de tout ce qui pourrait me distraire de mes objectifs et le remercie aussi pour sa compréhension et pour l'intérêt qu'il porte à mes ambitions professionnelles.*

*Je voudrais aussi remercier mon ami LOUHIBI Mohamed Reda, architecte à son compte, d'avoir mis à ma disposition le matériel informatique de son bureau qui m'a permis de mener à bien la simulation numérique et le remercie fortement aussi pour ses efforts de dessin via les différents logiciels se rapportant à sa spécialité.*

*De même, mes remerciements vont à mon ami Khaled, qui a gentiment mis à contribution ses compétences en informatique afin d'installer les outils de simulation.*

*Enfin, je renouvelle toute ma reconnaissance et ma sympathie à ceux qui m'ont accordé du temps et m'ont témoigné un soutien constant dans ce long travail de recherche, notamment mes collègues enseignants et administrateurs du département Génie Civil.*

## SOMMAIRE:

**RESUME.....I**

**ABSRTACT. .... II**

**ملخص..... III**

### **CHAPITRE 1: Introduction générale. .... 1**

1.1. Contexte général de la thèse..... 1

1.2. Contexte énergétique mondial..... 3

1.3. Contexte énergétique national ..... 4

1.4. Déperditions thermiques dans un bâtiment ..... 6

1.5. Objectifs de la thèse ..... 8

1.6. Structure de la thèse. .... 8

### **CHAPITRE 2 : Etat de l'art..... 10**

2.1. Introduction. .... 10

2.2. Terminologie. .... 10

2.3. Types de constructions en contact avec le sol..... 11

2.4. Bibliographie sur les travaux expérimentaux de transfert de chaleur dans les sols ..... 13

2.5. Solution analytique..... 16

2.6. Modèles combinés (analytique – numérique). .... 17

2.7. Modèles numériques. .... 20

2.8. Propriétés thermiques du sol ..... 22

2.9.	Estimation de la conductivité thermique du sol. ....	23
2.10.	Effet de la couverture du sol. ....	27
2.11.	Variation spatiale.....	28
2.12.	Conclusion.....	29

**CHAPITRE 3 : Mécanismes du transfert de chaleur dans les sols..... 30**

3.1.	Introduction. ....	30
3.2.	Mécanismes du transfert de chaleur dans le sol. ....	30
3.2.1.	La conduction.....	31
3.2.2.	La convection.....	32
3.2.3.	Le transfert de chaleur dû au changement de phase de l'eau. ....	32
3.2.4.	Le transfert de chaleur total. ....	33
3.3.	Les propriétés thermiques des sols.....	34
3.3.1.	La capacité thermique. ....	34
3.3.2.	Conductivité thermique.....	37
3.3.3.	Modèles de prédiction de la conductivité thermique. ....	37
3.3.4.	Efficacité des modèles d'estimation de la conductivité thermique.....	46
3.3.5.	Influence de l'humidité sur la conductivité thermique. ....	49
3.4.	Modèles gouvernant le transfert de chaleur dans le sol. ....	50
3.5.	Conclusion.....	54

**CHAPITRE 4 : Elaboration d'un modèle numérique. .... 55**

4.1.	Introduction. ....	55
4.2.	Les hypothèses. ....	55
4.3.	Notions mathématiques. ....	56
4.4.	Modèles de transfert de chaleur dans le sol.....	59

4.5.	Propagation de la chaleur dans le sol : Enoncé du problème de conditions aux limites.	59
4.6.	Propagation de la chaleur dans sol considéré dans un contexte tridimensionnel.	61
4.7.	Résolution du premier problème aux limites pour l'équation de la chaleur par la MDF.	66
4.8.	Méthodologie de développement de l'outil.	69
4.8.1.	Transport d'air.	69
4.8.2.	Transfert de chaleur.	69
4.8.3.	Equations de conditions aux limites	72
4.9.	Approches mathématique pour la conductivité thermique.	73
4.10.	Processus de modélisation avec un logiciel de simulation multi-physiques.	74
4.11.	Logigramme résumant les étapes de modélisation.	75
4.12.	Conclusion.	78
	<b>CHAPITRE 5 : Implémentation et validation du modele numérique.</b>	<b>79</b>
5.1.	Introduction.	79
5.2.	Présentation du logiciel COMSOL-Multiphysiques.	79
5.3.	Validation en contexte bidimensionnel : Expérience du Minnesota.	80
5.3.1.	Description du dispositif expérimental.	80
5.3.2.	Géométrie.	83
5.3.3.	Propriétés thermo-physiques.	83
5.3.4.	Conditions aux limites et initiales.	84
5.3.5.	Maillage	86
5.3.6.	Résultats de la simulation.	86
5.4.	Expérience de la maison test japonaise.	92
5.4.1.	Description du dispositif expérimental.	92
5.4.2.	Géométrie.	97

5.4.3.	Conditions aux limites et initiales.....	98
5.4.4.	Le maillage.....	99
5.4.5.	Résultats de la simulation. ....	100
5.5.	Conclusion.....	110
<b>I.</b>	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>111</b>
	<b>Références bibliographiques [155 Références] .....</b>	<b>IV</b>

## Liste des figures.

Figure 1. 1. Consommation énergétique finale mondiale par secteur en 2018.....	3
Figure 1. 2. Synthèse de la consommation énergétique finale algérienne entre 1980 et 2018... 4	4
Figure 1. 3. Taux de la consommation par secteurs d'activité par rapport à la consommation finale de chaque année de la période (1980 à 2018).....	5
Figure 1. 4. Consommation par secteur durant la période (1980 à 2018).....	6
Figure 1. 5. Chemins de déperditions d'énergie dans un bâtiment résidentiel. ....	7
Figure 2. 1. Types de constructions en contact avec le sol. ....	11
Figure 2. 2. L'expérience du Minnesota [40].....	14
Figure 2. 3. La maison japonaise [40].....	15
Figure 2. 4. Bâtiment commercial de l'université du Cardiff [40]. ....	15
Figure 2. 5. Chemins concentriques isothermes de chaleur (adapté de Latta et Boileau [65])	18
Figure 2. 6. Illustration des zones ITPE (1, 2 et 3) pour une fondation en sous-sol (adapté de Krarti et al. [67]) .....	19
Figure 2. 7. La relation entre la conductivité thermique et la porosité (adapté de [106]). .....	25
FIGURE 3. 1. DIAGRAMME SIMPLIFIE DES PRINCIPALES VOIES DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS LE SOL.....	31
FIGURE 3. 2. PRESENCE DES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR DANS UNE MATRICE POREUSE (DEDUIT DE [117]).....	33
FIGURE 3. 3. CONDUCTIVITE THERMIQUE EXPERIMENTALE COMPAREE A LA CONDUCTIVITE THERMIQUE MODELISEE [108]. ....	47
FIGURE 3. 4. CONDUCTIVITE THERMIQUE DU SOL EN FONCTION DE LA FRACTION VOLUMIQUE D'EAU [137].....	50
Figure 4. 1. Configuration de la géométrie unidimensionnelle considérée dans le sol.....	59
Figure 4. 2. Les différences correspondantes aux dérivées dans la MDF.....	67
FIGURE 4. 3. Section détaillée du maillage représentatif du sol considéré. ....	68
FIGURE 4. 4. Organigramme choix entre les différentes approches de prédiction de la conductivité thermique.....	74
FIGURE 4. 5. Logigramme global de résolution de l'outil proposé .....	76

FIGURE 4. 6. Détails de la barre ①→② : logigramme de modelisation de la conductivite thermique. ....	77
Figure 5. 1. Interface de travail sous COMSOL et organigramme de la simulation.....	80
Figure 5. 2. Vue en plan de l'unité expérimentale.....	81
Figure 5. 3. Perspective 3D de l'unité expérimentale.....	81
Figure 5. 4. Vue d'ensemble de l'expérience du Minnesota. ....	82
Figure 5. 5. Positions des sondes thermiques.....	82
Figure 5. 6. Coupe de la structure/ COMSOL.....	83
Figure 5. 7. Conditions aux limites de température extérieure et intérieure [°C]. ....	84
Figure 5. 8. Conditions initiales de l'ensemble sol-structure [°C].....	85
Figure 5. 9. Maillage de l'ensemble sol-structure.....	86
Figure 5. 10. Isothermes de température a 365 jours (fin de la simulation) [°C].....	87
Figure 5. 11. Profils des températures sur une période d'une année a 0,102m au-dessous du niveau naturel [°C]......	88
Figure 5. 12. Profils des températures sur une période d'une année a 0,661m au-dessous du niveau naturel [°C]......	89
Figure 5. 13. Profils des températures sur une période d'une année a 1,571m en-dessous du niveau naturel [°C]......	90
Figure 5. 14. Profils des flux de chaleur a travers les interfaces sol-structure.....	90
Figure 5. 15. Vue d'ensemble de l'expérience de la maison test japonaise. ....	92
Figure 5. 16. Plan d'étage de la maison d'essai. ....	93
Figure 5. 17. Positions des sondes thermiques pour la chambre D. ....	94
Figure 5. 18. Positions des sondes thermiques pour la chambre C. ....	94
Figure 5. 19. Valeurs mesurées de la température à une profondeur de 3 cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent a la chambre D]......	95
Figure 5. 20. Valeurs mesurées de la température aux profondeurs 30 cm, 40cm et 150cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent a la chambre D]. ....	95
Figure 5. 21. Valeurs mesurees de la temperature à une profondeur de 3 cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent a la chambre c]......	96
Figure 5. 22. Valeurs mesurées de la temperature aux profondeurs 30 cm, 100cm et 150cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent a la chambre C]. ....	96
Figure 5. 23. Vue de la structure modelisée / COMSOL. ....	97

Figure 5. 24. Conditions aux limites. ....	98
Figure 5. 25. Conditions aux limites au sol.....	99
Figure 5. 26. Le maillage de l'ensemble sol-structure.....	100
Figure 5. 27. Distribution de la température en 3D (le 20 septembre 1982).....	100
Figure 5. 28. Distribution de la température en 2D- le 22 septembre 1982 a 16h00 [text=35,4°C]. ....	101
Figure 5. 29. Distribution de la température en 2d- le 21 fevrier 1982 a 16h00 [text=-8,7°c]	102
Figure 5. 30. Lignes isothermes à la température maximale- le 22 septembre 1982 a 16h00 [text=35,4°C]. ....	103
Figure 5. 31. lignes isothermes a la temperature minimale- le 21 fevrier 1982 a 16h00 [text=- 8,7°C]. ....	103
Figure 5. 32. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 3 cm- [chambre D]. ....	104
Figure 5. 33. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 3 cm- [chambre C].....	105
Figure 5. 34. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 30cm- [chambreD] ....	106
Figure 5. 35. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 30cm- [chambre C]. ....	106
Figure 5. 36. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 40cm- [chambre D]. ....	107
Figure 5. 37. comparaison temperature simulée/ température mesurée à la profondeur 100cm- [chambre c]. ....	108
Figure 5. 38. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 150cm- [chambre D]. ....	109
Figure 5. 39. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 150cm- [chambre C]. ....	109

## Liste des tableaux

Tableau 3. 1. Capacité thermique spécifique et densité de matériaux sélectionnés (d'après Clark [134]).....	35
Tableau 3. 2. Valeurs typiques de porosité (d'après Hough [135]).....	36
Tableau 3. 3. Paramètres empiriques de Côté et Konrad [126].....	44
Tableau 3. 4. Validité d'utilisation des modèles selon la classe du sol et la plage de saturation. .....	48
Tableau 3. 5. Paramètres empiriques modifiés par [108].....	49
Tableau 5. 1. Propriétés thermiques des différentes couches du sol. ....	84

## Liste des symboles

$A_i$  : Amplitude.

$B$  : Profondeur de propagation de signale durant une période de 24h.

$a$  : Paramètre empirique.

$a$  : Constante de Balland et Arp.

$b$  : Paramètre empirique.

$c$  : Capacité calorifique de la substance de la barre [ $J m^{-3} K^{-1}$ ].

$c_1$  : Capacité calorifique spécifique de la phase solide du sol [ $J m^{-3} K^{-1}$ ].

$c_2$  : Capacité calorifique spécifique liquide du sol [ $J m^{-3} K^{-1}$ ].

$c_3$  : Capacité calorifique spécifique de l'air dans le sol [ $J m^{-3} K^{-1}$ ].

$c_p$  : Capacité thermique volumétrique.

$c_{p,a}$  : Chaleur spécifique de l'air sec [ $J / kg . K$ ].

$c_{p,m}$  : Chaleur spécifique sèche du matériau [ $J / kg . K$ ].

$c_l$  : La capacité thermique spécifique de l'eau du sol [ $J m^{-3} K^{-1}$ ].

$c_v$  : La capacité thermique spécifique de la vapeur du sol [ $J m^{-3} K^{-1}$ ].

$D$  : Domaine plan.

$d$  : Diffusivité thermique [ $m^2 s^{-1}$ ].

EDO : Equations à dérivées ordinaires.

EDP : Equations à dérivées partielles.

$F$  : Fonction connue.

$f(x)$  : Fonctions donnée.

$g_a$  : Flux d'air.

$i$  : Indice de temps.

$j$  : Indice de profondeur.

$k$  : Conductivité thermique [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_a$  : Perméabilité à l'air, du matériau  $a$  [ $kg / m.Pa$ ].

$k_{air}$  : Conductivité thermique de l'air [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_{cal,i}$  : Conductivités modélisées [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_{dry}$  : Conductivité thermique sèche [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$K_e$  : Nombre de Kersten.

$k_f$  : Conductivité thermique de la phase fluide [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_i$  : Conductivité thermique de la glace [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_{mes,i}$  : Conductivité thermique expérimentale [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_{om}$  : Conductivité de la matière organique [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_q$  : Conductivité thermique du quartz [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_s$  : Conductivité thermique de la phase solide [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_{sat}$  : Conductivité thermique saturée [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_w$  : Conductivité thermique des composants aqueux [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$k_0$  : Conductivité thermique des composants de la phase solide sans le quartz [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$L_0$  : Chaleur latente de vaporisation à  $T_0$ .

$l$  : Longueur de la barre.

MSE : L'erreur quadratique moyenne.

MDF : Méthode des différences finies.

$M$  : Point de la surface du corps  $\sigma$ .

$N$  : Nombre de tests.

$n$  : Porosité.

$P$  : Point.

$P_a$  : Pression de l'air sec [ $Pa$ ].

$Q$  : Flux de chaleur du sol [ $Wm^{-2}$ ].

$Q_R$  : Vitesse de génération de chaleur dans un milieu.

$q$  : Teneur en quartz en fraction des solides totaux [ $Wm^{-2}$ ].

$q_{cond}$  : Flux conductif [ $Wm^{-2}$ ].

$q_e$  : Flux de chaleur à travers la surface extérieure.

$q_i$  : Flux de chaleur à travers la surface interne.

$q_{liq.conv}$  : Flux convectif dû au transport de liquide [ $Wm^{-2}$ ].

$q_{v.conv}$  : Flux convectif dû au transport de vapeur [ $Wm^{-2}$ ].

$q_{lat}$  : Flux de chaleur dû au changement de phase de l'eau [ $Wm^{-2}$ ].

$q_h$  : Flux total [ $Wm^{-2}$ ].

$S$  : Air de la section de la barre.

$S_r$  : Degré de saturation.

$T$  : Température [ $K$ ].

$T_o$  : Température de référence [ $K$ ].

$\bar{T}(0)$  : Température moyenne à la surface du sol [ $K$ ].

$T(z)$  : Température moyenne du sol à la profondeur  $z$  [ $K$ ].

$\bar{T}(z_1)$  : Température moyenne du sol à la profondeur  $z_1$  [ $K$ ].

$\bar{T}(z_2)$  : Température moyenne du sol à la profondeur  $z_2$  [ $K$ ].

$T^{eq}$  : Température extérieure équivalente.

$T_i$  : Température de l'air ambiant intérieur.

$T_{surf,e}$  : Température de la surface extérieure.

$T_{surf,i}$  : Température de la surface intérieure.

$t$  : Temps [s].

$u$  : Fonction à quatre variables.

$\bar{v}_l$  : Vecteur de la vitesse de l'eau.

$\bar{v}_v$  : Vecteur de la vitesse de la vapeur.

$V$  : Volume limité par la surface  $S$ .

$V_{om}$  : Quantité volumétrique de matière organique dans le sol.

$V_{sand}$  : Fraction volumique du sable dans les solides du sol.

$V_{cf}$  : Fraction volumique des fragments grossiers dans les solides du sol.

$z$  : La profondeur [m].

$\alpha$  : Paramètre ajustable, déterminé sur la base des données expérimentales non gelées.

$\alpha_e$  : Le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface extérieure.

$\alpha_i$  : Le coefficient de transfert de chaleur de la surface intérieure.

$\beta$  : Paramètre ajustable, déterminé sur la base des données expérimentales non gelées.

$\Delta s$  : Surface de passage de la chaleur.

$\Delta Q$  : Quantité de chaleur passant par la surface  $\Delta s$ .

$\Delta t$  : Laps de temps de passage de la chaleur par la surface  $\Delta s$ .

$\Delta T$  : Différence de température.

$\Delta v$  : Volume élémentaire.

$\eta$  : Paramètre empirique de type de sol qui tient compte de l'effet de forme des particules.

$\theta_a$  : Fraction volumétrique de l'air dans le sol.

$\theta_i$  : Fraction volumétrique de la glace dans le sol.

$\theta_s$  : Fraction volumétrique solide du sol.

$\theta_w$  : Fraction volumétrique de l'eau dans le sol.

: Paramètre empirique qui est fonction du type de sol et de l'état gelé/dégelé.

$\mu_a$  : Viscosité dynamique de l'air [ $kg / m \cdot s$ ].

$\rho$  : La densité.

$\rho_a$  : La densité de l'air sec [ $kg / m^3$ ].

$\rho_d$  : La densité sèche.

$\rho_l$  : La densité de l'eau du sol.

$\rho_m$  : La densité sèche du matériau [ $kg / m^3$ ].

$\rho_p$  : La densité des particules du sol.

$\sigma$  : Surface du corps considéré.

$\varphi_i$  : Déphasages.

$\chi$  : Paramètre empirique de type de sol qui tient compte de l'effet de forme des particules.

$\psi$  : Fonction donnée.

$\omega$  : Vitesse angulaire de rotation de la terre [ $rad \cdot s^{-1}$ ].

$\Omega$  : Un corps donné.

$\nabla T$  : Gradient de température.

$\cos \alpha$  : Cosinus directeur du vecteur n.

$\cos \beta$  : Cosinus directeur du vecteur n.

$\cos \gamma$  : Cosinus directeur du vecteur n.

**Doctorante :** BOURAOUI Wissem.

**Spécialité :** Génie Civil.

**Option :** Géo matériaux et Environnement.

**Titre de la thèse :** « Modélisation numérique du phénomène de transfert de chaleur dans le sol »

**Etablissement :** Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem – Faculté des sciences et de la technologie – Département de Génie civil.

## **Résumé**

Cette thèse s'articule autour du développement d'un modèle numérique bidimensionnel orienté vers le transfert de chaleur dans le sol. Cet outil représente un modèle numérique qui permettra à prédire le comportement de la température dans le sol en contact avec les éléments d'infrastructure d'une construction. Le travail présenté s'appuie sur l'hypothèse que le terme de transfert de chaleur le plus dominant dans les échanges thermiques dans le sol, est la conduction. L'outil développé ne concerne donc que ce mode de transfert. Le modèle développé est basé sur les équations à dérivées partielles EDP existantes dans la discipline de la physique mathématique, les propriétés thermo-physiques utilisées pour son développement sont : la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la masse volumique. Un grand intérêt a été accordé aux diverses approches de modélisation de la conductivité thermique puisque la bonne exécution du modèle en dépend. La formulation théorique proposée qui régit le transfert de chaleur dans un contexte bidimensionnel a été résolue par le solveur commercial COMSOL Métaphysiques, basé sur la méthode des éléments finis. Le modèle développé a, au final, servi de base à la prédiction du comportement de la chaleur dans deux expériences réalistes, à travers la simulation numérique du transfert de chaleur au niveau du sol d'assise de fondation. Le but final du travail élaboré est de contribuer à la compréhension et la maîtrise du phénomène de transfert de chaleur dans le sol, afin d'apporter des solutions à même de réduire les déperditions énergétiques.

**Mots clés :** Transfert de chaleur dans le sol, efficacité thermique, conductivité thermique des sols, simulation numérique, modélisation numérique

**PhD student:** BOURAOUI Wissem.

**Specialty:** Civil Engineering.

**Option:** Geo materials and Environment..

**Title of the thesis:** " Numerical modeling of the thermal heat transfer phenomenon in the soil"

**Institution:** Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem - Faculty of Science and Technology - Department of Civil Engineering.

## **Absrtact.**

This thesis revolves around the development of a two-dimensional digital model, oriented towards heat transfer in the soil. This tool represents a simple numerical model aimed at predicting the behavior of temperature in the soil in contact with the structural elements of a building. The work presented is based on the assumption that the most dominant heat transfer term in heat exchange in soil is the conductive mode; therefore, the tool developed concerns only this mode of transfer. The model developed is based on existing PDEs in the discipline of mathematical physics, the thermo-physical properties used for its development are: heat capacity and thermal conductivity. Great interest has been given to the various thermal conductivity modeling approaches, considering that the good execution of the model depends on them. The proposed theoretical formulation that governs heat transfer in a two-dimensional context has been solved by a commercial solver, based on the finite element method. The model developed ultimately served as the basis for the prediction of heat behavior in two realistic experiments, through the numerical simulation of heat transfer at the level of the foundation bed. The final goal of the elaborated work is to contribute to the control of the phenomenon of heat transfer in the soil, in order to limit energy losses.

**Keywords:** Soil Heat Transfer, Thermal Efficiency, Soil Thermal Conductivity, Numerical Simulation, Numerical Modeling

طالبة الدكتوراه: بوراوي وسام.

التخصص : هندسة مدنية.

الخيار : الجيوتقنية والبيئة.

عنوان الأطروحة : النمذجة العددية لظاهرة نقل الحرارة في التربة

المؤسسة : جامعة عبد الحميد بن باديس بمستغانم - كلية العلوم والتكنولوجيا - قسم الهندسة المدنية

## ملخص.

تتمحور هذه الأطروحة حول تطوير نموذج رقمي ثنائي الأبعاد موجه نحو نقل الحرارة في الأرضية. تمثل هذه الأداة نموذجًا عدديًا بسيطًا يهدف إلى التنبؤ بسلوك درجة الحرارة في الأرضية عند ملامستها للعناصر الهيكلية للمبنى. يعتمد العمل المقدم على افتراض أن نمط نقل الحرارة الأكثر شيوعًا في التبادل الحراري في الأرضية هو الوضع الموصل ؛ لذلك فإن الأداة التي تم تطويرها تتعلق فقط بهذا الأسلوب من النقل. يعتمد النموذج الذي تم تطويره على معادلات المشتقات الجزئية الموجودة في تخصص الفيزياء الرياضية، والخصائص الحرارية الفيزيائية المستخدمة لتطويره هي: السعة الحرارية والتوصيل الحراري. تم إيلاء اهتمام كبير لمختلف مناهج نمذجة الموصلية الحرارية كون التنفيذ الجيد للنموذج يعتمد عليها. تم حل الصيغة النظرية المقترحة التي تحكم انتقال الحرارة في سياق ثنائي الأبعاد بواسطة محلل تجاري يعتمد على طريقة العناصر المحدودة. خدم النموذج الذي تم تطويره في النهاية، كأساس للتنبؤ بالسلوك الحراري في تجربتين واقعتين ، من خلال النمذجة العددية لانتقال الحرارة على مستوى أرضية الأساس. الهدف النهائي من العمل التفصيلي هو المساهمة في السيطرة على ظاهرة انتقال الحرارة في الأرضية ، من أجل الحد من فقد الطاقة.

**الكلمات المفتاحية:** نقل حرارة التربة، الكفاءة الحرارية، التوصيل الحراري للتربة، المحاكاة العددية، النمذجة العددية، المحاكاة

## **Chapitre 1: Introduction générale.**

### **1.1. Contexte général de la thèse**

La situation énergétique mondiale actuelle est alarmante. En effet, les besoins en énergie sans cesse croissants de la société actuelle de plus en plus consommatrice et les émissions de gaz à effet de serre en perpétuelle augmentation, font de la problématique énergétique l'un des plus grands défis du XXIème siècle. Cette problématique est accentuée par le fait que les principales sources d'énergies devant répondre à l'appétit insatiable des différents secteurs en énergies, sont non renouvelables (énergies fossiles) ou extrêmement polluantes (nucléaire).

Aujourd'hui que le secteur du bâtiment est un des secteurs les plus énergivores, il représente à lui seul environ 40 % de la consommation totale d'énergie mondiale et contribue à 30% des émissions totales mondiales de CO<sub>2</sub> [1]-[2], en raison de la consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage et le refroidissement. Aussi, l'une des principales orientations en matière de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de la consommation d'énergie primaire dans le monde consiste à accroître l'efficacité énergétique dans le secteur des bâtiments résidentiels et non résidentiels.

L'intégration de l'efficacité énergétique dès la conception des nouveaux bâtiments ainsi que la rectification des systèmes constructifs existants, deviennent donc un enjeu de taille face à la réduction de la consommation énergétique du bâtiment tout en privilégiant le confort de l'exploitant.

Les déperditions de chaleur, qui sont à la source de cette consommation énergétique démesurée, se font évidemment par différents emplacements dans une construction (murs, fenêtres, toiture, plancher bas...etc.). L'évaluation des pertes de chaleur de l'enveloppe du bâtiment par le sol, fait encore défaut à une connaissance approfondie.

Dans ce sens, il y a un intérêt majeur à étudier les phénomènes de transfert de chaleur qui s'opèrent au niveau de l'infrastructure d'une construction en contact direct avec le sol qui offre, par ailleurs, une énergie renouvelable non négligeable : l'énergie géotechnique.

Jusqu'à environ 50 % des charges de chauffage annuelles des bâtiments peuvent être attribuées au transfert de chaleur via le sol, en particulier pour les bâtiments de faible hauteur [1,2]. Malgré son importance dans la conception de bâtiments éco-énergétiques et des décennies d'avancées dans la simulation numérique de bâtiments, le calcul rapide et précis de ce transfert de chaleur dans le sol reste une tâche difficile pour la communauté de la simulation de bâtiments.

La difficulté de calculer le transfert de chaleur dans le sol est principalement due au manque d'expressions mathématiques simples pour le transfert de chaleur transitoire bidimensionnel via le sol.

Au cours des dernières décennies, diverses méthodes ont été développées pour les calculs de transfert de chaleur dans le sol [3]. Sur la base des différences dans le traitement des composants de transfert de chaleur stables et transitoires, ces méthodes peuvent être classées en quatre groupes : méthode simplifiée, approximations unidimensionnelles (1D) ; Modélisation numérique 2D et 3D et les approches globales du facteur de réponse au sol.

Des méthodes simplifiées permettent un calcul rapide de la composante de transfert de chaleur en régime permanent ou à long terme (comme le transfert de chaleur moyen mensuel et annuel) et peuvent être gérées à l'aide d'un logiciel de simulation de phénomènes multi-physiques. Ces méthodes sont dérivées ou basées sur des résultats analytiques, numériques ou empiriques.

D'autre part, la modélisation du transfert de chaleur requiert la détermination précise des propriétés thermo-physiques du sol, souvent hétérogène, et qui sont donc spatialement et temporellement variables.

Le travail présenté dans cette thèse portera donc, sur la réduction de la consommation énergétique des bâtiments, avec une attention particulière au transfert de chaleur qui se produit entre le sol de fondation et les éléments structurels enterrés.

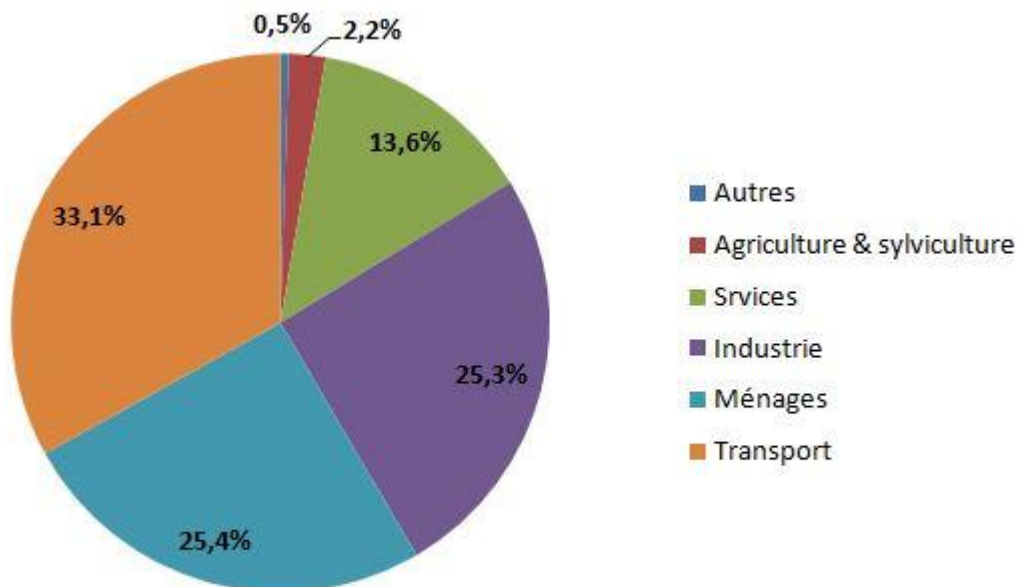
Pour se faire, une simulation numérique bidimensionnelle sera présentée avec sa méthodologie de développement. Le modèle mathématique de base de la simulation en question permettra la prédiction des valeurs de la température et celles des flux thermiques, dues au transfert de chaleur par conduction uniquement. L'efficacité de l'outil sera testée au moyen d'un logiciel commercial de simulation numérique.

## 1.2. Contexte énergétique mondial

De nos jours, le monde entier se retrouve confronté au problème énergétique qui ne cesse de souligner son importance avec la rareté des ressources naturelles et des énergies fossiles non-renouvelables.

Depuis 1970, la demande d'énergie a plus que doublé dans le monde [4]. L'EIA (\*) estime que la consommation mondiale d'énergie pourrait fortement croître dans les prochaines décennies et que la demande énergétique croîtrait de 1 % par an jusqu'en 2040 [5].

A l'échelle planétaire, le secteur du bâtiment est responsable d'environ 20 à 26% de la consommation annuelle mondiale de l'énergie et de près de 30% de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre (GES) [6]. La consommation finale mondiale en 2018 est représentée sur la figure 1.1.



**Figure 1. 1.** Consommation énergétique finale mondiale par secteur en 2018[6].

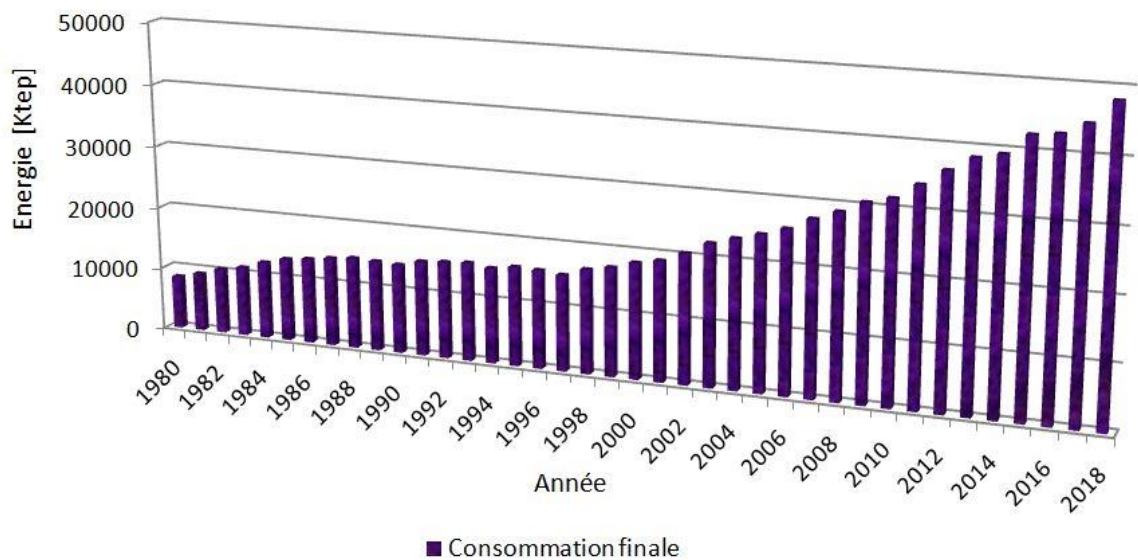
Il est clair que le domaine de la construction représente un atout majeur dans la question de la maîtrise de la demande d'énergie et de l'efficacité énergétique. En effet, grâce à la disponibilité immédiate de technologies et de techniques matures, le secteur du bâtiment peut contribuer efficacement à résoudre les défis environnementaux auxquels le monde doit faire face.

(\*) L'Agence d'information sur l'énergie (Energy Information Administration ou **EIA**), créée par le Congrès des États-Unis en 1977, est l'agence indépendante de la statistique au sein du ministère de l'énergie des États-Unis.

L'EIA affirme que la hausse mondiale en demande énergétique proviendrait essentiellement des pays en voie de développement, sous l'effet de leur croissance économique et démographique [5]. L'Algérie faisant partie de cette catégorie de pays, une synthèse de la consommation énergétique algérienne est présentée dans ce qui suit.

### 1.3. Contexte énergétique national

L'Algérie faisant partie de cette catégorie de pays, une synthèse de la consommation énergétique algérienne est présentée dans ce travail afin de souligner l'importance de s'approfondir dans le domaine de l'efficacité énergétique.



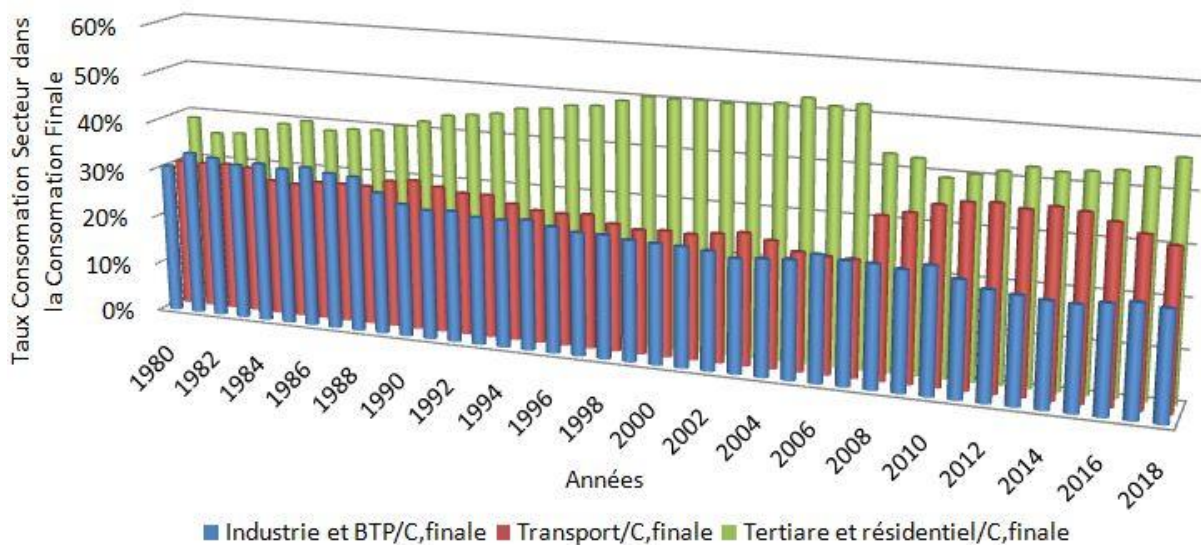
**Figure 1. 2.** Synthèse de la consommation énergétique finale algérienne entre 1980 et 2018 ([7]–[21]).

Dans cette figure, nous avons réunis les données publiées par le ministère de l'énergie algérien dans ses bilans énergétiques annuels [7]–[21] afin d'observer l'évolution de la consommation finale en Algérie entre 1980 et 2018 (soit une période de 38 ans).

Notons que la consommation finale a presque quintuplé en l'espace de même pas quatre décennies et est passée de 8,5 Mtep en 1980 à 49,4 Mtep en 2018.

La consommation finale se départage en trois principaux secteurs : le secteur de l'industrie et BTP, celui du transport et le secteur tertiaire et résidentiel.

Dans le but de comprendre les tendances de la demande énergétique en Algérie, nous avons estimé le taux de consommation d'énergie par secteur d'activité pour chaque année de cette même période (de 1980 à 2018). La figure 1.3. affiche les résultats des taux de consommation par secteurs d'activité par rapport à la consommation finale pour chaque année de la même période (de 1980 à 2018).

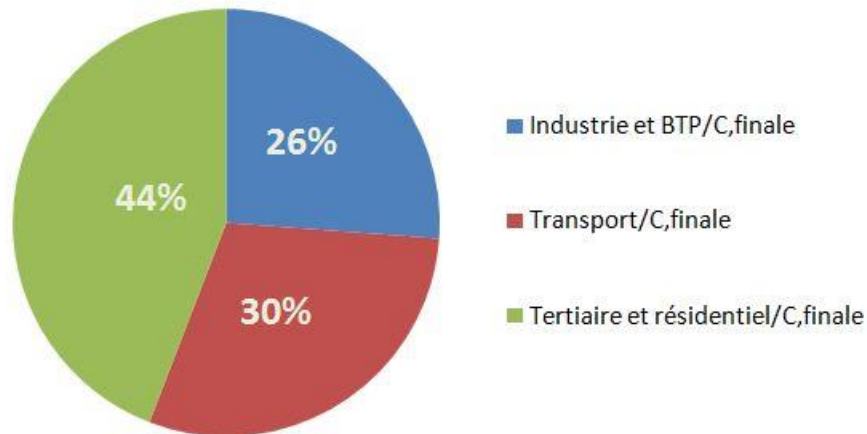


**Figure 1. 3.** Taux de la consommation par secteur d'activité par rapport à la consommation finale de chaque année de la période (1980 à 2018) ([7]–[21]).

Il est évident que c'est le secteur tertiaire et résidentiel qui a été le plus énergivore durant toute la période considérée. Il aurait donc consommé en moyenne 44% de la consommation finale de chaque année. Sa consommation n'a pas arrêté de croître hormis la baisse de 9% enregistrée en 2008 après laquelle sa demande énergétique a plus ou moins stagné jusqu'en 2014. Cette fluctuation ne l'a quand même pas déclassé de sa première place en comparant avec les deux secteurs restants.

La consommation énergétique du secteur de l'industrie et BTP et celle du secteur du transport ont pratiquement évolué d'une manière convergente jusqu'en 2008 où le secteur du transport a dépassé celui de l'industrie de 12% pour continuer à croître jusqu'en 2018. Parallèlement, le secteur de l'industrie et du BTP a continué sa chute durant les sept dernières années de l'étude en question.

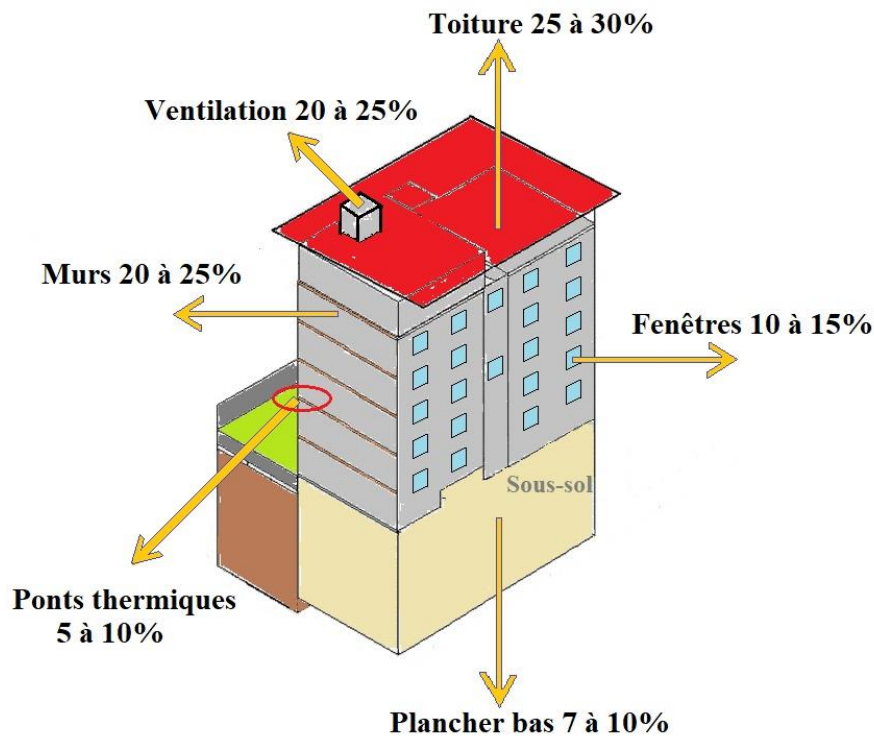
Nous retiendrons les moyennes de 27% et 29% (de la consommation finale des 38 années considérées) pour les secteurs de l'industrie, du BTP et celui du transport, respectivement (Figure 1.4).



**Figure 1. 4.** Consommation par secteur durant la période (1980 à 2018) ([7]–[21]).

#### 1.4. Déperditions thermiques dans un bâtiment

Les déperditions thermiques d'un bâtiment représentent les pertes thermiques de ce dernier. Elles sont aussi définies comme les chemins qu'emprunte la chaleur afin de s'échapper des logements en hiver ou pour y entrer en été [22].



**Figure 1. 5.** Chemins de déperditions d'énergie dans un bâtiment résidentiel.

En général, on estime que 50 à 75% des déperditions se font au niveau de l'enveloppe du bâtiment et la grande majorité est partagée entre les murs, les fenêtres et la ventilation. Les déperditions qui s'opèrent vers le bas et vers le haut (sol et toiture) représentent au maximum 10% chacune, des pertes totales. Néanmoins les pourcentages peuvent différer d'une construction à une autre.

Dans ce contexte, plusieurs études visant la réduction des pertes d'énergie à différents niveaux de la structure ont été menées. Parmi ces pertes, celles qui s'opèrent au niveau du sol en contact direct avec les éléments de construction ont fait l'objet de nombreuses recherches. Les chercheurs ont rapporté que la perte de chaleur du sol peut être responsable de près de 50% des frais de chauffage annuels d'un bâtiment [23], [24]. En effet, cette hypothèse a été confirmée par une étude récente réalisée sur des maisons australiennes, visant à quantifier les pertes thermiques au niveau de la structure en contact avec le sol. Il y a été affirmé que celles-ci peuvent contribuer à près de 49% de la demande totale d'énergie de chauffage et de refroidissement pour habitations [25].

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés aux échanges d'énergie qui ont lieu entre le sol en contact avec la structure d'une construction et la partie enterrée de la construction.

### **1.5. Objectifs de la thèse**

La présente thèse porte dans son contexte global, sur la réduction de la consommation énergétique d'un bâtiment, en s'intéressant spécialement aux déperditions thermiques qui se produisent entre le plancher bas et le sol d'assise, l'objectif principal étant de développer un outil numérique, bidimensionnel, visant à quantifier les échanges thermiques se produisant dans le sol en contact direct avec des éléments des fondations de la structure.

Toutefois, la contribution mathématique fournie accorde un intérêt majeur au transfert thermique engendré par le transfert par conduction, sans s'attarder pour autant sur le transfert de l'humidité, car les récentes recherches ont montré que l'influence de l'humidité sur le transfert de chaleur dans les sols était minime.

La conductivité thermique étant un paramètre primordial dans le transfert de chaleur dans le sol, nous avons contribué également au développement d'une approche mathématique fiable permettant un choix exact du modèle adéquat à sa prédiction pour chaque cas de sol, en prenant en compte le maximum de paramètres (conditions météorologiques, granulométrie, degré de saturation...etc.).

Le modèle développé est basé sur les équations à dérivées partielles EDP existantes dans la discipline de la physique mathématique, les propriétés thermo-physiques utilisées pour son développement sont : la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la masse volumique. Un grand intérêt a été accordé aux diverses approches de modélisation de la conductivité thermique puisque la bonne exécution du modèle en dépend.

Notre travail vise aussi à transiter d'une recherche bibliographique étendue vers un modèle mathématique bidimensionnel qui sera concrétisé par deux simulations numériques au moyen d'un logiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis.

### **1.6. Structure de la thèse.**

Cette thèse est composée de cinq chapitres :

Le premier chapitre représente un état de la situation énergétique actuelle, mondiale et locale, qui appuie la nécessité de recourir à une politique de construction énergétiquement efficace ainsi que les arguments qui ont motivé le choix de notre recherche.

Le deuxième chapitre, quant à lui, décrit un examen des méthodes et des outils de transfert de chaleur de base trouvés dans la littérature, des tentatives d'évaluation des propriétés thermiques y compris celles qui prédisent la conductivité thermique ainsi que de l'importance des hypothèses de calcul et des paramètres considérés qui influent la précision des résultats.

Aussi, nous avons tenté, dans le troisième chapitre, de synthétiser les différents concepts thermo-physiques de base se rapportant aux diverses couches du sol. Les mécanismes de transfert de chaleur à l'intérieur du sol y sont largement expliqués, de plus un intérêt majeur a été accordé aux différentes approches de modélisation de la conductivité thermique globale du sol.

Par la suite, le chapitre quatre est venu compléter, dans un premier lieu, les informations examinées dans le chapitre précédent par l'approfondissement des notions de la physique-mathématique se reliant aux équations à dérivées partielles qui gouvernent le phénomène de transfert de chaleur dans le sol. Par conséquent, la revue de ces équations (EDP) a abouti au développement de l'outil numérique autour duquel s'articule cette thèse. Ce chapitre comprend donc les détails du développement du modèle numérique bidimensionnel d'estimation des valeurs de la température.

Pour finir, deux applications, simulées numériquement, d'expériences à échelles réelles ont été réalisées dans le cinquième chapitre au moyen du logiciel COMSOL MULTIPHYSIQUES afin de tester l'efficacité du modèle développé.

La thèse se termine par une conclusion générale et une liste de références bibliographiques.

## Chapitre 2 : Etat de l'art

### 2.1. Introduction.

Il est généralement reconnu que des pertes de chaleur importantes peuvent se produire en raison du flux de chaleur de l'intérieur d'un bâtiment à travers la dalle du rez-de-chaussée et dans les sols de fondation. Le transfert de chaleur à partir des fondations des bâtiments demeure une grande incertitude dans l'estimation de la consommation d'énergie des bâtiments [26]. En effet cette discipline est difficile à maîtriser car le sol est un milieu hétérogène et il n'est pas évident de cerner ses propriétés physico-thermiques.

Le principal avantage à maîtriser ce phénomène est de profiter de la masse thermique élevée du sol pour le stockage de chaleur et / ou pour modérer les variations climatiques internes. Plusieurs études à travers le monde ont été entreprises afin de déterminer les avantages offerts. Par exemple, l'énergie solaire [27], les échangeurs de chaleur à air [28] et les bâtiments souterrains [29]–[34] ont tous reçu une grande attention.

Un grand nombre d'approches visant à analyser le transfert de chaleur au sol des bâtiments est disponible dans la littérature. Ce chapitre fournit un aperçu sur les différentes méthodes analytiques, semi-analytiques et numériques qui ont pour but de résoudre ce problème. Il s'avère que chacune de ces approches peut produire des informations utiles si elle est bien utilisée, cependant il y'a toujours un risque de résultats extrêmement loin de la réalité si elle est mal utilisée avec des hypothèses de limites simplificatrices erronées.

### 2.2. Terminologie.

Par souci de cohérence, la terminologie standard utilisée tout au long de cette thèse est définie ci-dessous. Ces définitions sont adaptées de Fritzson [35] et Judkoff et Neymark [36]:

**Système:** Un système est un objet ou une collection d'objets dont les propriétés sont étudiées. Le système considéré dans cette thèse est la construction physique de la fondation du bâtiment et du domaine semi-fini de terrain entourant la fondation.

**Modèle:** Un modèle est une représentation approximative d'un système. Le modèle est l'ensemble des valeurs de données d'entrée et de sortie pertinentes pour l'étude du système. Dans ce cas, le modèle est la description quantitative et qualitative de la fondation et du domaine du sol.

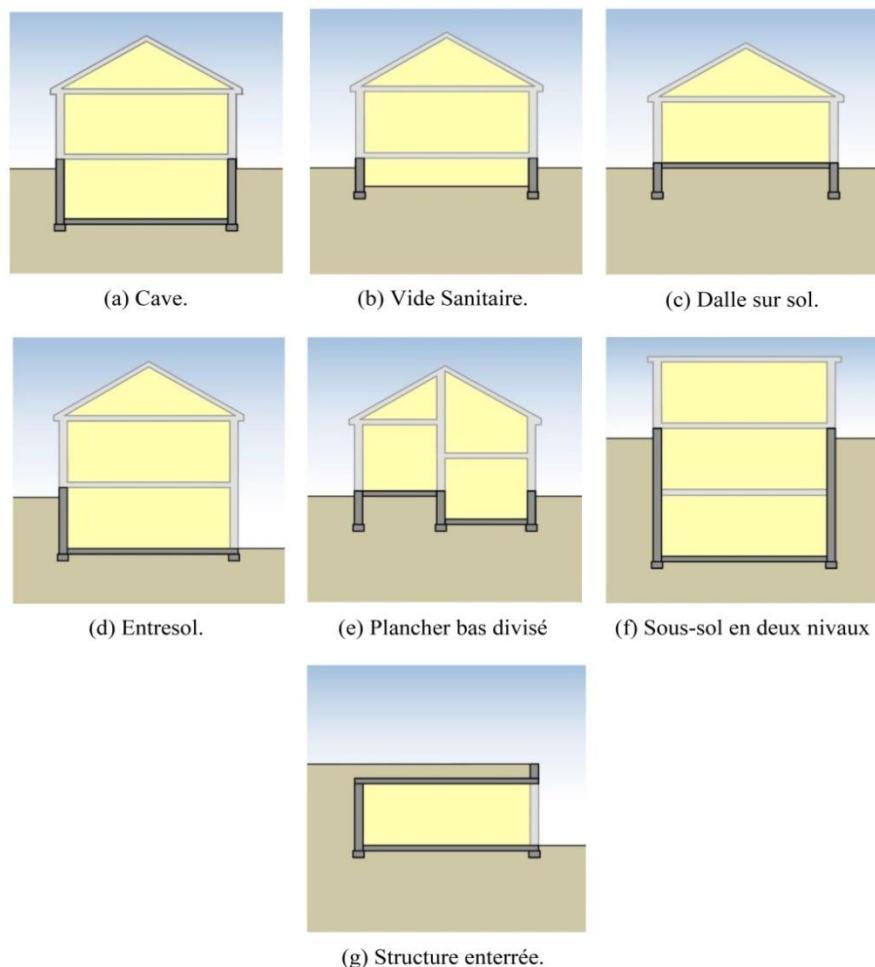
**Simulation:** La simulation est le processus consistant à appliquer des entrées contrôlées au modèle et à observer les sorties résultantes.

**Méthode de résolution:** La méthode de résolution décrit la traduction algorithmique entre l'entrée du modèle et la sortie du modèle. Pour un système de fondation et de sol, la méthode de résolution se réfère généralement à la façon dont les équations différentielles partielles de conduction-diffusion sont résolues, y compris les algorithmes qui définissent les conditions aux limites du système.

**Outil:** Une implémentation logicielle d'une méthode de solution (ou de plusieurs méthodes) capable d'effectuer des simulations sur un modèle défini.

### 2.3. Types de constructions en contact avec le sol.

La figure 2.1 montre une gamme de types de constructions, en contact avec le sol, trouvés dans tout le domaine architectural.



**Figure 2. 1.** Types de constructions en contact avec le sol.

**a) Cave.**

Une cave est un local, une pièce, un ensemble de pièces ou un étage situé au sous-sol d'une construction, donc partiellement ou totalement en dessous du niveau du sol.

**b) Vide sanitaire.**

Un vide sanitaire désigne l'espace laissé libre (vide) dans une construction, situé entre le terrain et le premier plancher du bâtiment construit.

**c) Dalle sur le sol.**

Est généralement présente dans les constructions commençant par RDC et ne possédant pas de sous sol. Elle se trouve par conséquent, au niveau 0,00 juste en dessus des fondations et a donc un contact direct avec le sol naturel.

**d) Entresol.**

On parle ici de la dalle de l'espace se trouvant entre le rez-de-chaussée et le premier étage. Dans ce cas, le mur et la dalle sont en contact direct avec le sol naturel.

**e) Plancher bas divisé.**

Comme le montre la figure 2.1 (c), c'est le cas où la dalle du rez-de-chaussée contient deux niveaux, l'un plus profond que l'autre. On dit aussi que ce niveau est semi-enterré.

**f) Sous-sol en deux niveaux.**

Ce sont deux niveaux superposés se trouvant entièrement en dessous de la surface du sol. Le nombre d'étages de sous-sol peut dépasser les deux selon la configuration du terrain.

**g) Structure enterrée.**

Est une structure, où murs et dalles sont en contact direct avec le sol naturel, laissant uniquement une issue débouchant au niveau de la surface du sol. C'est en général, des structures expérimentales à but d'études observatoires ou bien des unités de protection comme les bunkers.

#### 2.4. Bibliographie sur les travaux expérimentaux de transfert de chaleur dans les sols

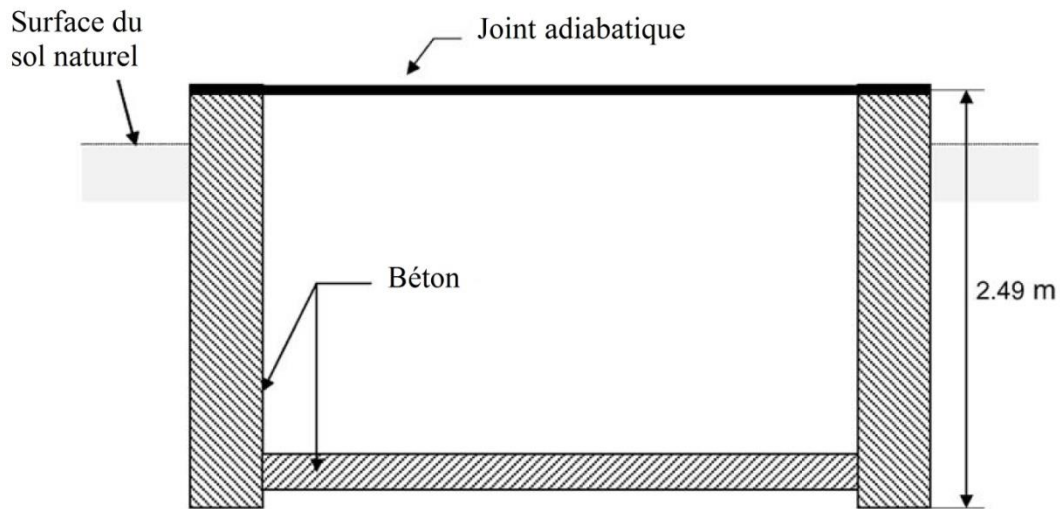
Les premiers travaux visant à comprendre le phénomène de transfert de chaleur dans le sol consistaient à réaliser des mesures sur terrain dans des sols en contact direct avec les éléments de constructions. Houghten et al [37] ont prouvé que les calculs de conduction simples utilisés dans les premiers temps surestimaient largement la perte de chaleur. Leur travail présentait des mesures de températures du sol et de flux de chaleur des murs et des sols pour une structure enterrée sur une période d'un an.

Quelques années plus tard, Bareither et al [38] ont élargi le même travail à neuf constructions sur dalle. En plus des mesures de températures et de pertes de chaleurs qu'ils ont effectuées, ils ont aussi présenté une dérivation de deux méthodes existantes, d'estimation de perte de chaleur, sur la base des facteurs de perte de chaleur. Les valeurs des facteurs issues de cette recherche ont été utilisées dans le Manuel des principes fondamentaux de l'ASHRAE(\*\*) pendant de nombreuses années jusqu'à ce qu'elles soient remplacées par des valeurs dérivées numériquement.

Une compilation de données expérimentales sur un grand bâtiment à l'abri de la terre sur le campus de l'Université du Minnesota a été présentée par Slipp [39] dans sa thèse de doctorat. Les conditions de surface du sol ont été déterminées comme étant le facteur le plus important contrôlant le transfert de chaleur entre le bâtiment et le sol. Les conditions aux limites à la surface affectent, non seulement, le flux de chaleur dans le sol mais également la teneur en humidité du sol, ce qui affecte les propriétés thermiques du sol.

---

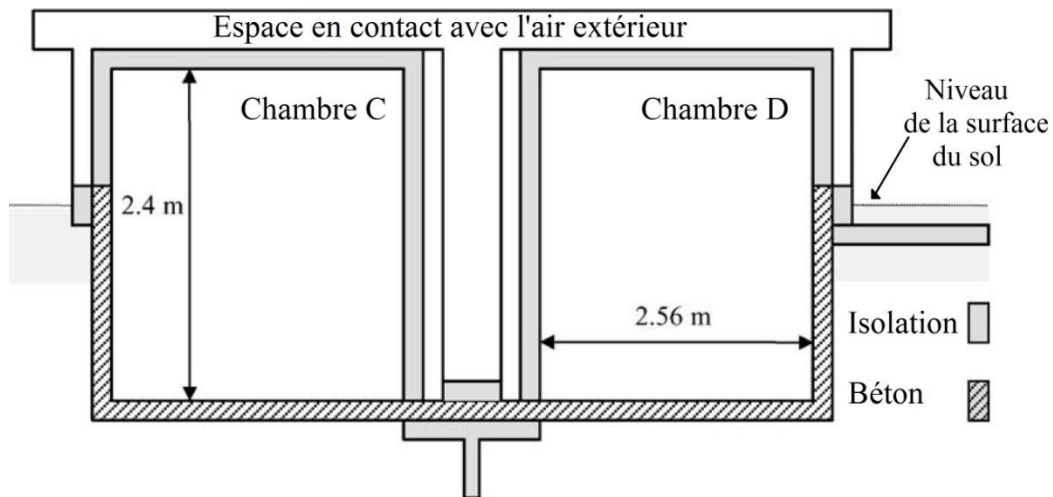
(\*\*) *L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (plus connue sous le sigle ASHRAE) est une organisation internationale technique dans le domaine des génies thermiques et climatiques (chauffage, ventilation, air climatisé, production de froid). Fondée en 1894, elle tient deux réunions chaque année.*



**Figure 2. 2.** L'expérience du Minnesota [40].

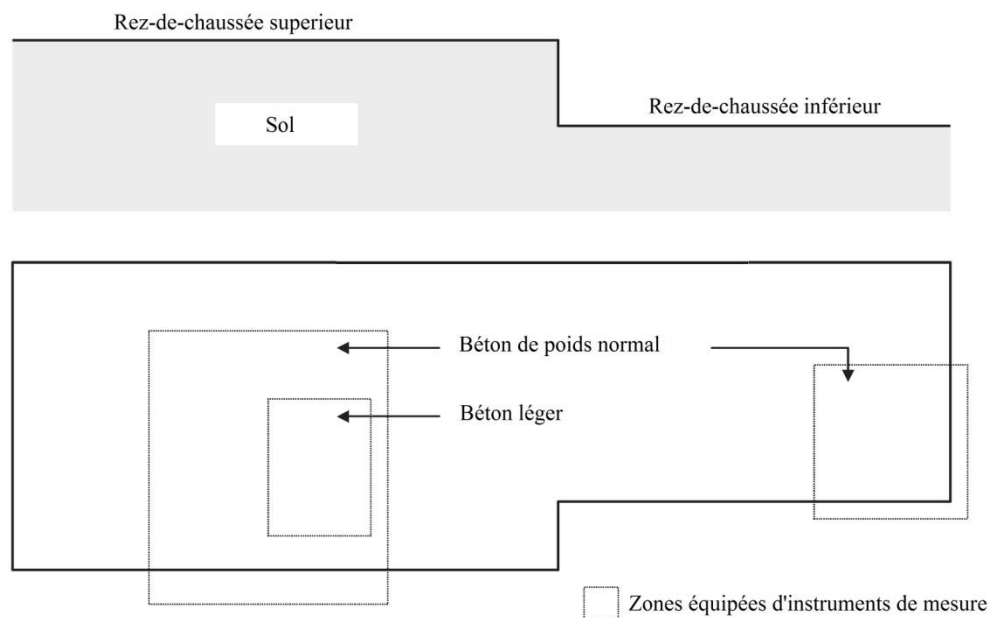
Bligh et al. [41] et Bligh et Knoth [42] ont effectué des mesures détaillées des températures du sol et de la structure, des flux de chaleur, de la consommation d'énergie et des conditions intérieures et extérieures d'une maison abritée près de Boston, au Massachusetts. Ils ont démontré que les trajets des flux de chaleur des murs enterrés changent de direction de la surface du sol en hiver et du sol profond au printemps. Ils ont également montré que les températures de la surface du sol sous l'herbe humide étaient jusqu'à 20 ° C plus froides que les températures du sol nu, ce qui montre l'importance de la couverture du sol.

Yoshino et al [43] ont achevé une étude de 5 ans sur les performances thermiques d'une maison d'essai semi-souterraine à Sendai, au Japon. La maison était divisée en côtés identiques, C et D, sauf que D comprenait également une isolation horizontale à 0,3 m sous la surface du sol autour du périmètre s'étendant à 1,35 m du bâtiment. Ils ont mesuré les températures du sol et de l'air intérieur et la consommation d'énergie de chauffage des deux côtés. Le côté avec une isolation horizontale avait des variations de température légèrement plus faibles et des charges de chauffage légèrement plus faibles. L'utilisation d'une isolation horizontale n'a été que modérément efficace dans ce cas.



**Figure 2. 3.** La maison Japonaise [40].

Thomas et Rees [44] ont terminé une étude d'un an et demi sur les flux de chaleur au sol, la température du sol et les niveaux d'humidité d'un nouveau bâtiment à la Cardiff School of Engineering. Les expériences ont montré qu'un sol en béton léger fonctionnait mieux thermiquement, avec une conductivité thermique globale de  $0,20 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$ , par rapport à  $0,26 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$  pour un sol en béton de poids normal. Les mesures ont également montré que, pour un plancher non isolé, environ 60% de la perte de chaleur du plancher d'hiver au sol se produit dans une bande de 1,5 m de large autour du périmètre du bâtiment.



**Figure 2. 4.** Bâtiment commercial de l'université du Cardiff [40].

Adjali et al. [40] ont réalisé une comparaison de simulations entièrement couplées (teneur en chaleur et en humidité) avec des simulations thermiques linéaires. Il a été constaté

que les procédures de calcul simplifiées peuvent considérablement surestimer ou sous-estimer la valeur réelle de la perte de chaleur (jusqu'à 31 % dans les exemples étudiés). Cependant, les simulations bidimensionnelles restent souvent des méthodes trop simplifiées qui ne peuvent interpréter avec précision toute la complexité des transferts de chaleur qui ont lieu entre la structure et le sol et peuvent comporter des imprécisions importantes [45], [46].

### 2.5. Solution analytique.

Le premier modèle analytique bidimensionnel de transfert de chaleur au sol à être largement reconnu a été développé par Marcey [47] qui a examiné le problème d'un plancher infiniment long avec des facteurs de correction pour les planchers rectangulaires et l'épaisseur des murs. La première méthode bien connue de solution transitoire a été développée par Lachenbruch qui a démontré l'une des premières solutions analytiques pour le transfert de chaleur « dalle sur sol » en utilisant la fonction de Green [48].

Delsante et al. [49] ont développé plus tard un modèle similaire utilisant des transformées de Fourier. Ces deux modèles, comparés par Kusuda et Bean [50] se sont avérés produire des résultats presque identiques. La principale limitation des solutions de Lachenbruch et de Delsante est qu'elles ne sont appropriées que pour les dalles rectangulaires non isolées.

La recherche de Lachenbruch [48] a ensuite été utilisée comme base d'un programme informatique visant à calculer les valeurs de perte de chaleur mensuelles et les données de température de sol [50], [51].

Des solutions de la série de Fourier à l'équation de la conduction chaleur-sol ont été développées par Muncey et Spencer [52], Shen et Ramsey [53] et Delsante et Stokes [54].

Muncey et Spencer ont étudié la forme du plancher de la dalle et ont constaté qu'il existe une relation linéaire entre : Le rapport d'un paramètre de résistance défini comme la résistance thermique de la forme de dalle sur la résistance thermique d'un carré de périmètre égal et celui d'un paramètre de surface défini comme la zone sur le périmètre divisé par seize.

Shen et Ramsey [53] ont développé un programme d'analyse thermique transitoire pour les bâtiments abrités en terre basé sur leur méthode de solution. Delsante et Stokes [54] ont pu dériver une solution de forme fermée au problème de conduction thermique bidimensionnel et une solution approximative au problème tridimensionnel. Ce modèle a ensuite été étendu pour approcher la perte de chaleur à travers les régions centrales et

périphériques des planchers isolés [55], [56], qui s'est avérée fiable comparé aux données mesurées [57].

Claesson et Hagentoft [58]-[59] ont appliqué la superposition et l'analyse dimensionnelle pour combiner des solutions numériques et analytiques du problème de la perte de chaleur des planchers sur dalle. L'équation de conduction thermique est résolue pour un problème de régime permanent, pour une température extérieure périodique et pour une étape unitaire de température extérieure. Les trois solutions sont combinées par superposition pour obtenir les solutions finales pour des problèmes spécifiques. Ils ont découvert que les effets des eaux souterraines sont faibles, sauf si le niveau de l'eau est élevé. Dans ce même axe, ils ont aussi développé dans d'autres travaux [60]–[62] un certain nombre de solutions utilisant la superposition de solutions analytiques et la cartographie conforme.

De nombreuses solutions analytiques, y compris celles utilisant des transformées de Fourier, prennent la forme d'une série infinie. La solution calculée est alors une approximation où la série est calculée jusqu'à un grand nombre  $N$ , après quoi la série est tronquée. Des valeurs plus élevées de  $N$  amélioreront la précision numérique de la solution mais nécessiteront plus de temps de calcul.

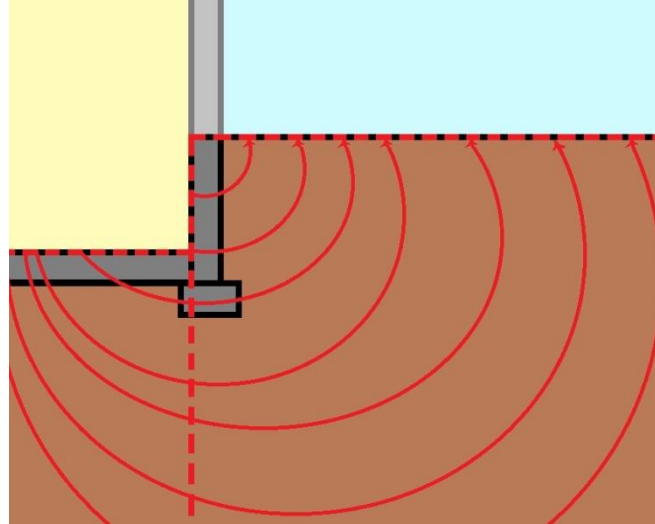
## **2.6. Modèles combinés (analytique – numérique).**

Contrairement à la méthode analytique, ce genre de modèles combinés n'est pas spécialement généralisé et fonctionne majoritairement dans des cas d'études spécifiques. Cette méthode est donc gouvernée par des paramètres caractérisant l'échantillon étudié. La plupart de ces travaux se font sur une période limitée dans le temps et font appel à l'utilisation d'hypothèses empiriques exécutées au moyen d'une simulation numérique.

Il existe de nombreuses méthodes simples pour déterminer la perte de chaleur saisonnière ou annuelle au sol des bâtiments. La plupart d'entre elles sont basées sur les résultats de quantités massives de simulations numériques. Bien qu'elles puissent fournir des recommandations fiables, les erreurs potentielles sont importantes. Toutefois, il a été constaté que les prévisions entre les modèles pouvaient varier pour plus d'un ou deux facteurs [63].

Certaines des plus anciennes méthodes de calcul du transfert de chaleur des fondations se trouvent dans le ASHRAE Handbook of Fundamentals [64]. Le manuel décrit des méthodes distinctes correspondant au type de fondation. Le flux de chaleur des murs de soubassement isolés est calculé sur la base d'une méthode développée par Latta et Boileau

[65] en 1969 où la conduction en régime permanent est approchée par une série de chemins radiaux concentriques unidimensionnels (Figure 2.5).

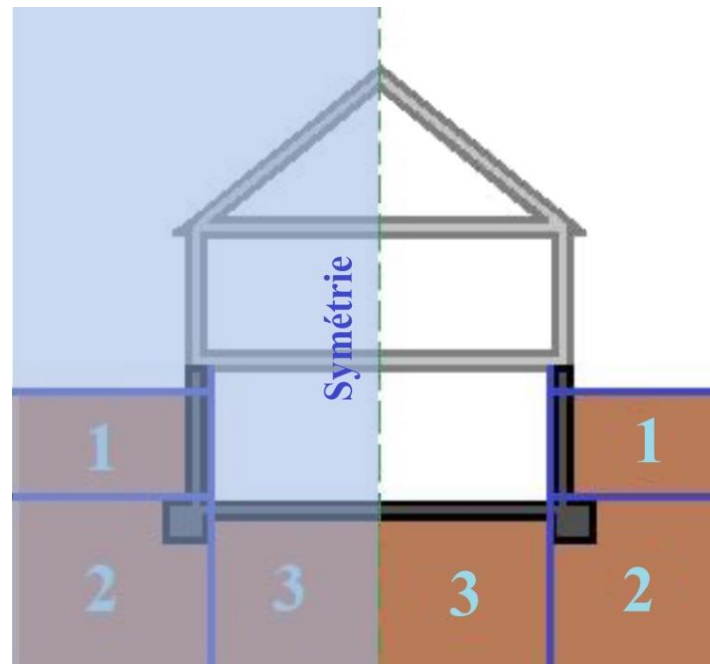


**Figure 2. 5.** Chemins concentriques isothermes de chaleur (adapté de Latta et Boileau [65])

Le mur et le sol du sous-sol sont discrétisés en sections, chacune dotée de son propre chemin radial avec seulement une variation angulaire des propriétés thermiques. Cela permet un calcul relativement simple en utilisant des coordonnées polaires où chaque section du mur ou du sol peut avoir différents niveaux d'isolation. Cette méthode peut également être appliquée aux murs et aux sols des vides sanitaires.

Le transfert de chaleur à travers les dalles est défini par un facteur de conductance périmétrique trouvé dans les tables de consultation. Les facteurs sont fournis pour seulement quatre configurations de dalles basées sur des régressions à partir de simulations par éléments finis [66]

La technique ITPE développée par Krarti et al [67], [68] est la solution analytique la plus complète pour le transfert de chaleur des fondations. Le principe de base de cette méthode est de diviser le domaine en zones de telle sorte que chaque zone soit une région rectangulaire avec des conditions aux limites uniques. L'équation de diffusion de la chaleur est résolue pour chaque zone en utilisant un profil de température estimé comme condition aux limites entre les zones, qui satisfait une continuité du flux de chaleur à travers la limite. Cette méthode a été adaptée pour fonctionner en deux ou trois dimensions. Des applications de la technique ITPE peuvent être trouvées dans plusieurs références [69]–[73].



**Figure 2. 6.** Illustration des zones ITPE (1, 2 et 3) pour une fondation en sous-sol (adapté de Krarti et al. [67])

Bahnfleth [74] et Bahnfleth et Pedersen [75] ont établi une solution aux différences finies tridimensionnelle pour les dalles au sol en utilisant un schéma de solution explicite standard. Cette solution a été utilisée à l'origine pour examiner la sensibilité à l'ombrage causé par le bâtiment, l'évapotranspiration et différentes hypothèses de conditions aux limites du sol profond.

Plus tard, Cogil [76] a développé une solution similaire pour les sous-sols en utilisant un schéma de différences finies implicite en direction alternative (ADI). La solution comprenait un modèle d'échange de rayonnement détaillé et un bilan thermique pour l'espace du sous-sol qui a été utilisé pour calculer la condition aux limites de la surface intérieure.

Les outils de Bahnfleth et de Cogil ont été adaptés par Clements [77] pour fournir des résultats prétraités à utiliser dans le moteur de simulation EnergyPlus [78]. Dans le processus d'adaptation du code pour une utilisation dans EnergyPlus, l'algorithme d'ombrage dans le programme de dalle et le modèle d'échange radiatif dans le programme de sous-sol ont été supprimés pour réduire le temps de calcul. Les préprocesseurs produisent des températures de surface moyennes mensuelles pour les surfaces couplées au sol. Ces températures servent de conditions aux limites pour les fonctions de transfert de conduction (CTF) utilisées pour

calculer le flux de chaleur in-stationnaire unidimensionnel à travers les surfaces des bâtiments.

Dans sa thèse de doctorat, Kruis [26] a examiné minutieusement, certains des outils et méthodes les plus importants de transfert de chaleur de fondation, fréquemment utilisés par les praticiens de la modélisation énergétique et souvent cités dans la littérature. Les méthodes et outils discutés, dans le cadre de son travail, ont été comparés qualitativement côte à côte. Il a su montré la capacité et les limitations de l'application de chacun des six outils comparés. Claridge [79], Adjali et al [80], Krarti [81] et Deru [23] fournissent également des approches approfondies des différentes méthodes et outils de transfert de chaleur de fondation trouvés dans la littérature.

L'outil présenté dans cette thèse se situe dans cette catégorie de modèles qui stipulent être modèle semi-analytique. Il traite principalement le problème de transfert de chaleur via le terme conductif en simplifiant l'influence de l'humidité donc en considérant que le niveau de la nappe phréatique est faible. Le détail de son développement est présenté dans le chapitre 04.

## **2.7. Modèles numériques.**

L'utilisation de solutions purement numériques est principalement réservée aux chercheurs qui les développent pour effectuer des analyses paramétriques et réaliser des méthodes basées sur la corrélation.

Dans un premier temps, l'utilisation de ce type de modèles était peu fréquente en raison de la limitation de l'outil informatique et leur fonctionnement qui nécessite un temps d'exécution et mémoire excessifs. Ce sont généralement aussi des programmes complexes. Cependant, l'évolution des moyens informatiques a rendu ces modèles numériques très pratiques et à la portée des chercheurs débutants. La plupart des méthodes utilisent la méthode des différences finies (FDM) ou la méthode des éléments finis (FEM).

L'un des premiers modèles était le FDM tridimensionnel développé par Kusuda et Achenbach [82]. Ce programme a permis d'étudier les conditions de température et d'humidité de l'abri du rayonnement (caractéristique négligée dans le présent travail). Ils y avaient utilisé différentes valeurs de conductivité thermique du sol en été et en hiver pour expliquer les changements saisonniers de la teneur en eau du sol.

Wang\_[83] a développé un modèle FEM bidimensionnel qui est la base des coefficients F2 actuels dans le manuel ASHRAE Fundamentals [84]. Les résultats sont rapportés sous forme de perte de chaleur par pied linéaire d'une section transversale du sol, plutôt que par l'ensemble du sol. La conversion de ces résultats en géométrie réelle du sol n'a pas été rapportée.

Speltz [85] a développé un programme complet pour la simulation énergétique des structures souterraines qui comprend une routine FEM bidimensionnelle pour le transfert de chaleur couplé dans le sol. La caractéristique la plus notable de ce travail étant le bilan énergétique détaillé des conditions aux limites à la surface du sol.

Adjali et al.[86] ont comparé les résultats d'un modèle de transfert de chaleur au sol à volume fini ajouté au code de simulation énergétique du bâtiment, APACHE, avec des données expérimentales sur une salle d'essai partiellement enterrée à l'Université du Minnesota. Les résultats sont comparables pour la période estivale, mais peu en hiver. Ils ont conclu que la négligence des effets de l'enneigement et de la pluie peut affecter de manière significative les températures prévues. Une étude de sensibilité a montré que la conductivité thermique du sol est le paramètre le plus important et que les résultats simulés sont plus sensibles en hiver qu'en été.

Z.Zhong, et J. E. Braun [87] ont réalisé un travail de simulation numérique du comportement de la chaleur au niveau du plancher bas, d'une chambre en béton qui est directement en contact avec le sol. Leur travail présente une méthode simplifiée du calcul du transfert de chaleur en régime variable de la dalle par le biais d'une double simulation unidimensionnelle, la première visant à quantifier les transferts de chaleur qui s'opèrent entre l'air ambiant de la pièce et la surface intérieure du plancher alors que la deuxième concerne les flux migrant du plancher bas vers le sol.

Actuellement, il existe un grand nombre de contributions en termes de simulation numérique visant à quantifier les déperditions de chaleur au niveau du sol en contact avec les éléments de la structure. La majorité des chercheurs font appel aux logiciels multi-physiques prés-programmés qui utilisent le maillage automatique de la géométrie. Pour ce faire, la compilation des données emploie la méthode des éléments finis pour diviser la géométrie en plusieurs sous-domaines constituant le maillage. Plus le nombre de nœuds du maillage est grand plus les résultats sont précis.

La simulation précise de la performance thermique du bâtiment continue d'être considérée comme un sujet important. Elle est souvent régie par un ensemble de modèles mathématiques qui diffère selon l'approche envisagée

Toutefois, les simulations bidimensionnelles restent souvent des méthodes trop simplifiées qui ne peuvent interpréter avec exactitude toute la complexité des transferts de chaleur qui s'opèrent entre la structure et le sol et peuvent comprendre une inexactitude significative [88],[89].

## 2.8. Propriétés thermiques du sol

Les propriétés thermiques du sol, à savoir la diffusivité thermique  $d$ , la conductivité thermique  $k$  et la capacité thermique volumétrique  $C$ , sont des paramètres de base décrivant la capacité et l'efficacité d'un sol à stocker et à transférer la chaleur. Les propriétés thermiques du sol influencent le transfert de chaleur et de masse dans les sols et ont donc des effets fondamentaux sur le bilan énergétique à la surface du sol, les échanges d'eau entre le sol et l'atmosphère et les structures artificielles. Une détermination précise des propriétés thermiques du sol est essentielle pour décrire les régimes thermiques qui influencent les taux de réactions et de processus physiques et thermiques se produisant dans le sol.

Il existe un grand nombre de méthodes visant à déterminer ces propriétés thermiques disponibles dans la littérature. On peut les catégoriser en deux ensembles principaux : méthodes accomplies in-situ ou en labo et méthodes théoriques.

Parmi les méthodes pratiques, la technique des impulsions thermiques a été introduite pour la détermination in situ des propriétés thermiques du sol il y a plus de 25 ans. Contrairement aux méthodes en régime permanent, la méthode des impulsions thermiques permet une détermination rapide, simple et simultanée de  $C$ ,  $d$  et  $k$  avec une perturbation minimale du sol. Capbell et al. [90] ont d'abord appliqué le capteur d'impulsions thermiques à double sonde (DPHP) pour mesurer la chaleur spécifique du sol  $C_s$  en utilisant la théorie de la source de chaleur à ligne infinie instantanée. Sur la base de l'analyse théorique de Kluitenberg et al. et Bristow et al. [91], [92] ont déterminé  $C$ ,  $d$  et  $k$  simultanément avec un capteur DPHP en suivant la théorie de la source linéaire infinie pulsée (PILS), qui a amélioré les approches de [90]. Depuis lors, la théorie PILS a été largement adoptée dans la technique des impulsions de chaleur pour estimer les propriétés thermiques du sol, la teneur en eau, l'évaporation souterraine et la densité de la neige [93]–[101].

Des efforts considérables ont également été déployés pour améliorer la technique DPHP en réduisant les influences des déflexions de la sonde, les propriétés finies de la sonde, la résistance de contact thermique, la dérivée de la température ambiante et l'interface sol-atmosphère. Gang Liu [102] et al. ont fourni dans leur travail une présentation simplifiée de la théorie et les procédures de la méthode des impulsions thermiques et ont discuté des progrès récents dans la détermination des propriétés thermiques du sol avec le capteur DPHP.

Wenxin et al. [103] ont conclu de l'étude qu'ils ont menée sur une expérience en laboratoire, que l'application du matériau à haute diffusivité thermique comme le sable entraîne une baisse des températures de l'eau et du sol.

Ress et al. [104] ont présenté une synthèse des méthodes mathématiques empiriques se rapportant à l'estimation de la capacité calorifique volumétrique  $C$  ainsi qu'à la conductivité thermique  $k$ . Ils en ont conclu que le calcul de la capacité calorifique volumétrique se fait en ajoutant les capacités thermiques des différents constituants en fonction de leur fraction volumique. Par contre, le processus d'estimation de la conductivité thermique restait vraisemblablement plus compliqué, car la capacité calorifique d'un sol peut être exprimée en fonction linéaire des rapports volumiques des constituants du sol. Cependant, l'expression de la conductivité thermique en fonction des conductivités et des rapports en volume des constituants du sol est plus complexe et ne peut être atteinte que de manière approximative.

## **2.9. Estimation de la conductivité thermique du sol.**

La densité, la teneur en humidité, la minéralogie, la texture et la température peuvent tous influencer la conductivité thermique d'un sol. Sans surprise, avec autant de variables contrôlant la conductivité thermique, de nombreuses théories et modèles ont été développés pour prédire la conductivité thermique des sols. Ces théories et modèles peuvent être empiriques ou théoriques.

Au début, le problème était mathématiquement considéré comme analogue à l'expression de la conductivité électrique ou de la constante diélectrique d'un matériau granulaire en termes de rapports volumiques et les conductivités électriques de ses constituants. De plus amples informations sur le contexte théorique de ce problème ont été fournies dans la littérature [105]. C'est pourquoi les premières tentatives pour résoudre le problème ont fait appel à la conductivité électrique ou à la constante diélectrique des

matériaux en deux phases. En supposant que les constituants du sol ont une distribution parallèle à la direction du flux de chaleur, la conductivité thermique a été décrite comme suit :

$$k = \theta_1 k_1 + \theta_2 k_2 \quad (2.1)$$

Cette approche appelée « moyenne arithmétique » a été reconnue pour surestimer la conductivité thermique du sol [106].

Une autre approche, appelée « moyenne harmonique », consiste à supposer que les constituants du sol ont une série distribution qui est perpendiculaire à la direction du flux de chaleur, la conductivité thermique du sol peut être exprimée comme suit :

$$k = \frac{k_1 k_2}{\theta_1 k_2 + \theta_2 k_1} \quad (2.2)$$

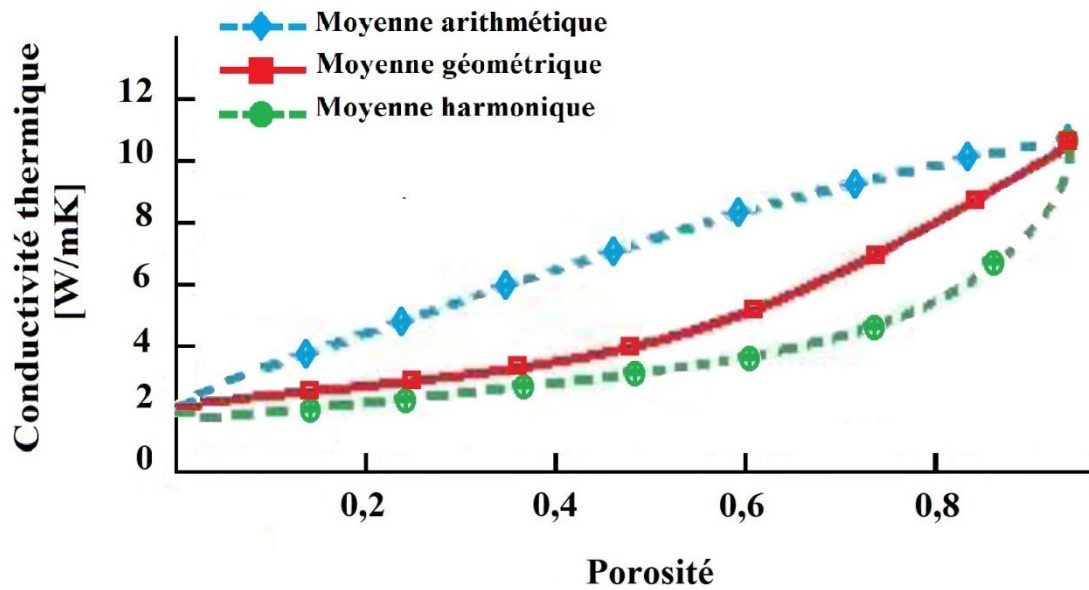
Elle a été reconnue pour sous-estimer la conductivité thermique du sol [106].

Woodside et Messmer ont également utilisé une équation «moyenne géométrique pondérée» [106] pour représenter la conductivité thermique sous la forme :

$$k = k_1^{\theta_1} k_2^{\theta_2} \quad (2.3)$$

Cette approche a été trouvée pour donner une valeur intermédiaire entre la moyenne arithmétique et l'équation de la moyenne harmonique.

La Figure 2.7. fournit une comparaison des valeurs de conductivité thermique calculées à partir de la moyenne arithmétique, de la moyenne harmonique et des équations de la moyenne géométrique. Les résultats sont reportés en fonction de la porosité (volume des vides divisé par le volume total du sol). Etant donné que la porosité indique la teneur maximale en eau qu'un sol peut atteindre, il est évidemment un paramètre d'importance.



**Figure 2. 7.** La relation entre la conductivité thermique et la porosité (adapté de [106]).

Les modèles théoriques d'écoulement parallèle et en série fournissent une limite supérieure et inférieure pour la prédiction de la conductivité thermique de tout sol. Dans ces modèles, les phases solide et liquide sont considérées comme regroupées en blocs. Les blocs sont alors disposés soit parallèlement au flux thermique (limite supérieure) soit en série (limite inférieure).

Cependant, la plupart des modèles théoriques ont été modifiés empiriquement, ce qui en fait des modèles semi-empiriques [107].

La constante de proportionnalité qui relie le taux de transfert de chaleur par conduction au gradient de température dans un matériau est appelée conductivité thermique (unité SI W/ mK) [108].

Comme précisé dans la section précédente, il n'existe aucune relation linéaire entre la conductivité thermique globale du sol considéré et les conductivités spécifiques des éléments le constituant, par conséquent beaucoup de recherches se sont orientées vers des méthodes pratiques d'estimation de la conductivité thermique.

Il existe plusieurs méthodes en laboratoire afin de mesurer la conductivité thermique du sol, comme le précise Farouki [109] et Mitchell et Kao [110] dans leurs travaux. Il est possible de les classer en deux catégories : les méthodes en régime permanent ou transitoire.

Les méthodes de régime permanent consistent à appliquer un flux de chaleur constant et unidirectionnel à un échantillon prélevé du sol étudié et à mesurer la puissance et la différence de température à travers elles lorsque l'état d'équilibre est atteint. La conductivité thermique est alors calculée en utilisant directement la loi de Fourier. Les méthodes transitoires, quant à elles, consistent à appliquer une impulsion de chaleur unidirectionnelle à un échantillon et à mesurer l'évolution de la température dans le temps. Les données transitoires sont utilisées pour déterminer la conductivité thermique, généralement par application d'une solution analytique de l'équation de diffusion de chaleur. Certaines méthodes transitoires peuvent également être utilisées pour évaluer d'autres propriétés thermiques, telles que la diffusivité thermique et la résistance thermique du sol considéré.

Enfin, il existe également les tests de réponse thermique réalisés sur le terrain couramment utilisé par l'industrie géothermique pour déduire les propriétés du sous-sol Mogensen [111]. Elle est considérée comme la méthode la plus courante et la plus efficace pour obtenir les propriétés thermiques du sol [112], [113].

Le TRT est une méthode transitoire analogue aux essais en laboratoire, mais réalisés à une plus grande échelle. Dans les travaux de Low et al. [114], ces deux méthodes sont comparées aux résultats issus des tests de réponse thermique sur un site. L'objectif étant de déterminer si les résultats issus des méthodes en laboratoire peuvent être une alternative intéressante aux tests de réponses thermiques conventionnels énergivores et coûteux en main d'œuvre.

Ces trois concepts simples ont servi de base à de nombreux modèles empiriques et semi-empiriques pour prédire la conductivité thermique des sols. Farouki [107] a effectué un examen approfondi de nombreux modèles empiriques et semi-empiriques, y compris les modèles développés par De Vries [115] ; Gémant [116]; Johansen [117] ; Kersten [118]; Kunii et Smith [119]; McGaw [120]; Mickley [121]; Smith [122]; Van Rooyen et Winterkorn [123]; et Woodside et Messmer [124]. Farouki a constaté que pour les sols non gelés, le modèle de Johansen donnait le meilleur accord avec les résultats expérimentaux sur une gamme de niveaux de saturation et de types de sols. Cependant, dans les sols à grains grossiers avec des saturations  $S_r < 0,2$ , le modèle de Johansen n'a pas donné la prédiction la plus précise. Entre des saturations de  $0,1 < S_r < 0,2$ , Farouki a trouvé que la méthode de De Vries montrait la meilleure concordance et la méthode de Johansen la deuxième meilleure

corrélation. Pour des niveaux de saturation inférieurs à 0,1, seule la méthode de Van Rooyen a démontré un bon accord entre les données modélisées et expérimentales.

Plus récemment, trois études de Balland et Arp [125] ; Côté et Konrad [126]; et Lu et al. [97] ont essayé d'améliorer le modèle de Johansen. Barry-Macaulay et al. [127] ont réalisé un travail où ces trois modèles ainsi que le modèle de Johansen sont comparés aux données expérimentales testées à une température d'environ 20°C à partir d'études rapportées par Barry-Macaulay [128] , Barry-Macaulay et al. [127] et Kersten [118] . Les performances des modèles ont été évaluées sur une gamme de types de sols et de niveaux de saturation sur des sols non gelés, par conséquent, des parties des modèles relatives aux sols gelés n'ont pas été incluses dans cet article. L'objectif du travail de Barry-Macaulay et al. [108] était de fournir une évaluation indépendante des modèles pour prédire la conductivité thermique des sols à une température de 20 °C et de fournir des paramètres de sol empiriques modifiés pour améliorer la précision des modèles.

Les quatre modèles mathématiques de Johansen [117] ; Balland et Arp [125] ; Côté et Konrad [126] ; Lu et al. [97] vont être détaillés dans le chapitre 03.

### **2.10. Effet de la couverture du sol.**

La couverture du sol joue le rôle de la limite supérieure du système du sol considéré. C'est la seule partie en contact direct avec l'atmosphère, par conséquent, il y aura un bon nombre d'interactions se rapportant à l'échange de chaleur qui s'opère à son niveau. C'est pourquoi, considérer les effets de ses propriétés thermiques dans la modélisation est fortement recommandé dans le but de maximiser la précision des résultats.

Kusuda [129] a étudié l'effet de la couverture du sol en mesurant les températures sous l'asphalte noir, l'asphalte peint en blanc, la saleté nue, l'herbe courte et l'herbe longue. Il a constaté que les températures mensuelles moyennes près de la surface sous l'asphalte noir étaient environ 15 ° F plus chaudes que sous les hautes herbes, même à une profondeur d'un pied. En hiver, toutes les températures à un pied étaient similaires. À une profondeur de 30 pieds, les températures du sol sous l'asphalte noir étaient plus élevées en hiver, mais similaires aux autres en été.

Chalhoub et al. [130] ont développé un modèle simple pour décrire le transfert transitoire de chaleur et d'humidité dans le sol sous des climats modérés afin de prédire les températures au sol près de la surface en utilisant un ensemble minimal de variables et de données météorologiques. Cette étude a montré qu'il est nécessaire de bien connaître la couverture de la surface du sol et les propriétés du sol spécifiques au site pour obtenir des prédictions précises de la température du sol.

Cuny et al. [131] ont une étude menée pour quantifier l'impact des types de sols de revêtement sur la performance énergétique du sol. Les résultats obtenus montrent que la teneur en humidité et le type de sol ont une influence non négligeable sur les performances thermiques.

### **2.11. Variation spatiale.**

On entend par variation spatiale, tous les changements s'opérant au niveau de la structure du sol considéré. Ces variations se rapportent généralement aux taux de présence des différents composants constituant le sol. Les raisons majeures qui causent ces changements sont principalement les facteurs climatiques non-stables dus aux changements saisonniers, le déplacement des eaux (nappe phréatique ou bien le changement de phase des eaux interstitielles), l'infiltration de composants chimiques qui peuvent modifier directement la conception chimique naturelle et en général l'hétérogénéité du sol.

Donc, il faut savoir que la température du sol change dans l'espace et dans le temps en réponse à une multitude de facteurs.

L'un des plus grands défis de la création d'un modèle de domaine terrestre consiste à établir les propriétés thermiques du sol. Les propriétés thermiques à n'importe quel endroit dans le domaine du sol sont largement déterminées par la composition du sol. Le sol comprend généralement jusqu'à six composants [103] :

- Quartz.
- Des minéraux argileux.
- Matière organique.
- Glace.
- Eau.
- Air.

La fraction relative de chacun de ces composants peut varier considérablement dans tout le domaine terrestre. Parce que ces variations sont à la fois difficiles à mesurer et difficiles à décrire dans un modèle, la majorité des travaux trouvés dans la littérature supposent que les propriétés du sol sont spatialement homogènes [103].

Quelques auteurs ont exploré l'impact de la variation spatiale sur les calculs de transfert de chaleur des fondations. Krarti [70] a exploré l'effet de la variation latérale des types de sol et Rees et al. [104] ont exploré l'effet de la variation verticale de la teneur en eau sur la base d'un profil d'humidité statique unidimensionnel. Deru [23] a démontré que les variations spatiales de la teneur en eau peuvent être approchées en utilisant différentes propriétés plus profondément dans le domaine que près de la surface.

### 2.12. Conclusion

Le transfert de chaleur au sol est un terme important dans le bilan énergétique d'un bâtiment; Cependant, les outils d'analyse détaillée du problème ne sont pas vraiment simples et dépendent de beaucoup de paramètres et variables pratiques et empiriques au même temps. Les méthodes d'analyse les plus utilisées sont assez compliquées et peuvent facilement produire des résultats inexacts. Pour une première approximation, ces modèles peuvent produire des résultats raisonnables; cependant, des réponses plus précises sont difficiles à trouver.

Le but de la revue bibliographique présentée dans ce chapitre est de mieux comprendre certains aspects de la recherche visant à :

- Se familiariser avec les définitions techniques de base, souvent employées dans cette thèse.
- Les différents types de modèles visant à approximer la réponse thermique du sol.
- Argumenter l'importance des propriétés thermiques, indispensables pour l'efficacité des modèles.
- La difficulté de l'estimation de la conductivité thermique d'un sol.

## **Chapitre 3 : Mécanismes du transfert de chaleur dans les sols**

### **3.1. Introduction.**

Le transfert de chaleur au niveau du sol est un phénomène très complexe. Il dépend fortement des propriétés thermo-physiques de ce milieu qui est dans la plupart du temps un milieu hétérogène. Dans ce contexte, nous pouvons dire que la principale difficulté rencontrée dans la modélisation du transfert de chaleur dans le sol est la détermination de ces propriétés. En effet, les propriétés thermo-physiques peuvent être spatialement variables. De plus, on sait que les propriétés thermiques d'un sol peuvent varier avec la température et la teneur en humidité du sol. Ainsi, lorsque des variations importantes de la teneur en humidité du sol sont anticipées, la prise en compte de l'effet sur le transfert de chaleur au sol peut être nécessaire.

Les valeurs des propriétés mesurées sur le terrain ou en laboratoire ne sont valables que pour les conditions au moment de la mesure; par conséquent, des corrélations basées sur des modèles physiques et des observations empiriques du comportement du sol sont utilisées pour modéliser le comportement de ce dernier. Ce chapitre présente une brève introduction à la physique des sols ainsi qu'un aperçu sur ces corrélations et des effets de changement de phase.

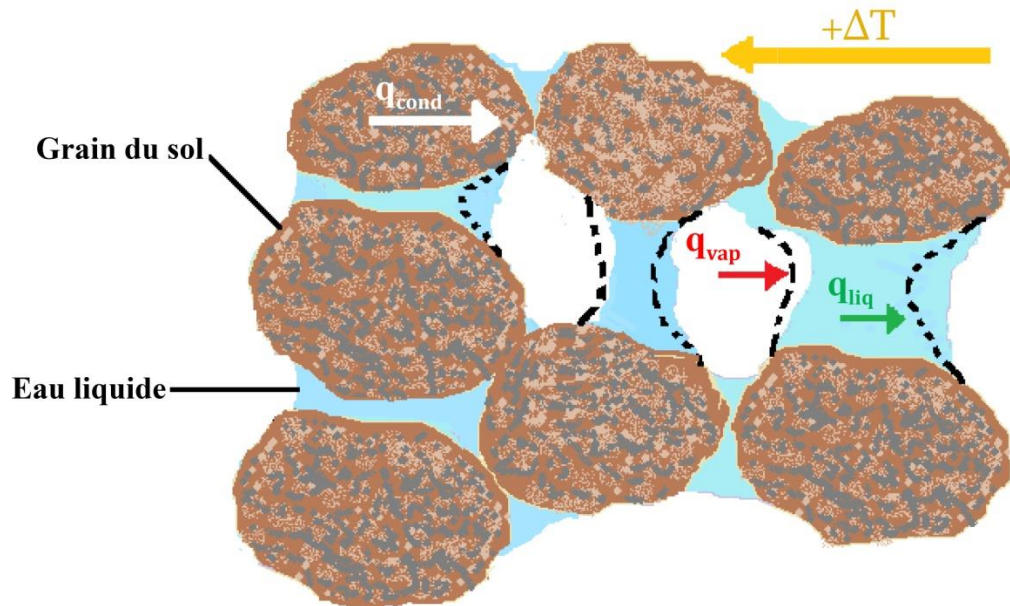
### **3.2. Mécanismes du transfert de chaleur dans le sol.**

Le transfert de chaleur dans le sol, comme dans les autres milieux poreux en général, peut être induit par plusieurs mécanismes. Les quatre mécanismes les plus influents sont:

- La conduction à travers les grains du sol.
- La convection
- Le transfert de chaleur dû au changement de phase de l'eau, également appelé chaleur latente de vaporisation.
- Le rayonnement dans les pores remplis de gaz.

On suppose souvent que les radiations sont négligeables et exclues des formulations [104].

La figure 3.1. présente un schéma simplifié des principaux trajets de transfert de chaleur dans le sol.



**Figure 3. 1.** Diagramme simplifié des principales voies de transfert de chaleur dans le sol.

### 3.2.1. La conduction.

La conduction est un processus par lequel la chaleur est transférée d'une région d'un milieu à un autre, sans mouvement visible dans le milieu. L'énergie thermique est transmise de molécule à molécule. Selon une théorie bien établie, le flux de chaleur par unité de surface,  $q_{cond}$  généré par conduction, peut s'écrire comme suit:

$$q_{cond} = -k \nabla T \quad (3.1)$$

Où  $k$  est la conductivité thermique du milieu,  $T$  la température et  $\nabla$  l'opérateur de gradient.

Il a été convenu que dans la majorité des cas, la conduction à travers les particules solides dans le sol représente le mode de transfert de chaleur le plus dominant [132]. Plus il y'a de l'espace entre les grains moins ce mode de transfert de chaleur est présent. Par conséquent, augmenter la résistance de contact entre les grains reviendrait à limiter ce processus. Par exemple, l'ajout d'argile colloïdale à un sol grossier peut réduire la résistance de contact en remplissant les vides. Le modèle effectué dans ce travail s'intéresse particulièrement à ce mode de transfert de chaleur.

### 3.2.2. La convection.

La convection thermique fait référence au transport de chaleur dans un fluide au moyen de flux de circulation. Le mouvement des particules induit donc exclusivement des effets de convection. Dans les sols, on suppose généralement que la structure du sol (phase solide) est statique et que les effets de convection ne sont donc attribués qu'au transport de liquides et de vapeurs. Le flux de chaleur généré par la convection liquide est alors donné par:

$$q_{liq} = c_l \rho_l \bar{v}_l (T - T_0) \quad (3.2)$$

Où  $c_l$  est la capacité thermique spécifique de l'eau du sol,  $\rho_l$  est la densité de l'eau du sol,  $\bar{v}_l$  est le vecteur de la vitesse de l'eau et  $T_0$  est la température de référence.

De même, le flux de chaleur généré par la convection à la vapeur peut s'écrire comme suit:

$$q_{v.conv} = c_v \rho_v \bar{v}_v (T - T_0) \quad (3.4)$$

Où  $c_v$  est la capacité thermique spécifique de la vapeur du sol et  $\bar{v}_v$  le vecteur de la vitesse de la vapeur.

### 3.2.3. Le transfert de chaleur dû au changement de phase de l'eau.

La chaleur latente de vaporisation est utilisée lors de la prise en compte du transfert de chaleur provoqué par le transport de vapeur dans le milieu et résulte du changement de phase. L'ampleur de cette contribution au transfert de chaleur global dépendra de la quantité de transfert de vapeur qui se produit et peut être relativement importante lorsque les conditions sèches prévalent. La théorie classique du transfert de chaleur exprime le flux de chaleur dû à cette contribution sous la forme:

$$q_{lat} = L_0 \rho_l \bar{v}_v \quad (3.5)$$

Où  $L_0$  est la chaleur latente de vaporisation à  $T_0$ .

Dans les pores remplis de gaz des sols insaturés, l'eau liquide s'évapore du côté chaud, absorbant la chaleur latente de vaporisation et réduisant le rayon du ménisque (lignes pointillées sur la figure 3.1). La diffusion se produit en raison du gradient de pression de vapeur et la vapeur se condense de l'autre côté du pore, libérant la chaleur latente de vaporisation et augmentant le rayon du ménisque. La chaleur sensible véhiculée par la vapeur est négligeable en raison de la faible capacité calorifique volumique de la vapeur. À l'état d'équilibre, le déséquilibre dans les rayons des ménisques induit un écoulement capillaire de

liquide entre les grains du sol pour équilibrer le flux de vapeur [133]. Ce processus est important pour la conductivité thermique globale, car la conductivité thermique effective des cycles de distillation à la vapeur est plus grande que la conductivité thermique des pores remplis de gaz seuls [132].

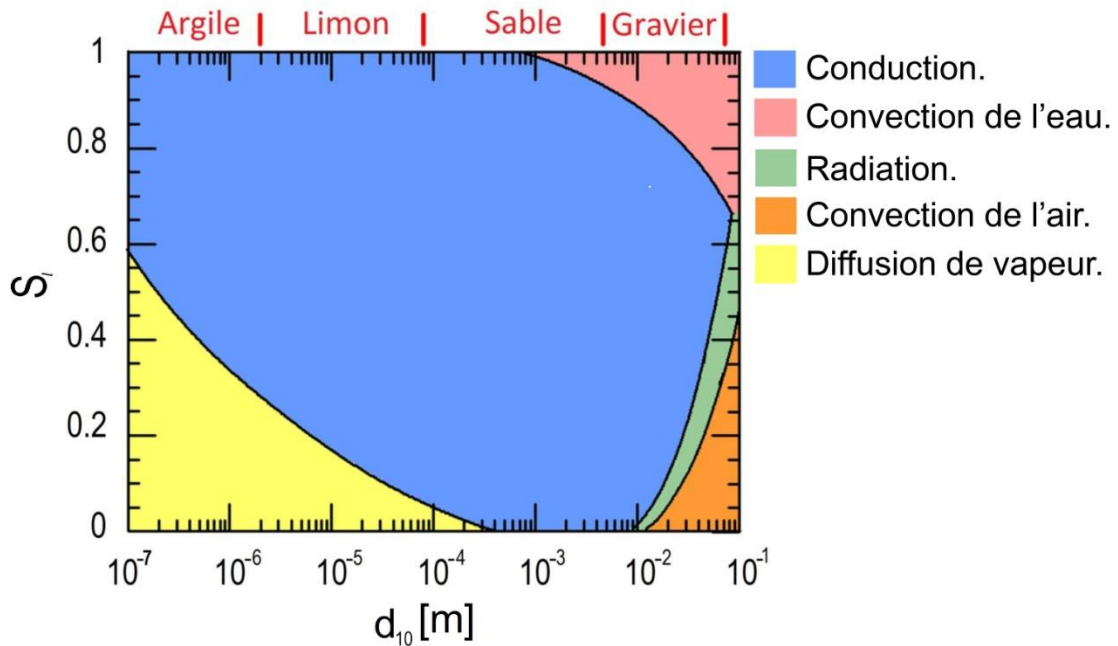
### 3.2.4. Le transfert de chaleur total.

Un grand nombre de travaux dans la littérature stipule que le transfert de chaleur total,  $q_h$  peut être obtenu en additionnant tout simplement les différents types de transferts de chaleur considérés, il peut donc être défini comme:

$$q_h = q_{cond} + q_{l.conv} + q_{v.conv} + q_{lat} \quad (3.6)$$

La Figure 3.2. montre le mode de transfert de chaleur principal en fonction de la granulométrie du sol et du degré de saturation.

Comme cité dans la section 3.2.1, dans la majorité des cas, le transfert par conduction est le plus significatif. Ce pourquoi, nous verrons dans le chapitre 04 que la contribution apportée dans ce travail s'intéresse particulièrement à ce mode de transfert de chaleur.



**Figure 3. 2.** Présence des différents modes de transfert de chaleur dans une matrice poreuse (Déduit de [117]).

### 3.3. Les propriétés thermiques des sols.

L'amplitude du transfert de chaleur à travers le sol dépend des propriétés thermiques de celui-ci. La conductivité thermique, la chaleur latente et la capacité thermique d'un matériau granulaire doivent être bien connues pour en comprendre le comportement thermique.

#### 3.3.1. La capacité thermique.

La capacité thermique définit la quantité d'énergie stockée dans un matériau par unité de masse par unité de changement de température (unité SI J / kg K). On peut donc dire qu'elle représente la quantité de chaleur requise en joule pour qu'un gramme d'un élément augmente d'un degré Celsius.

Il est souvent satisfaisant de calculer la capacité thermique des sols en ajoutant les capacités thermiques des différents constituants en fonction de leurs fractions volumiques. Par exemple, si  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  et  $\theta_3$  désignent les fractions volumiques de trois constituants du sol (air, eau et solide), la capacité thermique du sol peut être exprimée comme suit:

$$c = \theta_1 \rho_1 c_1 + \theta_2 \rho_2 c_2 + \theta_3 \rho_3 c_3 \quad (3.7)$$

Où  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  sont les capacités calorifiques spécifiques des trois constituants du sol, respectivement. La capacité calorifique d'un sol ayant plus de trois constituants peut être calculée en ajoutant simplement plus de termes dans Eq. (3.7). Les capacités thermiques spécifiques de certains constituants typiques du sol sont présentées dans le tableau 3.1. [134]. Les fractions volumiques d'un sol peuvent être calculées à partir de la porosité du sol (volume de vides / volume total) et du degré de saturation (volume d'eau / volume de vides). Ainsi, les relations suivantes s'appliquent:

$$\theta_1 = (1 - n) \quad (3.8)$$

$$\theta_2 = n S_r \quad (3.9)$$

$$\theta_3 = n(1 - S_r) \quad (3.10)$$

Où  $n$  est la porosité et  $S_r$  est le degré de saturation.

Les tableaux 3.1. et 3.2. fournissent des informations supplémentaires pouvant être utilisées pour illustrer l'application de cette approche.

**Tableau 3. 1.** Capacité thermique spécifique et densité de matériaux sélectionnés (d'après Clark [134]).

Matériau	Capacité thermique spécifique [J / kg K]	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]
Quartz	799	2650
Kaolin	937	2600
Carbonate de calcium	870	2710
CaSO <sub>4</sub>	816	2450
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	690	5240
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	908	3700
Fe (OH) <sub>3</sub>	946	3600
Orthoclase	812	2560
Oligoclase	858	2640
Potasse mica	870	2900
Magnésie mica	862	2900
Hornblende	816	3200
Apatite	766	3200
Dolomite	929	2900
Talc	874	2700
Granit	803	2600
Syénite	833	2700
Diorite	812	2900
Andésite	833	2400
Basalte	891	3000

Par exemple, considérons un sable comprenant du quartz ( $c_1 = 210 \text{ J / kg.K}$ ) de l'eau ( $c_2 = 4186 \text{ J / kg.K}$ ) et de l'air ( $c_3 = 2.256 \text{ J / kg.K}$ ) et ayant une porosité

de 0,5. Application de l'équation (3.7) pour les conditions sèches (c'est-à-dire  $S_r = 0$ ) donne une capacité calorifique volumétrique de  $1005 J / kg.K$ , alors qu'un sol saturé (c.-à-d.  $S_l = 1$ ) ayant la même porosité aura une capacité calorifique volumétrique de  $3098 J / kg.K$ .

**Tableau 3. 2.** Valeurs typiques de porosité (d'après Hough [135]).

Sol	Degré de porosité $n$ [%]
1. Matériaux uniformes	
• Sphères égales (valeurs théoriques).	$26,0 < n < 47,6$
• Sable d'Ottawa standard.	$33,0 < n < 44,0$
• Sable propre et uniforme.	$29,0 < n < 50,0$
• Limon uniforme et inorganique.	$29,0 < n < 52,0$
2. Des matériaux bien classés	
• Sable limoneux.	$23,0 < n < 43,0$
• Sable propre, fin à grossier.	$17,0 < n < 49,0$
• Sable micacé.	$29,0 < n < 55,0$
• Sable et gravier limoneux.	$12,0 < n < 46,0$
3. Sols mixtes	
• Argile sableuse ou limoneuse.	$20,0 < n < 64,0$
• Argile limoneuse classée par saut avec pierres ou fragments de roche.	$17,0 < n < 50,0$
• Mélange de gravier, de sable, de limon et d'argile bien classé.	$11,0 < n < 41,0$
4. Sols argileux	
• Argile (30-50% tailles d'argile).	$33,0 < n < 71,0$
• Argile colloïdale ( $0,002 \text{ mm} \geq 50\%$ ).	$37,0 < n < 92,0$
5. Sols organiques.	
• Limon organique.	$35,0 < n < 75,0$
• Argile organique (30-50% tailles d'argile).	$41,0 < n < 81,0$

### 3.3.2. Conductivité thermique.

La conductivité thermique du sol peut être définie comme «la vitesse à laquelle l'énergie thermique s'écoule à travers une surface unitaire du sol en raison d'un gradient de température unitaire» [109]. C'est une fonction de la teneur en humidité, la température, la taille, la forme, l'orientation, le tassement et le type de grains qui composent la matrice du sol. La teneur en humidité a le plus grand effet; elle peut fortement modifier la conductivité thermique. C'est pourquoi, il n'existe aucune relation linéaire entre la conductivité thermique globale d'un sol et ses fractions volumiques. Donc l'estimation de cette propriété est uniquement envisageable par corrélations.

En raison de la complexité de l'estimation de la conductivité thermique, un nombre important de travaux de transfert de chaleur au sol est basé sur l'hypothèse d'affecter des valeurs fixes, de la conductivité thermique, aux différents domaines considérés dans la modélisation du sol étudié. Par conséquent, de grandes erreurs pourraient être entraînées puisque, comme cité plus haut, la conductivité thermique d'un sol dépend de plusieurs facteurs (physiques, chronologiques, chimiques...etc.). La détermination de la conductivité thermique du sol représente un atout majeur dans l'efficacité du modèle et donc dans la précision de ses résultats.

### 3.3.3. Modèles de prédiction de la conductivité thermique.

Les modèles théoriques d'écoulement parallèle et en série fournissent une limite supérieure et inférieure pour la prédiction de la conductivité thermique de tout sol. Dans ces modèles, les phases solide et liquide sont considérées comme regroupées en blocs. Les blocs sont alors disposés soit parallèlement au flux thermique (limite supérieure) soit en série (limite inférieure). En supposant que la chaleur circule à travers les blocs solides et fluides en parallèle, l'équation de la conductivité thermique est donnée par :

$$k = nk_f + (1 - n)k_s \quad (3.11)$$

Ici  $n$  est la porosité du sol,  $k_f$  est la conductivité thermique de la phase fluide et  $k_s$  est la conductivité thermique de la phase solide.

Le modèle d'écoulement en série est calculé en ajoutant les inverses de la conductivité comme donné par :

$$\frac{1}{k} = n \frac{1}{k_f} + (1 - n) \frac{1}{k_s} \quad (3.12)$$

Une autre façon utile de modéliser la conductivité est obtenue en utilisant la moyenne géométrique. Cela donne des valeurs entre les modèles série et parallèle et peut être exprimé comme suit :

$$k = k_f^n \cdot k_s^{(1-n)} \quad (3.13)$$

### 3.3.3.1. Modèle de Johansen [117].

Johansen [117] a développé un modèle applicable aux sols gelés et non gelés. Il a exprimé la conductivité thermique d'un sol non saturé en termes de conductivités thermiques sèches et saturées du sol. L'équation de Johansen pour le calcul de la conductivité thermique est donnée par :

$$k = (k_{sat} - k_{dry})k_e + k_{dry} \quad (3.14)$$

Où  $k_{sat}$  et  $k_{dry}$  sont respectivement les conductivités thermiques saturée et sèche et  $K_e$  est le nombre de Kersten qui est fonction de la saturation ( $S_r$ ).  $K_e$  pour les sols à grains grossiers avec  $S_r > 0,05$  est défini comme :

$$k_e = 0,7 \log S_r + 1 \quad (3.15)$$

Et pour les sols à grains fins avec  $S_r > 0,1$

$$k_e = \log S_r + 1 \quad (3.16)$$

Johansen a découvert que la conductivité thermique des sols secs était insensible aux variations de la conductivité des particules. Pour les sols naturels secs, Johansen a développé une équation semi-empirique pour la conductivité thermique à une densité sèche donnée.

$$k_{dry} = \frac{0,137\rho_d + 64,7}{2700 - 0,947\rho_d} \pm 20\% \quad (3.17)$$

Où  $\rho_d$  est la densité sèche en  $kg/m^3$  et la densité des particules solides est de  $2700 kg/m^3$ . Johansen a observé que les matériaux de roche concassée ont donné des conductivités thermiques sèches plus élevées et a donc proposé une équation distincte pour la roche concassée :

$$k_{dry} = 0,039n^{-2,2} \pm 25\% \quad (3.18)$$

Où  $n$  est la porosité du sol. Pour les sols saturés, Johansen a constaté que les variations de texture avaient peu d'effet sur la conductivité thermique. Il a proposé d'utiliser l'équation de la moyenne géométrique basée sur la conductivité thermique et la fraction volumique des composants solides et aqueux du sol. Pour les sols saturés non gelés, cela donne :

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_w^n \quad (3.19)$$

Pour déterminer la conductivité saturée, la conductivité des particules solides ( $k_s$ ) doit être connue. Pour déterminer  $k_s$  Johansen a suggéré l'utilisation de l'équation de moyenne géométrique suivante :

$$k_s = k_q^q k_0^{(1-q)} \quad (3.20)$$

Où  $k_q$  est la conductivité thermique du quartz ( $7,7 W/mK$ ),  $k_0$  est la conductivité thermique des autres minéraux du sol ( $2,0 W/mK$ ) et  $q$  est la teneur en quartz en fraction des solides totaux. Johansen a suggéré que pour les sols à grains grossiers à faible teneur en quartz (20 %),  $k_0 = 3,0 W/mK$  devrait être utilisé.

### 3.3.3.2. *Modèle de Côté et Konrad [126].*

Côté et Konrad [126] ont développé un modèle basé sur le modèle de conductivité thermique proposé par Johansen [117]. Ils ont utilisé la même équation (3.14) proposée par Johansen pour prédire la conductivité thermique. Cependant, ils ont modifié la formule utilisée pour calculer la conductivité thermique sèche du sol et le nombre de Kersten  $K_e$ . La conductivité thermique saturée a été calculée essentiellement de la même manière que Johansen. Cependant, au lieu d'utiliser des équations distinctes pour les sols gelés et non gelés, Côté et Konrad ont utilisé l'équation suivante pour représenter les deux situations :

$$k_{sat} = k_s^{(\theta_s)} k_w^{(\theta_w)} k_i^{(\theta_i)} \quad (3.21)$$

Où  $k_s$ ,  $k_w$  et  $k_i$  sont les conductivités thermiques des solides du sol, de l'eau et de la glace et  $\theta_s$ ,  $\theta_w$  et  $\theta_i$  sont la fraction volumique des solides, de l'eau et de la glace, respectivement. Pour estimer la conductivité des sols secs à porosité constante, Côté et Konrad ont proposé l'équation suivante :

$$k_{dry} = \chi \cdot 10^{-\eta n} \quad (3.22)$$

Où  $\chi$  ( $W/mK$ ) et  $\eta$  sont des paramètres empiriques de type de sol qui tiennent compte de l'effet de forme des particules et  $n$  est la porosité. Côté et Konrad ont découvert que la forme des particules du sol et la distribution de la taille des grains influent sur la relation conductivité thermique sèche-porosité et ont proposé différents paramètres de type de sol pour ; graviers bien calibrés et sable concassé; sables naturels et sols à grains fins (limon et argile); et de la tourbe. Le tableau 3.3. énumère les trois différents paramètres de type de sol calculés par Côté et Konrad. Comme pour Johansen, la conductivité thermique normalisée  $K_e$  (nombre de Kersten selon Johansen) a été exprimée en fonction de la saturation et donnée par :

Où  $\alpha$  est un paramètre empirique qui est fonction du type de sol et de l'état gelé/dégelé. Côté et Konrad ont calculé la valeur  $\alpha$  de pour différents types de sol à partir de près de 700 données de conductivité thermique gelées et non gelées de Kersten [118], Johansen [117] et Côté et Konrad [136]. La substitution des équations (3.21) à (3.23) dans l'équation (3.14) donne la relation suivante pour les sols non gelés :

**Tableau 3. 3.** Paramètres empiriques de Côté et Konrad [126].

Type de particules	Paramètres $k_{dry}$	
	$\chi$ (W/mK)	$\eta$
Graviers et sable concassé	1,70	1,80
Sols à grains fins et sables naturels	0,75	1,20
Tourbe	0,30	0,87
Type de sol	Non-gelé	Gelé
Graviers bien calibrés et sables grossiers	4,60	1,70
Sables moyens et fins	3,55	0,95
Limons et argiles	1,90	0,85
Tourbe	0,60	0,25

### 3.3.3.3. Modèle de Balland et Arp [125].

Balland et Arp [125] ont proposé une nouvelle méthodologie pour estimer la conductivité thermique des sols basée sur le modèle de Johansen. Ils ont découvert que le modèle de Johansen présentait un certain nombre de problèmes : il n'incluait pas la matière organique et n'était pas homogène des sols secs à la saturation et des sols à texture fine à grossière. Ils ont apporté un certain nombre de petits changements aux formules de Johansen. Pour tenir compte de la matière organique, Balland et Arp ont ajusté l'équation de conductivité des particules solides de Johansen pour donner :

$$k_s = k_{om}^{V_{om}} k_q^q k_0^{(1-q-V_{om})} \quad (3.25)$$

Où  $k_{om}$  est la conductivité de la matière organique et  $V_{om}$  est la quantité volumétrique de matière organique dans le sol. De plus, Balland et Arp ont introduit une nouvelle fonction pour prédire la conductivité thermique sèche des sols :

$$k_{dry} = \frac{(ak_s - k_{air})\rho_b + k_{air}\rho_p}{\rho_p - (1-a)\rho_b} \quad (3.26)$$

Ici  $a = 0,053$  et  $\rho_p$  est la densité des particules du sol, et  $k_{air}$  est la conductivité thermique de l'air. Cette équation est la même que celle de Johansen (3.14) lorsque  $k_s = 3 \text{ W/mK}$ ,  $k_{air} = 0,024 \text{ W/mK}$  et  $\rho_p = 2700 \text{ kg/m}^3$ . Après des comparaisons numériques

approfondies de la méthode de Johansen, Balland et Arp ont également introduit une nouvelle fonction pour prédire  $K_e$  :

$$K_e = S_r^{0,5(1+V_{om}-\alpha V_{sand}-V_{cf})} \left[ \left( \frac{1}{1 + \exp(-\beta S_r)} \right)^3 - \left( \frac{1 - S_r}{2} \right)^3 \right]^{1-V_{om}} \quad (3.27)$$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres ajustables, et  $V_{sand}$  et  $V_{cf}$  désignent respectivement les fractions volumiques de sable et de fragments grossiers dans les solides du sol. Les paramètres ajustables  $\alpha$  et  $\beta$  ont été déterminés sur la base de données expérimentales non gelées par Kersten [118] et Ochsner et al. [95] et trouvés égaux à :  $\alpha \approx 0.24 \pm 0.04$  et  $\beta \approx 18.1 \pm 1.1$ . Ces valeurs sont applicables à tous les types de sols.

#### 3.3.3.4. Modèle de Lu et al. [97].

Lu et al. [97], ont développé un modèle basé sur le concept initialement proposé par Johansen [117] et amélioré par la suite par Côté et Konrad [126]. Premièrement, Lu et al. ont reconnu que Côté et Konrad avaient amélioré le modèle de Johansen. Cependant, ils ont constaté que le modèle de Côté et Konrad ne tenait pas toujours suffisamment compte de la saturation lors du calcul de  $K_e$ , en particulier pour les sols à grains fins à faible saturation. Pour améliorer cette corrélation, Lu et al. a proposé la relation suivante pour  $K_e$  et  $S_r$  dans toute la gamme des conditions d'humidité :

$$K_e = \exp(\alpha [1 - S_r^{(\alpha-1,33)}]) \quad (3.28)$$

Où est  $\alpha$  une variable dépendante de la texture du sol et 1,33 est un paramètre de forme. De plus, Lu et al. ont introduit une fonction linéaire pour prédire la relation entre la conductivité thermique sèche et la porosité du sol :

$$k_{dry} = -an + b \quad (3.29)$$

Où  $a$  et  $b$  sont des paramètres empiriques qui ont été déterminés en ajustant l'équation (3.29) aux données d'échantillons de sol sec. Ils ont également utilisé les données de Johansen [117] pour la roche, le gravier et le sable. Ils ont trouvé des valeurs de  $a$  et  $b$  égales à 0,56 et 0,51 respectivement pour ( $0,2 < n < 0,6$ ). Le calcul de  $k_{sat}$  a été effectué conformément à la méthode de Johansen (équation (3.19)) et la conductivité thermique a été calculée à l'aide de l'équation (3.14) proposée par Johansen. Lu et al. n'ont pas mesuré la

teneur en quartz de leurs sols ; au lieu de cela, ils ont supposé que la teneur en quartz était égale à la fraction de sable du sol.

### 3.3.4. Efficacité des modèles d'estimation de la conductivité thermique.

Barry-Macaulay et al. [108] ont présenté dans leur travail une évaluation de l'efficacité de ces modèles de prédiction de la conductivité thermique du sol. Leur étude visait principalement à tester le réalisme des résultats (de la conductivité thermique) obtenus par ces modèles en les comparant avec des valeurs mesurées. Donc, ils ont comparé la conductivité thermique expérimentale de 27 types de sols rapportée par Barry-Macaulay [128], Barry-Macaulay et al. [127] et Kersten [118] à la conductivité thermique calculée par les quatre modèles présentés dans la 3.3.1. Dans un premier lieu, l'inspection visuelle a clairement indiqué que les quatre méthodes ont montré un bon accord avec les données expérimentales.

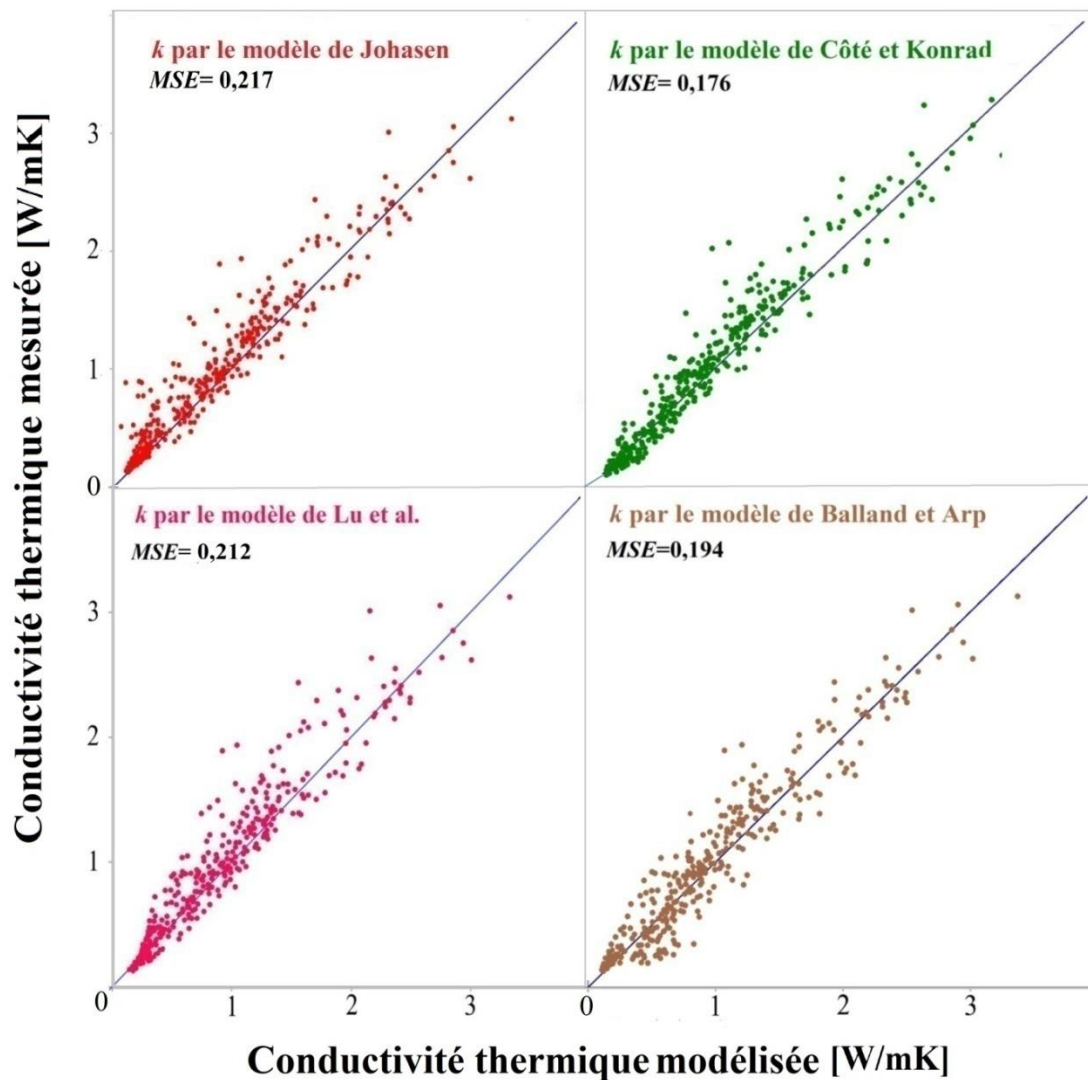
Ensuite, afin de déterminer quel modèle calcule le plus précisément la conductivité thermique, une analyse statistique a été effectuée. Ils ont alors procédé au calcul de l'erreur quadratique moyenne (MSE) pour cerner la précision statistique des modèles. Rappelons que le MSE (Mean Squared Error) est mesuré dans les mêmes unités que les données et représente l'écart type de l'échantillon, par conséquent il a été calculé dans leur travail comme suit :

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [k_{cal,i} - k_{mes,i}]^2}{N}} \quad (3.30)$$

Avec  $\rho_p$  : La densité des particules du sol.

$k_{cal,i}$  sont les valeurs prédites (modélisées),  $k_{mes,i}$  est la valeur expérimentale et  $n$  est le nombre de tests.

Il en a été conclu que le modèle de Côté et Konrad a fourni le meilleur ajustement aux données expérimentales. La figure 3.3. présente une comparaison des quatre méthodes utilisant les données de cette étude et les paramètres empiriques recommandés.



**Figure 3.** 3. Conductivité thermique expérimentale comparée à la conductivité thermique modélisée [108].

Par la suite Barry-Macaulay et al. ont détaillé la comparaison des quatre modèles, afin de mieux comprendre quel modèle fonctionne mieux avec quel type de sol et dans quelle configuration. Ils ont alors utilisé les mêmes critères de saturation adoptés par Farouki [107] avec chaque classe de sol divisée en trois plages de saturation différentes :  $S_r < 0,1$ ,  $0,1 < S_r < 0,2$  et  $S_r > 0,2$ .

Cette analyse a révélé que :

- Les modèles de Lu et al. et Côté et Konrad ont prédit le plus précisément la conductivité thermique des sols à grains fins et grossiers respectivement.
- À des saturations comprises entre 0,1 et 0,2, les valeurs modélisées avaient toutes tendance à sous-estimer la conductivité thermique mesurée des sols à grains grossiers.

Les modèles Balland et Arp et Côté et Konrad ont tous deux fourni un ajustement raisonnable aux données, mais le modèle de Lu et al. est devenu de moins en moins précis à mesure que la conductivité thermique des sols augmentait. On retiendra quand même, qu'ici l'utilisation du modèle de Balland et Arp est la plus favorable en raison de son MSE légèrement moins élevé.

- À des saturations supérieures à 0,2, le modèle de Balland et Arp a montré la meilleure corrélation suivi par Côté et Konrad et Lu et al.

Le tableau 3.4. résume les champs d'application de chaque modèle en fonction de la classe du sol ainsi que le degré de saturation.

**Tableau 3. 4.** Validité d'utilisation des modèles selon la classe du sol et la plage de saturation.

	Côté et Konrad	Lu et al.	Balland et Arp
<b>Sol à grains fins</b>			
$S_r < 0,1$	-	+	-
$0,1 < S_r < 0,2$	-	-	+
$S_r > 0,2$	-	+	-
$0 < S_r < 1$	-	+	-
<b>Sol à grains grossiers</b>			
$S_r < 0,1$	+	-	-
$0,1 < S_r < 0,2$	-	-	+
$S_r > 0,2$	-	-	+
$0 < S_r < 1$	+	-	-

Pour finir, le travail de Barry-Macaulay et al. [108] leur a permis de fournir une nouvelle version des paramètres empiriques employés dans chaque modèle de prédiction de la conductivité thermique. Le tableau 3.5. donne les valeurs modifiées des paramètres empiriques.

Dans le développement de notre outil, nous avons pris en considérations toutes ces hypothèses en appliquant le modèle, de prédiction de la conductivité thermique, adéquat à chaque classe de sol ainsi qu'à la plage de saturation. De plus, dans l'utilisation de ces modèles nous avons employé les paramètres empiriques avec les corrections apportées par Barry-Macaulay et al. [108].

**Tableau 3. 5.** Paramètres empiriques modifiés par [108].

Paramètres empiriques	Argile / Limon	Sables fin et moyen	Sable grossier
<i>Modèle de Côté et Konrad :</i>			
	2,20	5,6	6,5
<i>Modèle de Lu et al. :</i>			
$\alpha$	0,29	1,05	1,08
<i>Modèle de Balland et Arp :</i>			
$\alpha$	0.2	0,24	0,38
$\beta$	10	26	35

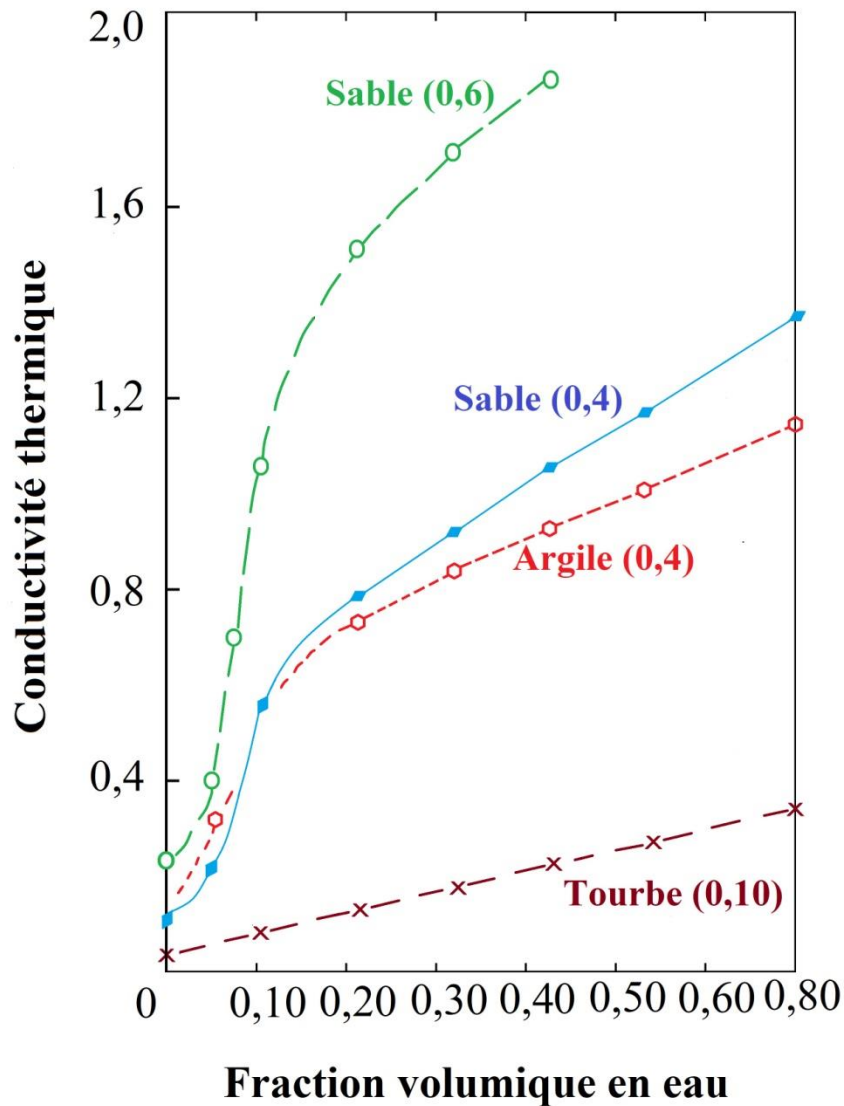
Dans le développement de notre outil, nous avons pris en considération toutes ces hypothèses en appliquant le modèle de prédiction de la conductivité thermique adéquat à chaque classe de sol, ainsi qu'à la plage de saturation. De plus, dans l'utilisation de ces modèles nous avons employé les paramètres empiriques avec les corrections apportées par Barry-Macaulay et al. [108].

### 3.3.5. Influence de l'humidité sur la conductivité thermique.

Comme précisé dans la section 3.3.2. la teneur en humidité d'un sol impacte fortement la conductivité thermique globale du sol étudié. Considérer la présence de l'humidité dans le sol en plus de sa variabilité saisonnière et du phénomène de changement de phase, accentue la complexité de la tâche de prédiction de la conductivité thermique, du fait que le problème ne soit pas linéaire.

Un grand nombre de travaux de recherche ont porté sur l'évaluation de l'influence de l'humidité présente dans le sol, sur sa conductivité thermique totale.

Dans le cadre de sa thèse de doctorat, Bel Hadj Salah [137] a présenté un modèle numérique bidimensionnel visant à quantifier le transfert de chaleur et de masse qui s'opère dans le sol. Il a considéré dans son travail que le transfert de chaleur était purement conductif et a négligé les autres types de transfert de chaleur. Donc, son approche impliquait nécessairement la détermination de la conductivité thermique ; il a procédé à une analyse comparative des valeurs de conductivité thermique mesurées de quatre classes de sols, selon leurs granulométries et a fait varier les fractions volumiques en eau. La figure 3.4. représente l'évolution de la conductivité thermique selon le taux d'humidité dans chacun des quatre sols.



**Figure 3. 4.** Conductivité thermique du sol en fonction de la fraction volumique d'eau [137].

### 3.4. Modèles gouvernant le transfert de chaleur dans le sol.

#### Théorie.

Le flux de chaleur du sol à la profondeur  $z$  est donné par la loi de Fourier de conduction thermique [138],

$$Q = k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.31)$$

Où  $Q$  [ $W m^{-2}$ ] est le flux de chaleur du sol,  $k$  [ $W m^{-1} K^{-1}$ ] est la conductivité thermique,  $T$  [ $K$ ] est la température du sol et  $z$  [ $m$ ] est la profondeur à partir de la surface du

sol. L'équation de conduction thermique unidimensionnelle verticale dans un milieu isotrope est [139]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.32)$$

Où  $t$  [s] est le temps et  $c_v$  [ $J m^{-3} K^{-1}$ ] est la capacité calorifique volumétrique. En supposant que  $c_v$  et  $k$  sont indépendantes de la profondeur, alors la diffusivité thermique du sol  $d = \frac{k}{c_v}$  [ $m^2 s^{-1}$ ] est une constante, donc l'équation (3.32) devient :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = d \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (3.33)$$

### Méthode d'amplitude et méthode de déphasage.

La température du sol mesurée à n'importe quelle profondeur peut être décrite par une onde sinusoïdale (Verhoef et al. [140]), de sorte que la température à  $z_1$  et  $z_2$  peut être exprimée comme suit :

$$T(z_1, t) = \bar{T}(z_1) + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (3.34)$$

$$T(z_2, t) = \bar{T}(z_2) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) \quad (3.35)$$

Où  $\bar{T}(z_1)$  et  $\bar{T}(z_2)$  sont les températures moyennes du sol aux profondeurs  $z_1$  et  $z_2$ , respectivement,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont les amplitudes de température et les déphasages aux profondeurs  $z_1$  et  $z_2$ , respectivement. Ces six paramètres peuvent être calibrés à partir des observations de température par la méthode des moindres carrés. De plus,  $\omega$  [ $rad. s^{-1}$ ] est la vitesse angulaire de rotation de la Terre :  $\omega = \frac{2\pi}{p}$  avec  $p$  (24 h) désignant la période du cycle fondamental. La diffusivité thermique du sol peut donc être déduite en utilisant les méthodes d'amplitude et de déphasage, à savoir :

$$d_A = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2 \left[ \ln \frac{A_1}{A_2} \right]^2} \quad (3.36)$$

$$d_P = \frac{\omega(z_1 - z_2)^2}{2(\varphi_1 - \varphi_2)^2} \quad (3.37)$$

En utilisant l'équation (3.34) comme limite supérieure, la solution de l'équation (3.33) peut être déduite comme [138],

$$T(z, t) = \bar{T}(z) + A_1 \exp[-B(z - z_1)]. \sin[\omega t + \varphi_1 - B(z - z_1)] \quad (3.38)$$

Où  $T(z)$  est la température moyenne du sol à la profondeur  $z$  et  $B = \sqrt{\frac{\omega}{2k}}$  correspond à la profondeur à laquelle le signal se propage pendant une période de  $p = 24h$  [141]. Combinant les équations. (3.31) et (3.38), le flux de chaleur à la profondeur  $z$  peut être calculé comme :

$$Q_s(z, t) = dc_v \frac{\Delta T}{\Delta z} + dc_v \sum_{i=1}^n \sqrt{2} A_i B \exp[-B(z - z_1)] \sin \left[ \omega t + \varphi_1 + \frac{\pi}{4} - B(z - z_1) \right] \quad (3.39)$$

Où  $\frac{\Delta T}{\Delta z}$  est le gradient de la température moyenne du sol.

### Méthode harmonique.

En supposant que les températures du sol mesurées à la limite supérieure peuvent être décrites par une série de Fourier [140], alors,

$$T(0, t) = \bar{T}(0) + \sum_{i=1}^n A_i \sin(i\omega t + \varphi_i) \quad (3.40)$$

Où  $\bar{T}(0)$  est la température moyenne à la surface du sol, et  $A_i$  et  $\varphi_i$  sont respectivement l'amplitude et le déphasage de l'harmonique  $i$ . A condition que  $\varphi_i$  soit constant, la solution analytique de l'équation (3.33) pour un profil de sol semi-infini est [138] :

$$T(z, t) = \bar{T}(z) + \sum_{i=1}^n A_i \exp(-B_i z) \sin(i\omega t + \varphi_i - B_i z) \quad (3.41)$$

Où  $B_i = \sqrt{\frac{i\omega}{2k}}$ , qui correspond à la profondeur à laquelle le signal se propage pendant une période de  $p/i$  [141]. En utilisant l'équation (3.40), la diffusivité thermique du sol  $d$  peut être estimée par un meilleur ajustement par moindres carrés de la température calculée à la température observée à la profondeur  $z$ . Combinant les équations. (3.31) et (3.41), le flux de chaleur du sol peut donc être calculé comme :

$$G_s(z, t) = dc_v \frac{\Delta T}{\Delta Z} + dc_v \sum_{i=1}^n \sqrt{2} A_1 B \exp[-B_i(z - z_1)] \sin \left[ i\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{4} - B_i(z - z_1) \right] \quad (3.42)$$

### Méthode de conduction-convection (CCM).

L'équation générale de transfert de chaleur suppose que la conductivité thermique et la diffusivité du sol sont indépendantes de la profondeur. En effet, comme le soulignent De Silans et al. [142], la teneur en eau du sol qui affecte les paramètres thermiques du sol varie en fonction du temps et de la profondeur. Par conséquent, Gao et al. [143] et Gao [144] ont incorporé des équations de conduction thermique et de convection en tenant compte de l'influence de la teneur en humidité du sol à savoir :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = d \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + W \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.43)$$

Où  $W$  est égal à la somme du gradient vertical de diffusivité du sol et de la densité du flux d'eau liquide. La solution analytique de l'équation (3.43) avec les conditions aux limites données par l'équation (3.34) avec une onde sinusoïdale est [143] :

$$T(z, t) = T_0 + A \exp \left[ \left( -\frac{W}{2d} - \frac{\sqrt{2}}{4d} \sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16d^2\omega^2}} \right) z \right] \times \sin \left[ \omega t - z \frac{\sqrt{2}\omega}{\sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16d^2\omega^2}}} \right] \quad (3.44)$$

La diffusivité thermique du sol déduite à l'aide du CCM est donc

$$d = - \frac{\omega(z_1 - z_2)^2 \ln(A_1/A_2)}{(\varphi_1 - \varphi_2) \left[ (\varphi_1 - \varphi_2)^2 + \ln^2(A_1/A_2) \right]} \quad (3.45)$$

Combinant les équations (3.31) et (3.44), le flux de chaleur peut donc être calculé à partir de la température observée.

$$G_s(z, t) =$$

$$dc_v \frac{\Delta T}{\Delta Z} + dc_v M A_1 \exp[-M(z - z_1)] \sin[\omega t + \varphi_1 - N(z - z_1)] - N A_1 \exp[-M(z - z_1)] \cos[\omega t + \varphi_1 - N(z - z_1)] \quad (3.46)$$

$$\text{Où } M = \frac{W}{2d} + \frac{\sqrt{2}}{4d} \sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16d^2\omega^2}} \text{ et } N = \frac{\sqrt{2}\omega}{\sqrt{W^2 + \sqrt{W^4 + 16d^2\omega^2}}}$$

### Flux de chaleur estimé par la méthode du gradient

En dehors des méthodes mentionnées ci-dessus, le flux de chaleur du sol unidimensionnel pour un milieu homogène est décrit par la méthode du gradient ([139] ; [145]) :

$$G_i^* = dc_v \left( \frac{T_{i,j} - T_{i,j-1}}{z_{i,j} - z_{i,j-1}} \right) \quad (3.47)$$

Où  $i$  est l'indice de temps et  $j$  l'indice de profondeur.

### 3.5. Conclusion

Maitriser le phénomène de transfert de chaleur dans le sol s'avère être une tâche ardue en raison du grand nombre de paramètres à considérer ainsi que des relations implicites qui les lient. Une modélisation efficace de ce phénomène s'articule autour d'une compréhension approfondie des concepts de base de la physique des sols.

De plus, une approximation réaliste des propriétés thermo-physiques des sols étudiés représente un atout majeur dans la précision des résultats relatifs à la réponse thermique. Ces propriétés sont basées sur des corrélations mathématiques.

Mathématiquement, la compréhension des mécanismes de transfert de chaleur dans le sol repose généralement sur la résolution d'équations à dérivées partielles très complexes dépendant de plusieurs variables et paramètres, avec des conditions initiales et aux limites spécifiques au cas étudié. Ce type d'équations ne pouvant être appréhendé par le cerveau humain, nécessite forcément l'intervention de l'outil informatique.

Le présent chapitre fait état de l'ensemble des corrélations visant à cerner les propriétés thermo-physiques des sols ainsi que les équations (EDP) gouvernant les transferts thermiques, et ce dans le but de développer un modèle similaire dans le prochain chapitre.

## **Chapitre 4 : Elaboration d'un modèle numérique.**

### **4.1.Introduction.**

La modélisation du transfert de chaleur au sol est compliquée par les nombreuses inconnues et les processus physiques complexes impliqués. Dans la plupart des cas, le transfert de chaleur est étroitement lié au transfert d'humidité dans le sol; par conséquent, un modèle précis doit au minimum impliquer l'influence de l'humidité sur la variation des propriétés thermo-physiques du sol étudié ou résoudre les deux problèmes simultanément.

Ce chapitre décrit le développement d'un modèle numérique bidimensionnel orienté vers le transfert de chaleur dans le sol. Cet outil représente un modèle numérique simple visant à prédire le comportement de la température dans le sol en contact avec les éléments d'infrastructure d'une construction, sa contribution consiste uniquement dans le traitement du terme du transfert de chaleur dû à la conduction.

Notre travail est basé sur l'hypothèse argumentée dans le chapitre 3, qui stipule que dans la majorité des cas, le transfert de chaleur par conduction est le plus dominant. C'est pourquoi l'outil présenté ici ne concerne que ce type de transfert de chaleur.

L'ensemble des étapes de transfert de chaleur conductif bidimensionnel au sol autour desquelles s'articule notre travail, a été introduit dans un algorithme pouvant parfaitement être injecté dans un logiciel commercial de multi-physiques qui fonctionne sur la base de la méthode des éléments finis. Cet algorithme est présenté à la fin de ce chapitre.

### **4.2.Les hypothèses.**

Le sol étant un matériau naturel changeant, dont la constitution varie selon un nombre de contraintes difficiles à appréhender simultanément (facteurs géographique, géologique, météorologique, composition chimique et physique...etc.), il est nécessaire d'émettre des hypothèses simplificatrices dans le but de faciliter la modélisation du phénomène étudié. Les hypothèses considérées dans le présent travail sont les suivantes :

- Le transfert de chaleur dans le sol est purement conductif.

- Le sol est hétérogène.
- Le sol est constitué de trois phases : solide, liquide et gaz.
- La matrice du sol est rigide et isotrope.
- La phase solide est constituée de grains ellipsoïdaux de diamètres égaux.
- La phase liquide du sol est constituée uniquement d'eau.
- Dans la modélisation, la géométrie du système considéré est divisée en plusieurs domaines, des propriétés thermo-physiques moyennes sont affectées à chaque domaine.
- L'influence de l'humidité n'est prise en compte que dans la prédiction des propriétés thermo-physiques.

### 4.3. Notions mathématiques.

L'outil numérique développé dans la présente thèse s'est fait au moyen de quelques notions mathématiques indispensables à la construction de ses différents termes. Cette section présente une brève introduction aux définitions mathématiques utilisées.

Soit une fonction décrivant un phénomène physique. Tout phénomène se déroule dans le temps  $t$  et dans l'espace dont les points peuvent être caractérisés par les coordonnées cartésiennes rectangulaires  $(x, y, z)$ . Ainsi dans le cas général  $u$  est une fonction à quatre variables :  $u = u(x, y, z, t)$ . En dérivant la fonction  $u$ , on obtient des dérivées partielles ...etc. Pour un phénomène donné, ces dérivées sont liées entre elles par des relations connues, ce qui nous conduit à des *Equations à Dérivées Partielles*.

Les plus importantes pour les applications physiques sont les équations différentielles dans lesquelles les dérivées partielles les plus élevées sont du second ordre (*Equations Différentielles de Second Ordre*). C'est dans cette catégorie que se rangent les équations de la dynamique des fluides, les équations de l'hydrodynamique, les équations des échanges thermiques et beaucoup d'autres. On s'explique ainsi le nom *d'Equations de la Physique Mathématique* qu'on donne aux équations aux dérivées partielles de second ordre.

Indiquons les types les plus importants de telles équations, pour le cas de deux variables indépendantes :

- *Equation des ondes à une dimension :*

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

Cette équation se rencontre lors de l'étude de nombreux phénomènes oscillatoires (vibrations transversales d'une corde élastique, vibrations longitudinales de la barre, vibration du gaz dans un tube... etc.)

- *Equation de la chaleur (équation de Fourier) :*

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (4.2)$$

Elle décrit le régime thermique transitoire. Cette équation est aussi liée à la propagation d'oscillations électriques qui a une allure analogue à celle des températures.

- *Equation de Laplace :*

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (4.3)$$

Elle décrit, au régime permanent, la répartition de la chaleur dans une géométrie plate bidimensionnelle.

Il n'y a pas de méthode générale pour résoudre de telles équations, il n'y a que des procédés particuliers (dits *Méthodes de la Physique Mathématique*) pour les intégrer dans de différentes conditions.

Pour faire plus simple, il est conseillé d'examiner le cas de deux variables indépendantes  $x$  et  $y$ , pour  $u = u(x, y)$  nous avons  $\frac{\partial u}{\partial x} = u_x$ ,  $\frac{\partial u}{\partial y} = u_y$ ,  $\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = u_{xy}$ ...etc. l'équation différentielle de second ordre, pour une fonction inconnue  $u$  se présente alors sous la forme générale suivante :

$$F(x, y, u, u_x, u_y, u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}) = 0 \quad (4.4)$$

Où  $F$  est une fonction connue.

Toute fonction  $u = \varphi(x, y)$  qui transforme l'équation (4.4) en une identité, s'appelle *Solution* de cette équation ; la présentation graphique de la solution porte le nom de surface intégrale.

En règle générale, les équations à dérivées partielles admettent une infinité de solutions. Quant à la solution d'un problème physique décrit par une équation différentielle

donnée, elle doit être univoque dans le sens, sinon elle ne permet pas de pronostiquer ce que sera le phénomène physique correspondant et est donc dépourvue d'intérêt pratique.

Aussi, pour la résolution de problèmes de physique on doit utiliser, en plus d'une équation différentielle, encore des conditions supplémentaires permettant d'extraire de l'infinité de solutions de l'équation différentielle donnée, sa solution unique qui fournit la loi de fonctionnement du phénomène physique considéré. Dans le cas le plus simple ce sont des conditions dites « *Initiales* » et « *Aux limites* ». Les premières caractérisent le phénomène donné à l'instant initial alors que les secondes décrivent le comportement du phénomène à la frontière du domaine considéré.

Si dans l'équation (4.4) la variable  $y$  est interprétée comme le temps, les conditions initiales les plus simples pour la fonction inconnue  $u$  se présentent sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u(x, y_0) = f(x) \\ u_y(x, y_0) = f_1(x) \end{cases} \quad (4.5)$$

Où  $f(x)$  et  $f_1(x)$  sont des fonctions données. Le problème de recherche de la fonction  $u$  qui satisfait à l'équation différentielle (4.4) et aux conditions initiales (4.5) est connu sous le nom de problème de Cauchy.

On dit qu'un problème physique décrit par une équation aux dérivées partielles, ainsi que par des conditions initiales et aux limites est bien posé, si :

- Ce problème a une solution.
- La solution du problème est unique.
- La solution dépend continûment des données du problème.

En effet, avant d'aborder la résolution d'un problème il faut s'assurer que ce problème est en général soluble. Si la troisième condition n'est pas satisfaite, il en résulte des conséquences indésirables. Du point de vue pratique, il n'est pas bon si des variations infimes des conditions initiales ou aux limites (en pratique elles ne sont connues que de façon approchée) provoquent une variation considérable de la solution du problème, dans le domaine considéré.

#### 4.4. Modèles de transfert de chaleur dans le sol.

Il existe deux approches macroscopiques du problème de transfert de chaleur dans les sols. On utilise la thermodynamique irréversible pour décrire les interactions des forces et des flux impliqués (Cary et Taylor [146] et [147] ; Jury [148]). L'autre méthode est une approche mécaniste régie par des équations de la physique mathématique qui représentent des modèles physiques des processus phénoménologiques se produisant dans le sol (Philips et de Vries [133], de Vries [132] , et Jury [148]). La deuxième approche est mieux adaptée pour le travail escompté (de Vries [149]).

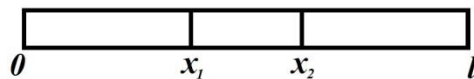
#### 4.5. Propagation de la chaleur dans le sol : Enoncé du problème de conditions aux limites.

Considérons une barre de longueur  $l$ , nous supposons que les pertes sont éliminées par isolation thermique de la surface latérale de la barre et qu'en chaque point de sa section transversale, la température est identique. Etudions le processus de propagation de la chaleur dans la barre.

Nous disposons de l'axe  $Ox$  de sorte que l'une des extrémités de la barre coïncide avec le point  $x = 0$  et l'autre avec le point  $x = l$  (Figure 4.1.). Soit  $T(x, y)$  la température dans la section de la barre d'abscisse  $x$  à l'instant  $t$ . On établit expérimentalement que la vitesse de propagation de la chaleur, c'est à dire la quantité de chaleur pénétrant la section par l'abscisse  $x$  au cours d'un intervalle de temps unité, est donné par la formule :

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} S \quad (4.6)$$

Où  $S$  désigne l'air de la section de la barre considérée,  $k$  le coefficient de la conduction thermique.



**Figure 4. 1.** Configuration de la géométrie unidimensionnelle considérée dans le sol.

Considérons l'élément de la barre, compris entre les sections d'abscisses  $x_1$  et  $x_2$  ( $x_2 - x_1 = \Delta x$ ). La quantité de chaleur passant par la section d'abscisse  $x_1$  au cours du temps  $\Delta t$  sera :

$$\Delta Q_1 = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_1} S \Delta t \quad (4.7)$$

De même pour la section d'abscisse  $x_2$  :

$$\Delta Q_2 = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_2} S \Delta t \quad (4.8)$$

L'apport de chaleur  $\Delta Q_1 - \Delta Q_2$  dans l'élément de la barre au cours du temps  $\Delta t$  sera égal à :

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 - \Delta Q_2 &= \left[ -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_1} S \Delta t - -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=x_2} S \Delta t \right] \\ &\approx k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Delta x S \Delta t \end{aligned} \quad (4.9)$$

Est dépensé pour élever la température de l'élément de la barre de la quantité  $\Delta T$  :

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 = c \rho \Delta x S \Delta T$$

Où

$$\Delta Q_1 - \Delta Q_2 \approx c \rho \Delta x S \frac{\partial T}{\partial t} \Delta l \quad (4.10)$$

Où  $c$  désigne la capacité calorifique de la substance de la barre,  $\rho$  la densité de la substance de la barre ( $\rho \Delta x S$  est la masse de l'élément de la barre).

En égalant les expressions (4.9) et (4.10) de la même quantité de chaleur  $\Delta Q_1 - \Delta Q_2$  nous obtenons :

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \Delta x S \Delta l = c \rho \Delta x S \frac{\partial T}{\partial t} \Delta l$$

Où

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

Désignant  $\frac{k}{c \rho} = a^2$ , nous obtenons en définitive :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.11)$$

C'est là l'équation de la *propagation de la chaleur* (équation de la chaleur) dans une barre homogène.

Pour que la solution de l'équation (4.11) soit entièrement déterminée, la fonction  $u(x, y)$  doit vérifier les conditions aux limites correspondant aux conditions physiques du problème. Les conditions aux limites pour la solution de l'équation (4.11) peuvent être diverses. Les conditions correspondant au *premier problème aux limites* pour  $0 \leq t \leq T$  sont les suivantes :

$$\begin{cases} t(x, 0) = \varphi(x) & (4.12) \\ t(0, t) = \varphi_1(t) & (4.13) \\ t(l, t) = \varphi_2(t) & (4.14) \end{cases}$$

Du point de vue physique, la condition (4.12) (*condition initiale*) correspond à ce que pour  $t = 0$  la température dans les différentes sections de la barre est donnée égale à  $\varphi(x)$ . Les conditions (4.13) et (4.14) (*conditions aux limites*) correspondent au fait qu'aux extrémités de la barre pour  $x = 0$  et  $x = l$  on maintient une température égale respectivement à  $\varphi_1(t)$  et  $\varphi_2(t)$ .

Il a été démontré que l'équation (4.11) a une solution unique dans le domaine :  $0 \leq x \leq l, 0 \leq t \leq T$  vérifiant les conditions (4.12), (4.13), (4.14).

#### **4.6. Propagation de la chaleur dans sol considéré dans un contexte tridimensionnel.**

Considérons le processus de propagation de la chaleur dans l'espace à trois dimensions. Soit  $T(x, y, z, t)$  la température au point de coordonnées  $(x, y, z)$  à l'instant  $t$ . On a établi empiriquement que la vitesse de passage de la chaleur par la surface  $\Delta s$ , c'est à dire la quantité de chaleur débitée durant l'unité de temps, est déterminée par la formule (analogue à la formule (4.6)) de la précédente section :

$$\Delta Q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \Delta s \quad (4.15)$$

Où  $k$  désigne le coefficient de conduction thermique du milieu considéré que nous supposons homogène et isotrope,  $n$  le vecteur unité orienté suivant la normale à la surface  $\Delta s$  dans le sens de la propagation de la chaleur. Nous pouvons écrire :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} \cos \alpha + \frac{\partial T}{\partial y} \cos \beta + \frac{\partial T}{\partial z} \cos \gamma$$

Où  $\cos \alpha$ ,  $\cos \beta$ ,  $\cos \gamma$  sont les cosinus directeurs du vecteur  $n$ , ou encore :

$$\frac{\partial T}{\partial n} = n \text{ grad } T$$

Portant l'expression  $\frac{\partial T}{\partial n}$  dans la formule (4.15) nous obtenons :

$$\Delta Q = -kn \text{ grad } T \Delta s$$

La quantité de chaleur, passant au cours du temps  $\Delta t$  par la surface  $\Delta s$  sera égale à :

$$\Delta Q = -kn \text{ grad } T \Delta t \Delta s$$

Revenons au problème posé plus haut. Dans le milieu considéré en isolant un petit volume  $V$  limité par la surface  $S$ . La quantité de chaleur s'écoulant par la surface  $S$  sera :

$$Q = -\Delta t \iint_S kn \text{ grad } T ds \quad (4.16)$$

Où  $n$  est le vecteur unité orienté suivant la normale extérieure à la surface  $S$ .

Remarquons que l'équation (4.16) donne la quantité de chaleur pénétrant dans le volume  $V$  (ou quittant le volume  $V$ ) au cours du temps  $\Delta t$ . La quantité de chaleur pénétrant dans le volume  $V$  sert à réchauffer la substance de ce volume.

Considérons un volume élémentaire  $\Delta v$ . Supposons qu'au cours du laps de temps  $\Delta t$  sa température soit élevée de  $\Delta T$ . Il est évident que la chaleur dépensée pour élever la température de l'élément  $\Delta v$  sera égale à :

$$c \Delta v \rho \Delta T \approx c \Delta v \rho \frac{\partial T}{\partial t} \Delta t \quad (4.17)$$

Où  $c$  est la capacité calorifique de la matière et  $\rho$  la densité. La quantité globale de chaleur dépensée à l'échauffement dans le volume  $V$  au cours du temps  $\Delta t$  sera :

$$\Delta t \iiint_V c \rho \frac{\partial T}{\partial t} dv \quad (4.18)$$

Mais c'est la quantité de chaleur débitée dans le volume  $V$  au cours du temps  $\Delta t$ , elle est déterminée par la formule (4.16). Nous avons ainsi l'égalité :

$$-\Delta t \iint_S k \mathbf{n} \text{ grad } T \, ds = \Delta t \iiint_V c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \, dv \quad (4.19)$$

En divisant par  $\Delta t$  nous obtenons :

$$-\iint_S k \mathbf{n} \text{ grad } T \, ds = \iiint_V c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \, dv \quad (4.20)$$

L'intégrale de surface du premier membre de cette équation peut être transformée d'après la formule d'Ostrogradsky en posant  $F = k \text{ grad } T$  :

$$-\iint_S (k \text{ grad } T) \mathbf{n} \, ds = \iiint_V \text{div}(k \text{ grad } T) \, dv \quad (4.21)$$

En remplaçant l'intégrale double de l'équation (4.20) par une intégrale triple nous obtenons :

$$-\iiint_V \text{div}(k \text{ grad } T) \, dv = \iiint_V c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \, dv \quad (4.22)$$

Où

$$\iiint_V \left[ \text{div}(k \text{ grad } T) + c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right] \, dv = 0 \quad (4.23)$$

Appliquant le théorème de la moyenne à l'intégrale triple du premier membre nous obtenons :

$$\left[ \text{div}(k \text{ grad } T) + c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \right]_{x=x_1, y=y_1, z=z_1} = 0 \quad (4.24)$$

Où  $P(x_1, y_1, z_1)$  est un point du volume  $V$ .

Comme nous pouvons considérer un volume arbitraire  $V$  dans l'espace à trois dimensions (Volume considéré dans le sol étudié), où s'effectue la propagation de la chaleur, et comme nous supposons que la fonction sous le signe d'intégration dans l'égalité (4.23) est continue, l'égalité (4.24) sera vérifiée en chaque point de l'espace. Ainsi :

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div}(k \text{ grad } T) \quad (4.25)$$

Mais

$$k \text{ grad } T = k \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{i} + k \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{j} + k \frac{\partial T}{\partial z} \mathbf{k} \quad (4.26)$$

Et

$$\text{div}(k \text{ grad } T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.27)$$

En injectant (4.26) et (4.27) dans (4.25) nous aurons :

$$-c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.28)$$

Si  $k$  est une constante, alors :

$$\text{div}(k \text{ grad } T) = k \text{ div}(\text{grad } T) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4.29)$$

Et l'équation (4.25) donne dans ce cas :

$$-c\rho \frac{\Delta T}{\Delta t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

En posant  $-c\rho \frac{\Delta T}{\Delta t} = a^2$ ,

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.30)$$

Sous une forme condensée, l'équation (4.30) s'écrit :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = a^2 \Delta T \quad (4.31)$$

Où  $\Delta = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$  est l'opérateur de Laplace.

L'équation (4.30) est l'équation de la propagation de la chaleur dans l'espace à trois dimensions. Pour trouver sa solution unique satisfaisant au problème posé, il faut se donner les conditions aux limites.

Supposons que nous ayons un corps  $\Omega$  dont la surface est  $\sigma$ . On considère dans ce corps le processus de propagation de la chaleur. A l'instant initial la température du corps est donnée. Cela correspond à ce que l'on connaît les valeurs de la solution pour  $t = 0$ , autrement dit les conditions initiales :

$$T(x, y, z, 0) = \varphi(x, y, z) \quad (4.32)$$

En outre on doit reconnaître la température en tout point  $M$  de la surface du corps  $\sigma$  en tout instant  $t$ , les conditions aux frontières :

$$T(M, t) = \varphi(M, t) \quad (4.33)$$

(D'autres conditions aux frontières sont possibles.)

Si la fonction recherchée  $T(x, y, z, t)$  ne dépend pas de  $z$ , cela correspond à ce que la température ne dépend pas de  $z$ , nous obtenons l'équation :

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.34)$$

Dite *équation de propagation de la chaleur dans le plan*. Si l'on considère la propagation de la chaleur dans un domaine plan  $D$  de frontière  $C$ , les conditions aux limites de même que (4.32) et (4.33) sont alors :

$$\begin{cases} T(x, y, 0) = \varphi(x, y) \\ T(M, t) = \psi(M, t) \end{cases} \quad (4.35)$$

Où  $\varphi$  et  $\psi$  sont des fonctions données,  $M$  un point de la frontière  $C$ .

Si la fonction  $T$  ne dépend ni de  $z$  ni de  $y$ , nous obtenons l'équation  $\frac{\Delta T}{\Delta t} = a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$  dite *équation de la propagation de la chaleur dans une barre*.

#### 4.7. Résolution du premier problème aux limites pour l'équation de la chaleur par la MDF.

De même que pour le cas des équations différentielles ordinaires, lors de la résolution des équations aux dérivées partielles par la méthode des différences finies, les dérivées sont remplacées par les différences correspondantes (Figure 4.2.) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \approx \frac{T(x+h, t) - T(x, t)}{h} \\ \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \approx \frac{1}{h} \left[ \frac{T(x+h, t) - T(x, t)}{h} - \frac{T(x, t) - T(x-h, t)}{h} \right] \end{array} \right. \quad (4.36)$$

Où

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \approx \frac{T(x+h, t) - 2T(x, t) + T(x-h, t)}{h^2} \quad (4.37)$$

D'une manière analogue

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \approx \frac{T(x, t+l) - T(x, t)}{l} \quad (4.38)$$

Le premier problème aux limites pour l'équation de la chaleur s'énonce de la manière suivante. On demande de trouver la solution de l'équation :

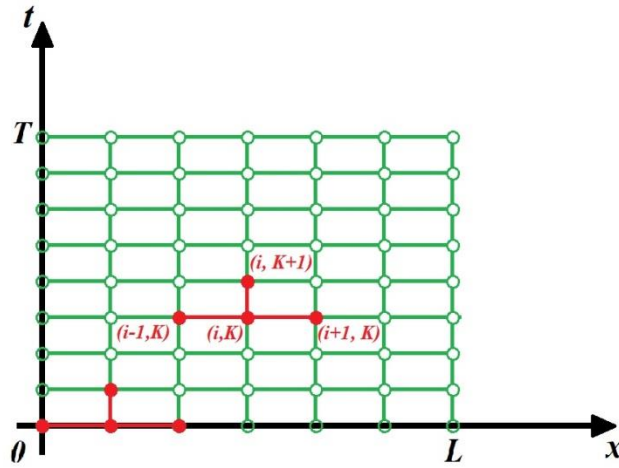
$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4.39)$$

Vérifiant les conditions aux limites :

$$T(x, 0) = \varphi(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (4.40)$$

$$T(x, 0) = \psi_1(x), \quad 0 \leq t \leq T \quad (4.41)$$

$$T(x, 0) = \psi_2(x), \quad 0 \leq t \leq T \quad (4.42)$$



**Figure 4. 2.** Les différences correspondantes aux dérivées dans la MDF.

C'est-à-dire de trouver la solution  $u(x, t)$  dans le rectangle délimité par les droites  $t = 0, x = L, t = T$  si l'on connaît les valeurs de la fonction recherchée sur trois de ses côtés :  $t = 0, x = 0, x = L$ . Couvrons ce rectangle d'une grille formée par des droites

$$x = ih, \quad i = 1, 2, \dots$$

$$t = kl, \quad k = 1, 2, \dots$$

Et déterminons les valeurs approchées des solutions aux nœuds de cette grille, c'est-à-dire aux points d'intersection de ces droites. Introduisons la notation :  $T(ih, kl) = T_{i, k}$ . Ecrivons au lieu de l'équation (4.39) l'équation correspondante en différences finies pour le point  $(ih, kl)$ . conformément aux formules (4.37) et (4.38) nous obtenons :

$$\frac{T_{i,k+1} - T_{i, k}}{l} = a^2 \frac{T_{i+1, k} - 2T_{i, k} + T_{i-1, k}}{h^2} \quad (4.43)$$

Définissons  $T_{i, k+1}$  :

$$T_{i, k+1} = \left(1 - \frac{2a^2 l}{h^2}\right) T_{i, k} + a^2 \frac{1}{h^2} (T_{i+1, k} + T_{i-1, k}) \quad (4.44)$$

Il découle de la formule (4.44) que si l'on connaît les trois valeurs dans la  $k$ -ième série:  $T_{i, k}, T_{i+1, k}, T_{i-1, k}$ , on peut déterminer la valeur de  $T_{i+1, k}$  dans la  $(k + 1)$ -ième série. nous connaissons toutes les valeurs sur la droite  $t = 0$  (Equation (4.40)). D'après la l'équation (4.44) nous déterminons les valeurs sur tous les points intérieurs du segment  $t = l$ .

Les valeurs aux extrémités de ce segment sont connues en vertu des équations (4.41) et (4.42). Ainsi nous déterminons rangée par rangée les valeurs de la solution recherchée pour tous les nœuds de la grille.

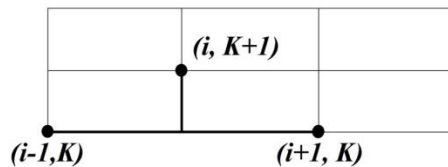
Il est démontré que l'on peut obtenir d'après l'équation (4.44) une valeur approchée de la solution non pas pour une valeur arbitraire du rapport des pas  $h$  et  $l$ , mais seulement dans le cas où  $l \leq \frac{h^2}{2a^2}$ .

L'équation (4.44) se simplifie particulièrement si le pas  $l$  suivant l'axe  $t$  est choisi de sorte que :

$$l - \frac{2a^2l}{h^2} = 0 \quad \text{ou} \quad l = \frac{2a^2l}{h^2} \tag{4.45}$$

Dans ce cas l'équation (4.45) prend la forme :

$$T_{i, k+1} = \frac{1}{2}(T_{i+1, k} + T_{i-1, k}) \tag{4.46}$$



**Figure 4. 3.** Section détaillée du maillage représentatif du sol considéré.

Cette formule est particulièrement commode pour les calculs (Figure 4.3.). On détermine par la méthode indiquée la solution aux nœuds de la grille. La valeur de la solution entre les nœuds de la grille peut être obtenue, par exemple, par extrapolation, en menant un plan par tous les trois points de l'espace  $(x, y, z)$ . Désignons par  $T_h(x, t)$  la solution ainsi obtenue à l'aide l'équation (4.46) après extrapolation. On démontre que :

$$\lim_{h \rightarrow 0} T_h(x, t) = T(x, t) \tag{4.47}$$

Où  $T(x, t)$  est la solution de notre problème. Il est également démontré que :

$$|T_h(x, t) - T(x, t)| < Mh^2 \tag{4.48}$$

Où  $M$  est une constante indépendante de  $h$ .

#### 4.8.Méthodologie de développement de l'outil.

##### 4.8.1. Transport d'air.

Le transfert d'air à travers un milieu poreux est implicitement inclus dans l'équation de conservation de l'énergie. Le flux d'air  $g_a$  est considéré comme constant. Dans le modèle actuel, le transport d'air est considéré individuellement dans le bilan massique de l'air sec, et l'équation de conservation peut donc être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot g_a = 0 \quad (4.49)$$

La loi de Poiseuille [150] reliant le gradient de pression à la vitesse d'écoulement de l'air s'écrit comme suit:

$$v = \frac{\bar{a}}{\mu_a} + \nabla P_a \quad (4.50)$$

Où  $\bar{a}$  ( $kg / m.Pa$ ) est la perméabilité à l'air du matériau,  $\mu_a$  ( $kg / m.s$ ) est la viscosité dynamique de l'air,  $P_a$  ( $Pa$ ) est la pression de l'air sec,

Le flux d'air est ensuite calculé via la relation suivante:

$$g_a = \rho_a v \quad (4.51)$$

$\rho_a$  ( $kg / m^3$ ) est la densité de l'air sec.

Par conséquent, le transport d'air sec peut être écrit en remplaçant l'équation (4.51) dans l'équation (4.49). Cela conduit à l'équation suivante:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} = v_a \nabla \rho_a \quad (4.52)$$

##### 4.8.2. Transfert de chaleur.

Le transfert de chaleur dans le sol se produit par conduction, convection et transfert de chaleur latente dû au changement de phase de l'eau. Selon de Vries [151], le transfert de chaleur dans un sol non saturé est dominé par la conduction pure, avec une petite addition par le transfert de chaleur latente.

Le problème du transfert de chaleur terrestre considéré ici, nécessite généralement la solution d'une équation gouvernante d'une forme similaire à celles ci-dessus, en fonction de la nature du problème, des hypothèses et du niveau de précision requis.

En considérant la conservation de l'énergie thermique dans un volume de contrôle représentatif, il est possible de dériver les équations fondamentales de conduction thermique. Par exemple, l'équation de conduction thermique peut être posée sous la forme générale suivante [152] :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(k \text{ grad } T) + Q_R \quad (4.53)$$

Où  $\rho$  est la densité du sol,  $c_p$  est la capacité thermique volumétrique,  $T$  est la température,  $t$  est le temps,  $k$  est la conductivité thermique et  $Q_R$  est la vitesse de génération de chaleur dans le milieu (énergie interne du corps).

L'équation (4.53) peut être recadrée en fonction de la géométrie et de la nature du problème. Par exemple, si la température du matériau n'est pas fonction du temps, le système est à l'état stationnaire. Si le matériau ne stocke pas ou ne génère pas d'énergie, la forme en régime permanent de l'équation de conduction bidimensionnelle en coordonnées rectangulaires est :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T = 0 \quad (4.54)$$

Mathématiquement, une fonction qui vérifie l'équation de Laplace (l'équation (4.3)) est dite harmonique et possède donc une fonction conjuguée. Donc à l'équilibre, (situation purement théorique)  $T$  devient une fonction harmonique et l'on suppose qu'il existe une fonction conjuguée  $v$  telle que  $T$  et  $v$  représentent respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de la fonction  $Q$  (flux conductif), holomorphe dans ce cas. On écrit :

$$Q = T + iv \quad (4.55)$$

Tel que  $i^2 = -1$  (complexes).

Considérer les équations (4.50) et (4.51) revient à dire qu'il existe des relations entre les dérivées partielles de la fonction  $T$  et celles de la fonction  $v$ . Ces relations désignent en mathématiques le système d'équations de Cauchy-Riemann, on écrit donc :

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial z} \\ \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \quad (4.56)$$

Les conditions initiales peuvent être déduites en approfondissant l'intégration du système d'équations (4.56). Toutefois, puisque la modélisation se rapporte généralement à des expériences existantes, il est conseillé de considérer les données météorologiques de valeurs de températures mesurées sur une période spécifique, comme les conditions initiales du problème étudié.

Alternativement, un problème de conduction thermique bidimensionnel transitoire avec la génération de chaleur interne nécessitera la solution de l'équation différentielle suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.57)$$

La solution de l'équation (4.57) est clairement très difficile et implique une non-linéarité matérielle. De plus amples détails sur la dérivation de ces équations et d'autres (et sur la solution numérique de diverses formes d'équations de transfert de chaleur) sont fournis ailleurs [152].

L'équation (4.57) peut être reformulée inversement sous la forme suivante :

$$\partial T = \frac{k}{\rho c_p} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \right] \partial t \quad (4.58)$$

Il suffit donc d'intégrer les deux membres de l'équation (4.58) pour avoir :

$$T(x, z, t) = \frac{k}{\rho c_p} \int (\nabla^2 T + Q) dt \quad (4.59)$$

Par souci d'affiner la précision des résultats de températures, nous avons opté pour l'introduction des deux points  $a$  et  $b$ , infiniment proches du temps  $t_i$  par la l'accroissement  $\varepsilon$ , à gauche et à droite, afin d'avoir une valeur moyenne sur l'intervalle  $[a, b]$ . On parle ici d'itérations.

$$T(z, t) = \frac{1}{2} \sum_{t_i}^{t_{i+1}} \int_a^b [K \nabla^2 T + Q] dt \quad (4.60)$$

Pour les problèmes transitoires, en l'absence d'une source de chaleur dans le milieu, le flux de chaleur se compose de deux parties, à savoir la conduction et la convection, respectivement:

$$q = q_{cond} + q_{conv} \quad (4.61)$$

La conduction est donnée par :

$$q_{cond} = -k \cdot \nabla T \quad (4.62)$$

Où  $T$  (K) est la température et  $k$  (W / m . K) est la conductivité thermique.

La convection de chaleur sensible et latente est donnée par:

$$q_{conv} = v \rho_a c_{p,a} \nabla T \quad (4.63)$$

Où  $\rho_a$  (kg / m<sup>3</sup>) est la densité de l'air sec et  $c_{p,a}$  (J / kg . K) est la chaleur spécifique de l'air sec.

L'équation du bilan énergétique peut s'écrire:

$$-\nabla q = c_{p,m} \rho_m \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (4.64)$$

Où  $c_{p,m}$  (J / kg . K) est la chaleur spécifique sèche du matériau,  $\rho_m$  (kg / m<sup>3</sup>) est la densité sèche du matériau.

Les équations (4.61) à (4.64) nous permettent de mettre l'équation générale du transfert de chaleur sous la forme suivante:

$$c_{p,m} \rho_m \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \nabla (k \cdot \nabla T) - v \rho_a c_{p,a} \nabla T \quad (4.65)$$

### 4.8.3. Equations de conditions aux limites

Le flux de chaleur à travers la surface extérieure donné ci-dessous comprend les effets de la conduction et de la convection.

$$q_e = \alpha_e (T^{eq} - T_{surf,e}) \quad (4.66)$$

Où  $\alpha_e$  est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface extérieure,  $T^{eq}$  est la température extérieure équivalente et  $T_{surf,e}$  est la température de la surface extérieure. De même, le flux de chaleur à travers la surface interne de l'enveloppe du bâtiment est donné par:

$$q_i = \alpha_i(T_i - T_{surf,i}) \quad (4.67)$$

Où  $\alpha_i$  est le coefficient de transfert de chaleur de la surface intérieure,  $T_i$  la température de l'air ambiant intérieur et  $T_{surf,i}$  la température de la surface intérieure.

#### 4.9. Approches mathématique pour la conductivité thermique

Dans la modélisation du système sol-structure étudié, la géométrie sera divisée en plusieurs sous-domaines et les calculs se feront par la méthode des éléments finis ; de façon à avoir une valeur de la température pour chaque nœud du maillage.

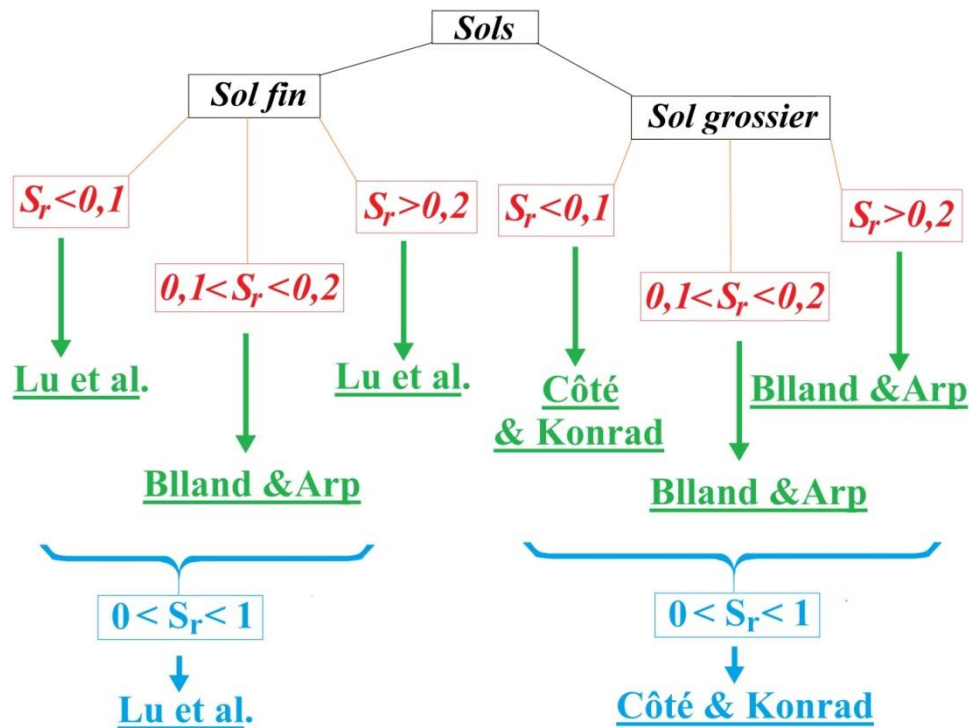
Puisque à chaque sous-domaine du système, seront affectées les propriétés physico-thermiques adéquates au matériau le constituant, il serait logique de désigner une conductivité thermique globale pour chaque sous-domaine aussi.

Dans cette perspective, nous optons dans notre travail pour un choix des valeurs de la conductivité thermique selon les approches fournies dans le chapitre 3, sections 3.3.3. et 3.3.4.

L'idée générale ici, est de se baser sur la classe du sol ainsi que sur l'intervalle du degré de saturation  $S_r$  du matériau qui constitue le sous-domaine considéré. Ainsi, il est indispensable d'intégrer d'abord un module qui s'articule autour de la conductivité thermique, à l'algorithme interprétant la totalité des séquences du modèle développé.

La modélisation de la conductivité thermique se fera selon les résultats de l'analyse comparative proposée par [108] détaillée dans le tableau 3.4.

La figure 4. 4. montre la méthodologie de sélection du modèle de prédiction de la conductivité thermique approprié à chaque matériau rentrant dans la constitution du sous-domaine modélisé dans le système sol-structure.



**Figure 4.** 4. Organigramme choix entre les différentes approches de prédiction de la conductivité thermique.

#### 4.10. Processus de modélisation avec un logiciel de simulation multi-physiques.

1. **Géométrie** : reprise graphique du système sol-structure étudié au moyen d'un logiciel de simulation numérique. La géométrie est divisée en plusieurs sous-domaines.
2. **Propriétés thermo-physiques** : Affecter à chaque sous-domaine les propriétés spécifiques au matériau qui le constitue (capacité calorifique, masse volumique, conductivité thermique estimée parallèlement selon la figure 4. 4.).
3. **Conductivité thermique** : Les valeurs des conductivités thermiques sont obtenues par l'application de modèles de prédiction de conductivité thermique adéquats aux matériaux rentrant dans la constitution des sous-domaines.
4. **Conditions initiales** : Importer des tableaux Excel contenant les valeurs de la température en fonction du temps, sur une période finie. Ce sont généralement des données météorologiques réelles observées par le modélisateur.
5. **Conditions aux limites** : Ce sont les domaines supposés représenter les limites supérieure, inférieure et latérales du système sol-structure étudié. On supposera que le

système est limité par un joint adiabatique en haut et qu'à partir d'une certaine profondeur la température se stabilisera autour d'une valeur constante moyenne.

6. **Maillage** : Puisque le logiciel calcule par la méthode des MEF, un maillage doit être réalisé. Plus les mailles sont nombreuses plus le calcul est précis.
7. **Durée de la simulation et pas de temps** : L'intervalle de temps adéquat à chaque modélisation, au bout duquel un nouveau calcul est exécuté par le logiciel commercial doit être spécifiée.
8. Injecter le modèle bidimensionnel de prédiction de la température.
9. Exécuter la simulation.
10. Exporter les résultats qui seront obtenus sous forme de courbes.

#### **4.11. Logigramme résumant les étapes de modélisation.**

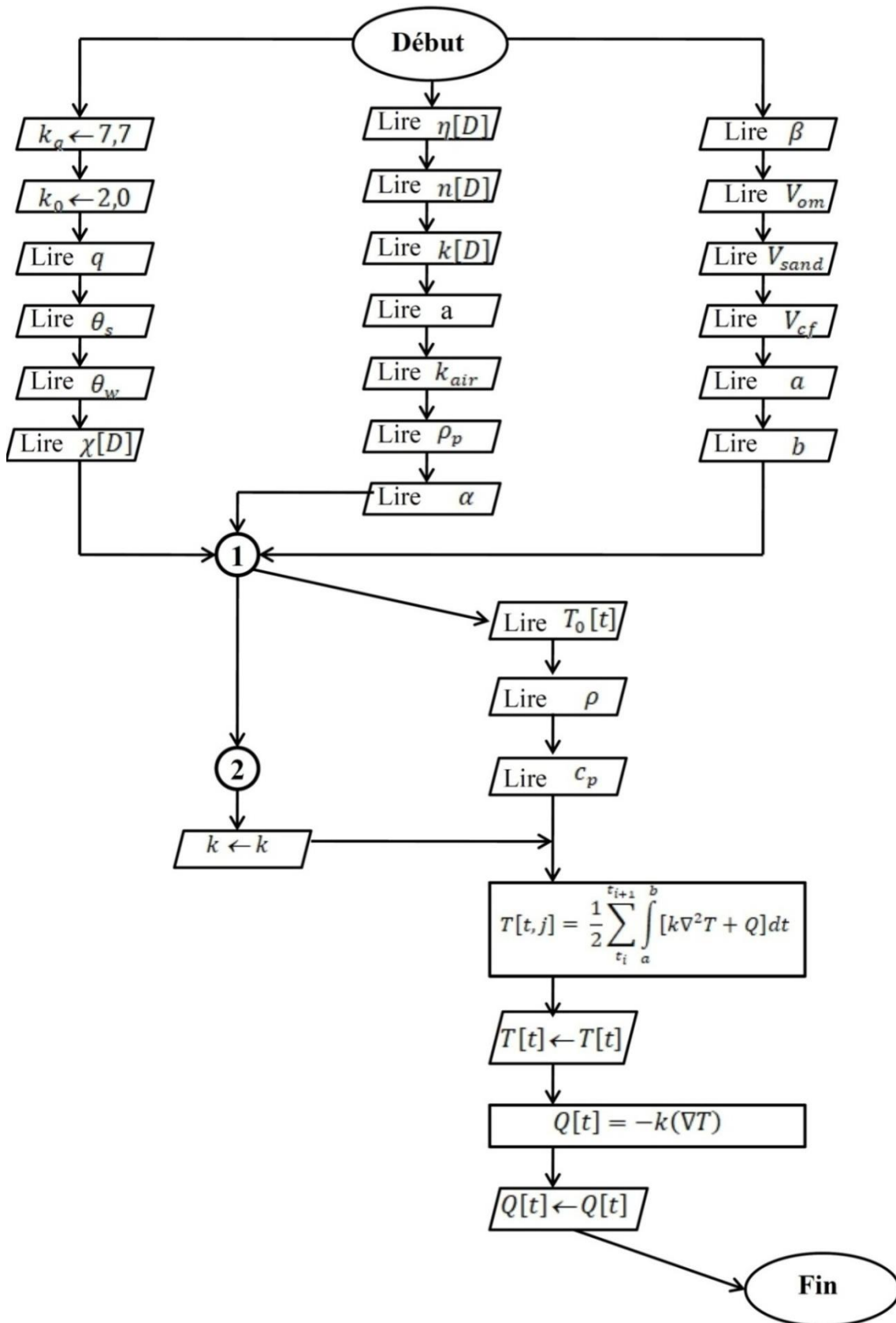


Figure 4. 5. Logigramme global de résolution de l'outil proposé

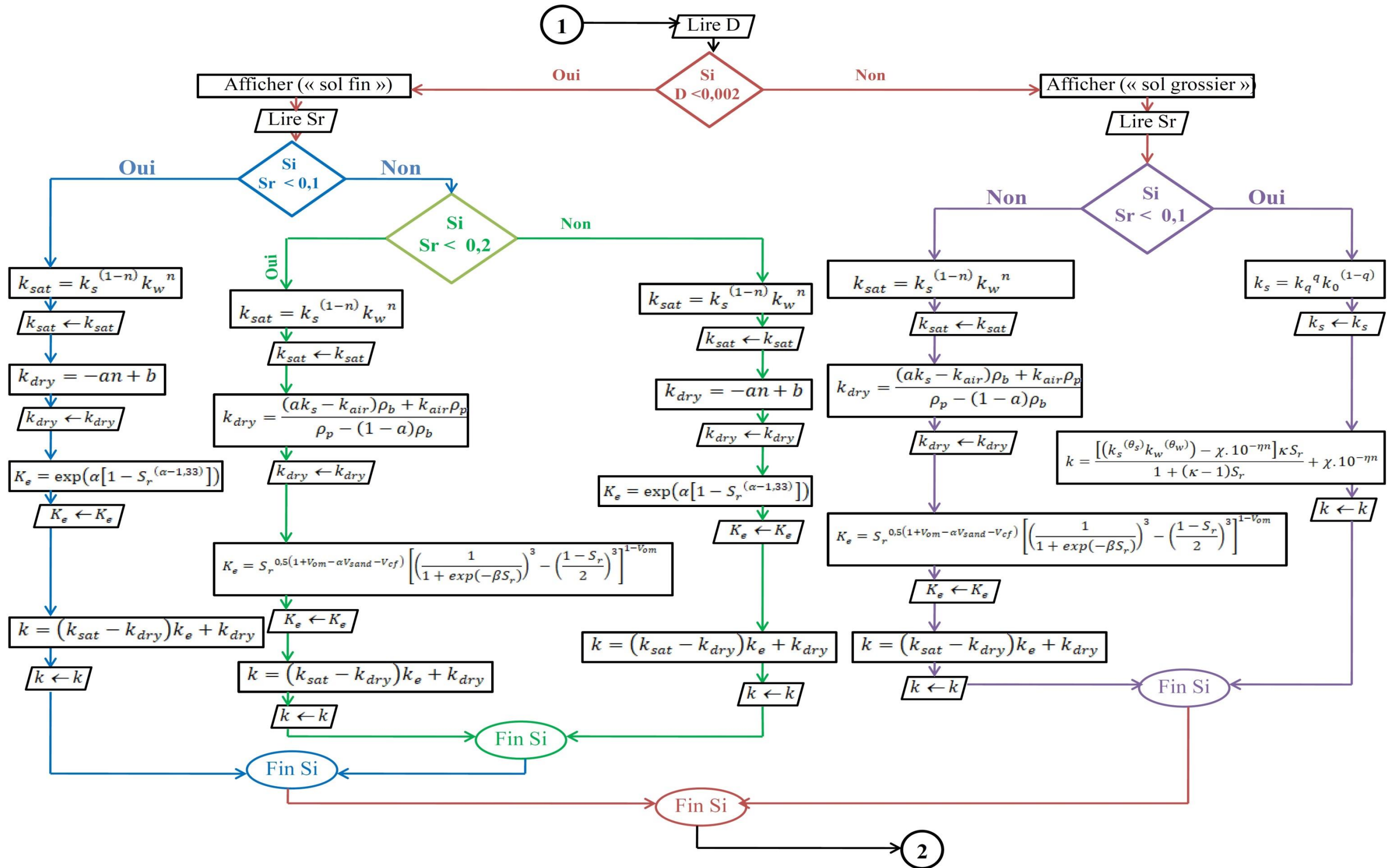


Figure 4. 6. Détails de la barre ①→② : Logigramme de modélisation de la conductivité thermique.

#### **4.12. Conclusion**

La complexité de la modélisation du phénomène de transfert de chaleur dans le sol nécessite la maîtrise de certaines notions basiques de la physique mathématique, dont découle la majorité des outils de modélisation existants dans la littérature.

Ce chapitre a d'abord passé en revue les équations à dérivées partielles principales qui se rapportent à la propagation de la chaleur dans des milieux considérés à différentes dimensions, pour en suite décrire le développement d'un modèle numérique bidimensionnel orienté vers le transfert de chaleur dans le sol.

L'outil développé représente un modèle numérique simple visant à prédire le comportement de la température dans le sol en contact avec les éléments d'infrastructure d'une construction. Il traite uniquement le transfert de chaleur par conduction, considéré comme le mode de transfert le plus dominant.

L'ensemble des étapes du développement du modèle bidimensionnel d'estimation de la température dans le sol, proposé ici, a été synthétisé dans un logigramme visant à avoir une lecture graphique globale du cheminement adopté.

## **Chapitre 5 : Implémentation et validation du modèle numérique.**

### **5.1. Introduction.**

Dans ce chapitre, le modèle numérique bidimensionnel d'estimation de température engendrée par le transfert de chaleur par conduction dans le sol, proposé précédemment, sera employé dans la simulation numérique de deux expériences existantes. Ces expériences représentent des dispositifs expérimentaux, réalisés dans le but d'observer le comportement thermique entre l'infrastructure et le sol adjacent. Les résultats obtenus feront l'objet d'une analyse comparative avec des résultats simulés dans le cadre de deux précédentes recherches, en plus des résultats relevés in-situ.

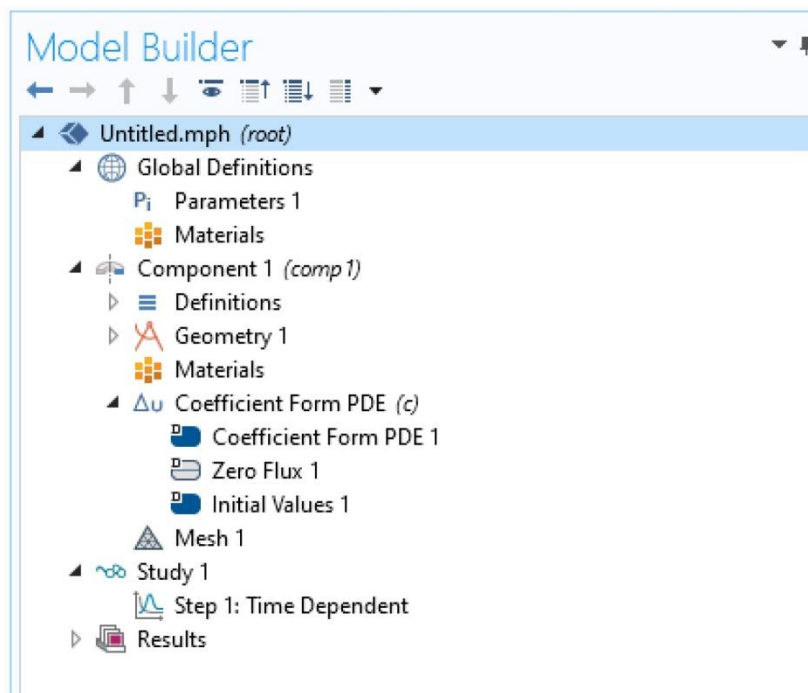
### **5.2. Présentation du logiciel COMSOL-Multiphysiques.**

Pour mener à bien la simulation numérique, nous avons utilisé COMSOL-Multiphysics ® V 5.2 qui est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis (Figure 5.1). C'est un outil qui offre un environnement interactif destiné à la modélisation et la simulation de nombreuses problématiques scientifiques et techniques. Plusieurs modules spécifiques et pré-conditionnés sont mis à la disposition des utilisateurs. Dans le présent chapitre, nous avons opté pour le module PDE (Equations aux Dérivés Partielles), en insérant les différents termes de l'équation générale de transfert de chaleur donnés en équation (4.65).

La simulation sous COMSOL se déroule en plusieurs étapes distinctes. La figure 5.1. montre une interface du logiciel indiquant le processus à suivre pour la résolution de l'équation (4.66) en utilisant le module PDE, à savoir :

- 1- Choix de la dimension de l'espace de travail (2D-axisymétrique)
- 2- Définitions globales (Saisie des paramètres liés notamment à la géométrie et aux matériaux).
- 3- Géométrie (Tracé de la géométrie en utilisant les différents outils de dessin disponibles).
- 4- Matériaux (Introduction des propriétés Thermo-physiques des différents matériaux utilisés).
- 5- Affectation des matériaux aux domaines géométriques correspondants.

- 6- Introduction des coefficients à dérivées partielles en fixant la T comme variable de calcul.
  - Introduction des conditions aux limites de température (affectées à chaque frontière).
  - Introduction des conditions initiales de température (affectées à chaque domaine).
- 7- Maillage de la géométrie.
- 8- Détermination de l'intervalle temps et du pas de calcul.
- 9- Exploitation des résultats (graphique, image, tableau ou vidéo ...).



**Figure 5. 1.** Interface de travail sous COMSOL et organigramme de la simulation.

### 5.3. Validation en contexte bidimensionnel : Expérience du Minnesota.

#### 5.3.1. Description du dispositif expérimental.

L'expérience du Minnesota consiste en une chambre de forme parallélépipède en béton contenant une installation de chauffage artificielle (Figures 5.2. et 5.3.). Les dimensions de la boîte sont d'environ 2,50 m de hauteur avec un plancher bas carré de 5,89 m de côté. Le tout fermé par le haut à l'aide d'un couvercle adiabatique.

Un isolant en polystyrène extrudé à haute résistance thermique a été placé au niveau des connexions entre les murs et le couvercle adiabatique pour diminuer les pertes de chaleur

au niveau des connexions. L'épaisseur des murs de béton et de la dalle de béton sont de 30,48 cm et 10,16 cm, respectivement. Il n'y a aucun acier de renfort.

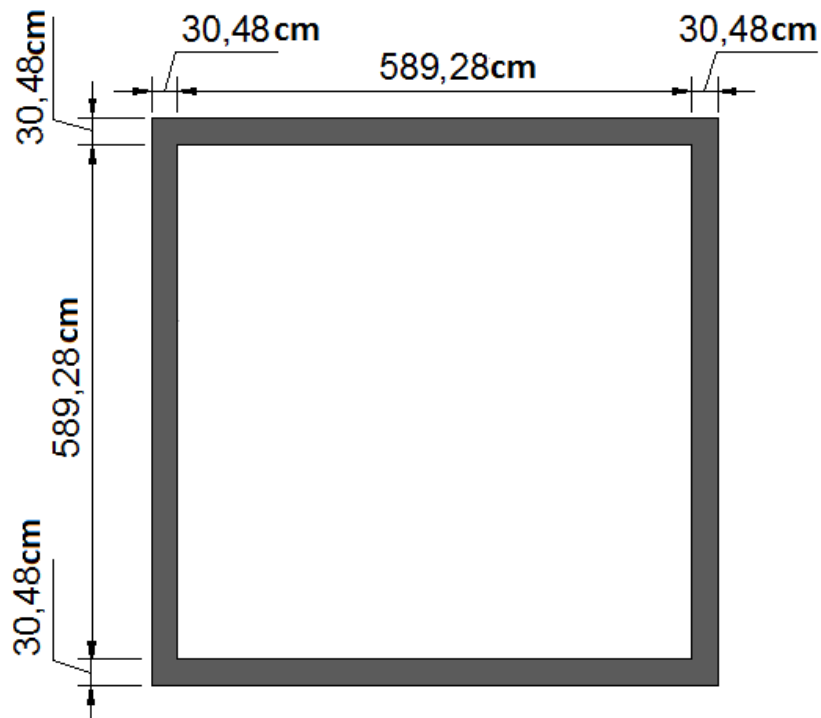


Figure 5. 2. Vue en plan de l'unité expérimentale.

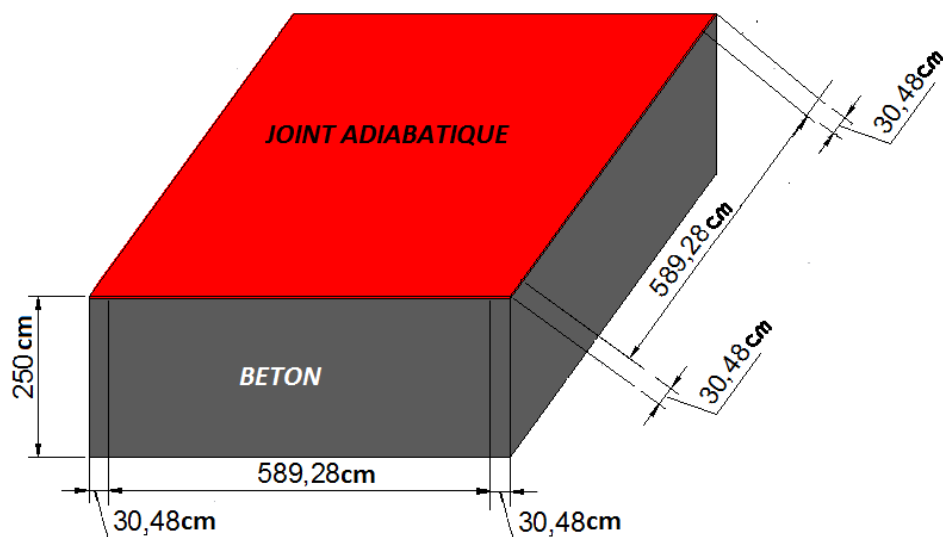


Figure 5. 3. Perspective 3D de l'unité expérimentale.

Cette boîte en béton est partiellement enterrée dans un sol se trouvant dans la région du Minnesota aux USA. Une excavation a été réalisée à une certaine profondeur puis remplie de sable au voisinage de la structure expérimentale. Le tout a été recouvert d'une couche de terre végétale (voir Figure 5.4.).

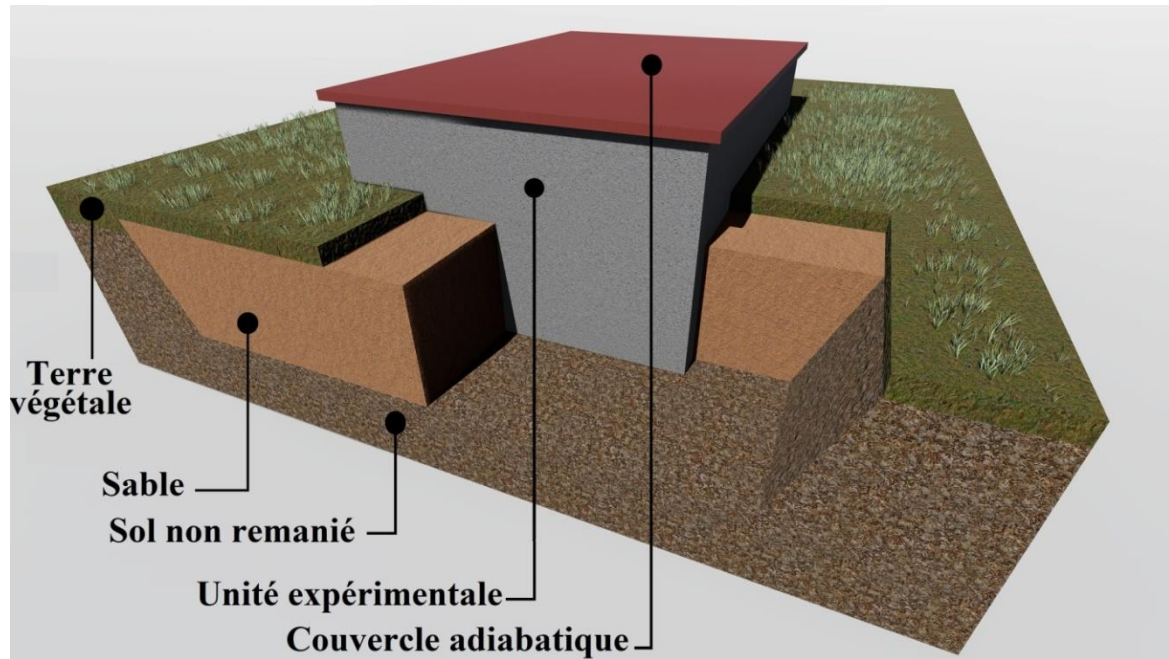


Figure 5. 4. Vue d'ensemble de l'expérience du Minnesota.

Deux sondes thermiques ont été fixées à différentes positions de l'interface mur-sol et une troisième à l'extérieur (voir Figure 5.5.).

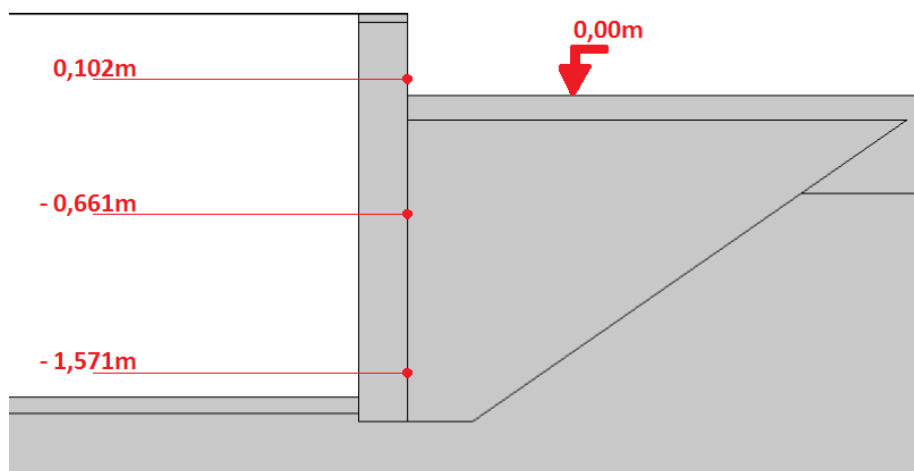


Figure 5. 5. Positions des sondes thermiques.

### 5.3.2. Géométrie.

La géométrie de la structure expérimentale en béton ancrée dans le sol est représentée en figure 5.6. en considérant les différents domaines la constituant. La structure étant parfaitement symétrique, l'étude ne considère que la moitié de la structure initiale. Ceci a pour avantage de réduire le temps de calcul lors de la simulation.

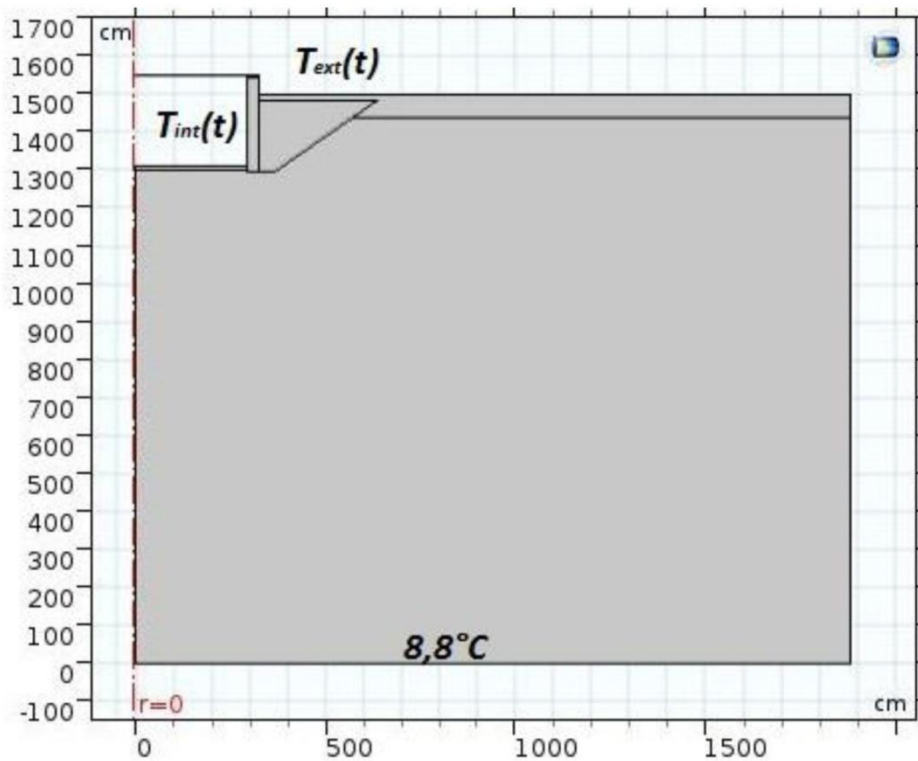


Figure 5. 6. Coupe de la structure/ COMSOL.

### 5.3.3. Propriétés thermo-physiques.

Ces propriétés ont été calculées par les approches théoriques disponibles dans la littérature. Les conductivités thermiques des couches de sol ont été calculées en se référant à l'approche de De Vries [105], détaillée plus haut.

Un matériau est affecté à chaque domaine de la géométrie avec ses propriétés thermiques spécifiques nécessaires à la simulation. Les travaux de Shipp [39] sur le site expérimental du Minnesota ont fourni une bonne indication sur la probable variation des propriétés thermo-physiques des matériaux. Ces mêmes valeurs ont été utilisées dans la présente simulation [Tableau 5.1.].

**Tableau 5. 1.** Propriétés thermiques des différentes couches du sol.

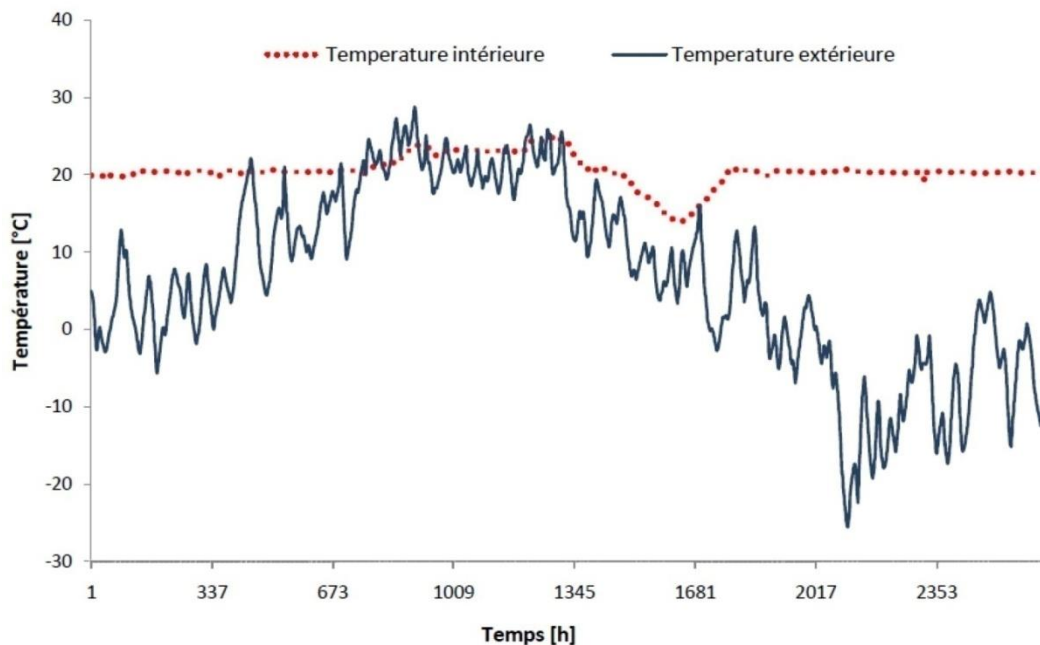
Matériaux	Masse volumétrique $\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$	Conductivité thermique $k[\text{W}/\text{mK}]$	Capacité volumétrique $C_p[\text{J}/\text{kg} \times \text{K}]$
Béton	2300	1,820	$6,391 \times 10^2$
Terre végétale	2700	0,942	$9,000 \times 10^2$
Sable	2650	1,178	$7,207 \times 10^2$
Sol non-remanié	2720	1,146	$6,875 \times 10^2$

### 5.3.4. Conditions aux limites et initiales

Les conditions aux limites extérieures ont été obtenues à partir des données climatiques de la région du Minnesota mesurées sur une période d'une année (Figure 5.7.). L'intérieur de la chambre est maintenu à une température autour de 20°C.

Une analyse préliminaire des données a indiqué qu'au delà de 10m en dessous du niveau naturel, la température du sol reste constante autour de 8,8°C. Cette valeur a donc été appliquée en tant que condition aux limites, fixe pour la surface inférieure du domaine.

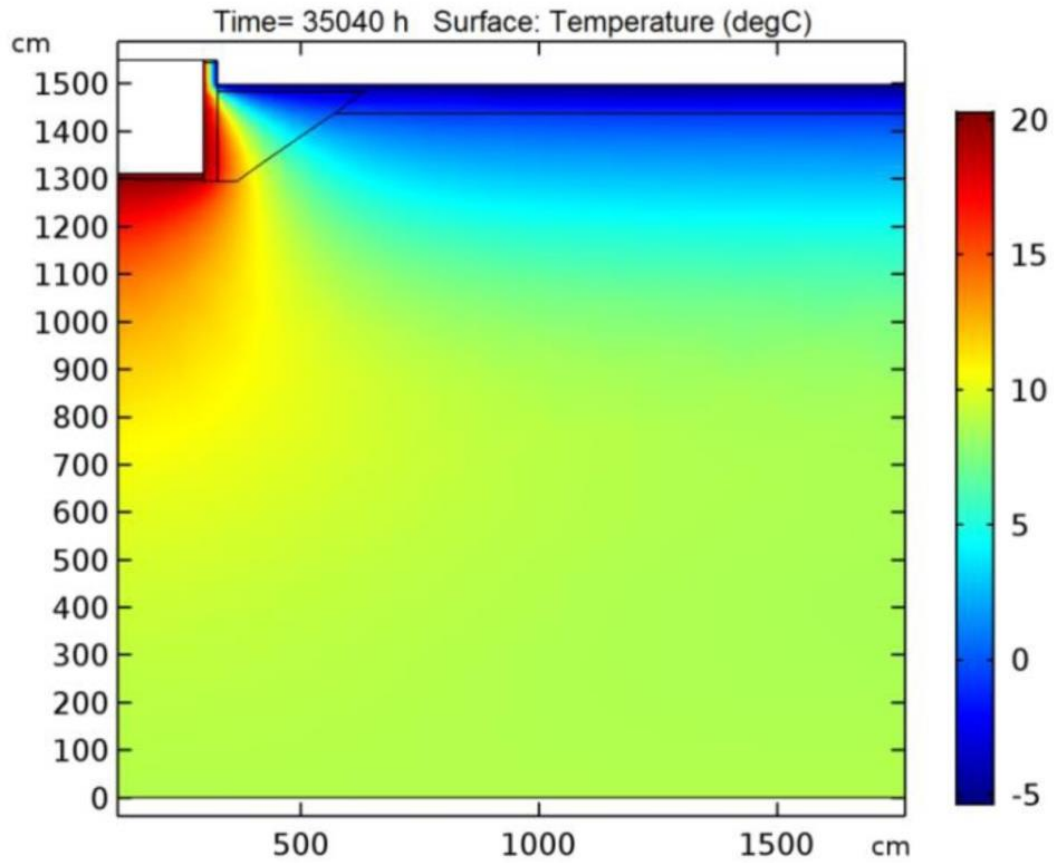
Les conditions initiales de simulation pour l'ensemble de la géométrie ont été fixées à 20°C.



**Figure 5. 7.** Conditions aux limites de température extérieure et intérieure [C°].

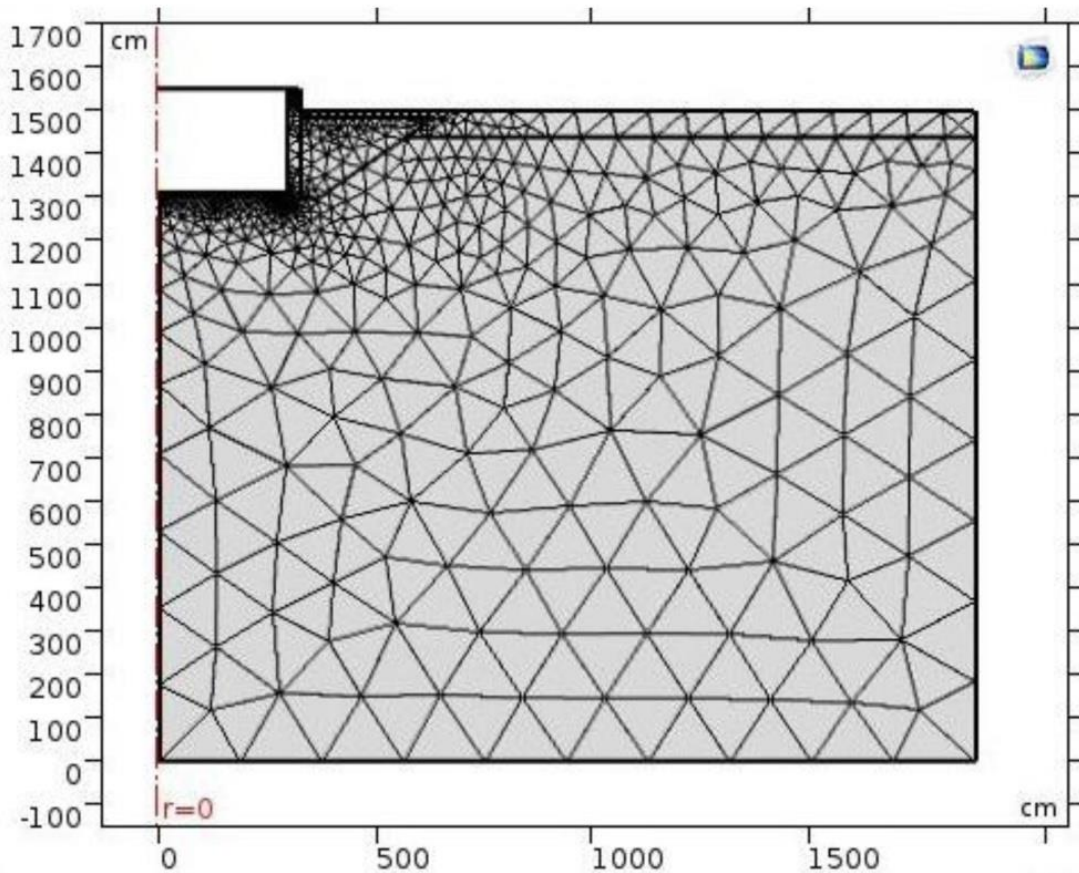
Afin de stabiliser les valeurs de la température simulée et de se rapprocher le plus possible des températures initiales de la structure réelle, le programme a été exécuté sur une

période de quatre années consécutives (0 à 35040 heure) (Figure 5.8.). La simulation effective ne démarre donc qu'à partir de la fin de la quatrième année et s'achève à la fin de la cinquième (35040 à 43800 heures).



**Figure 5. 8.** Conditions initiales de l'ensemble sol-structure [°C].

### 5.3.5. Maillage



**Figure 5. 9.** Maillage de l'ensemble sol-structure.

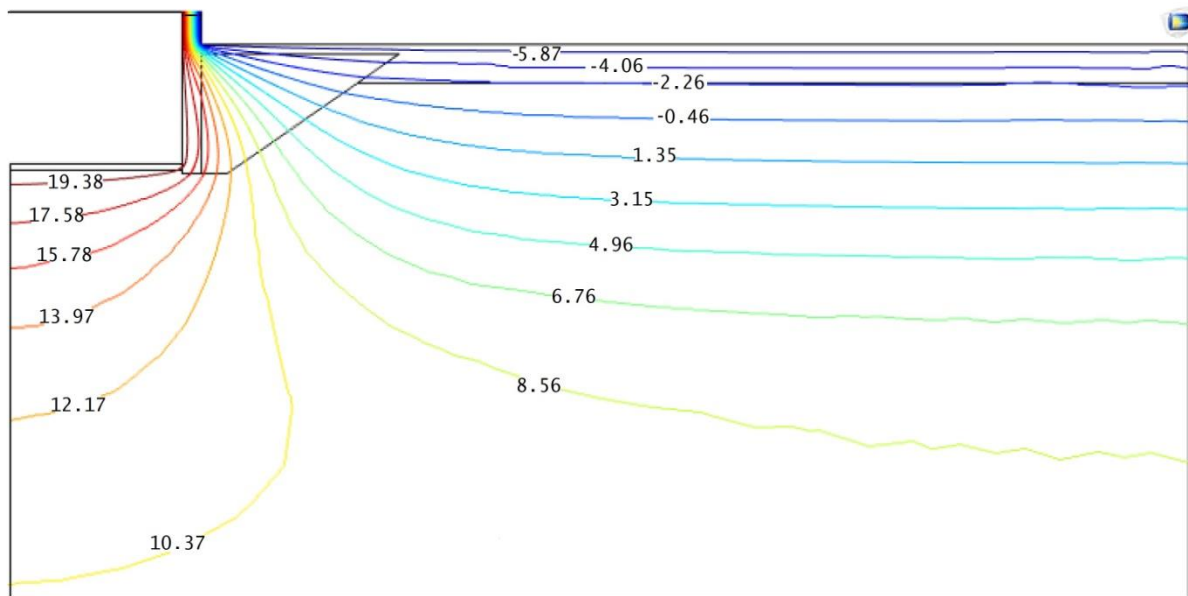
Le maillage employé est un maillage triangulaire qui consiste en 3787 éléments avec une qualité moyenne de l'ordre de 0.8166 (Figure 5. 9.). Le maillage a été affiné au niveau des interfaces sol-structure afin que les résultats obtenus soient les plus précis possible. Le temps de résolution sur un PC quadri-coeur CPU 2,40 GHz est d'environ 20 minutes, ce qui est acceptable.

### 5.3.6. Résultats de la simulation.

#### 3.5.6.1. Température.

La figure 5. 10. montre les contours de température (lignes isothermes) obtenus à la fin de la période analysée. Il est à noter que les résultats sont très similaires aux conditions initiales utilisées. Ce qui confirme la validité des hypothèses utilisées. Les températures les plus froides sont observées au niveau de la surface du sol ainsi qu'au côté extérieur du mur ce qui est logique puisque ces deux derniers sont en contact avec l'atmosphère et que la fin de la

simulation est dans la période hivernale. La température en profondeur ne descend pas sous la valeur de 10,37°C ce qui laisse entendre qu'à la fin de la simulation (période hivernale) le sol profond reste plus chaud qu'en surface. Les températures les plus élevées (entre 17,58°C et 19,38°C) se trouvent à proximité de la structure et sont justifiées par la présence d'une température constante d'environ 20°C à l'intérieur de la chambre.

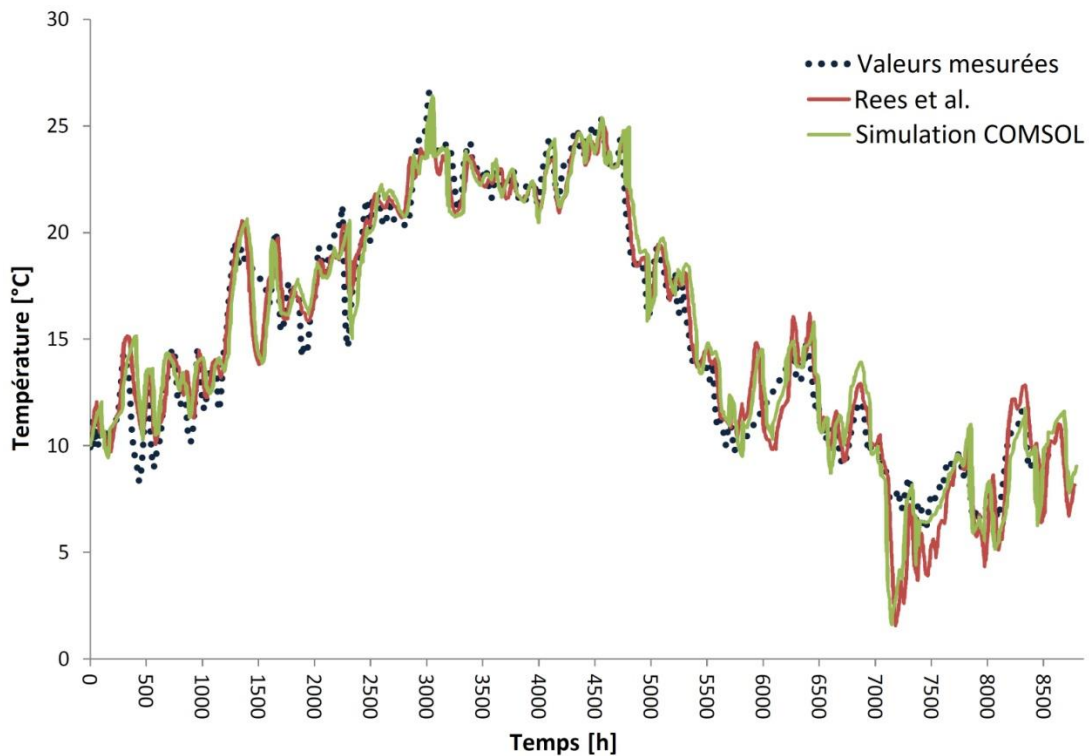


**Figure 5. 10.** Isothermes de température à 365 jours (fin de la simulation) [°C].

Les figures 5.11., 5.12. et 5.13. illustrent les résultats simulés, comparés avec les valeurs des températures mesurées et celles des températures obtenues à partir des résultats de simulation de Rees et al.[153].

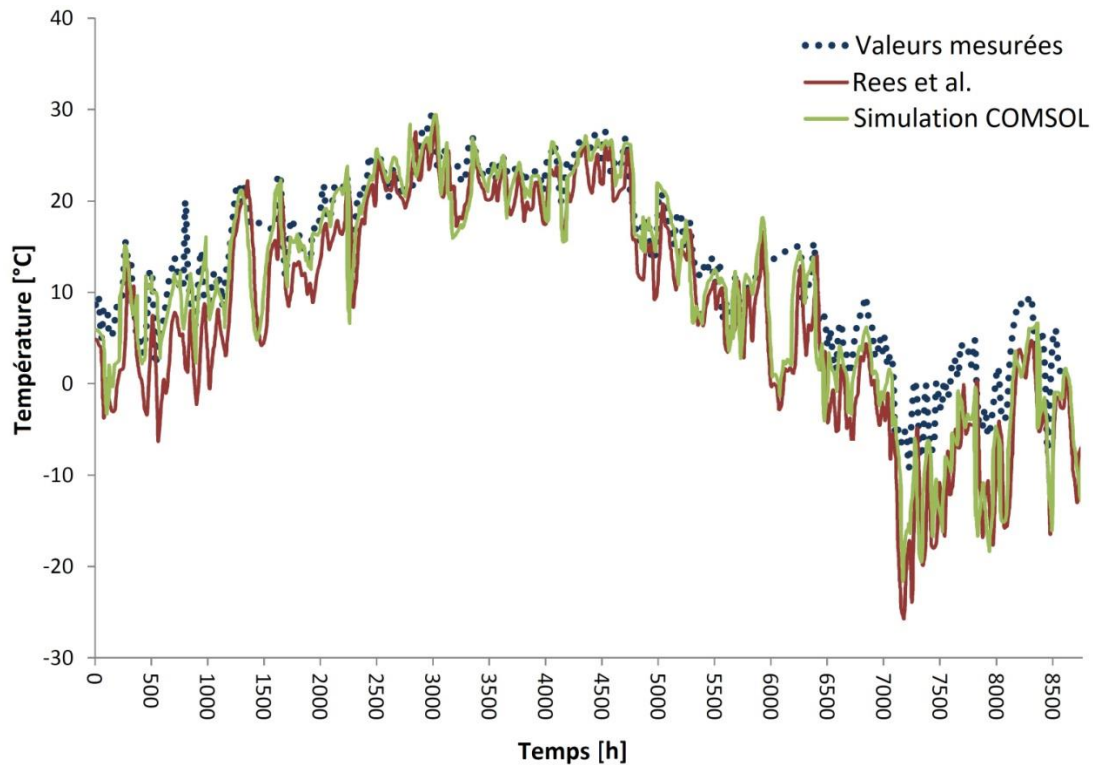
La figure 5.11., représente la variation de température à 1.02m au-dessus de la surface du sol. Les allures des trois courbes sont globalement concordantes et présentent une évolution similaire. Cependant, il est à noter qu'il y a une certaine disparité durant la partie la plus froide de l'année et que la corrélation entre les résultats est optimale au niveau des températures les plus élevées.

De plus, une inspection plus minutieuse des trois courbes dévoile que les résultats simulés au moyen du logiciel COMSOL enregistrent un écart moyen égal à 9.596% pour l'ensemble des points correspondants aux valeurs mesurées, qui reste moins important que celui enregistré entre ces dernières et les résultats obtenus de la simulation antérieure de Rees et al. [153].



**Figure 5. 11.** Profils des températures sur une période d'une année à 0,102m au-dessous du niveau naturel [°C].

La figure 5.12. représente les variations de la température enregistrées à 0.661 m sous la surface du sol. A cet emplacement du capteur, nous pouvons présumer qu'il y a eu un transfert de chaleur direct entre la structure et le sol. De même que pour la position du capteur de température précédente, nous notons, là aussi, que les aspects des trois courbes sont globalement semblables. Par ailleurs, les températures résultantes de la simulation à l'aide du logiciel COMSOL se rapprochent plus des valeurs de température mesurées avec un écart moyen de 4.915% inférieur à celui qui est observé entre la courbe des températures simulées par Rees et al. [153] et celle des valeurs mesurées in-situ.



**Figure 5. 12.** Profils des températures sur une période d'une année à 0,661m au-dessous du niveau naturel [°C].

La figure 5.13. illustre les résultats obtenus à une distance de 1.571m sous la surface du sol. A la différence des deux figures précédentes, une certaine altérité est observée entre les valeurs de température mesurées et les deux courbes de valeurs simulées et ce, même au début et malgré la tentative de reproduire une température initiale réaliste.

Dans l'ensemble, l'allure des trois courbes concorde au-delà du fait que les valeurs issues de la simulation via le logiciel COMSOL convergent vers les valeurs mesurées d'une manière plus marquée que les résultats de Rees et al. [153]. Les résultats simulés via COMSOL et ceux mesurés enregistrent un écart moyen de 1.767%.

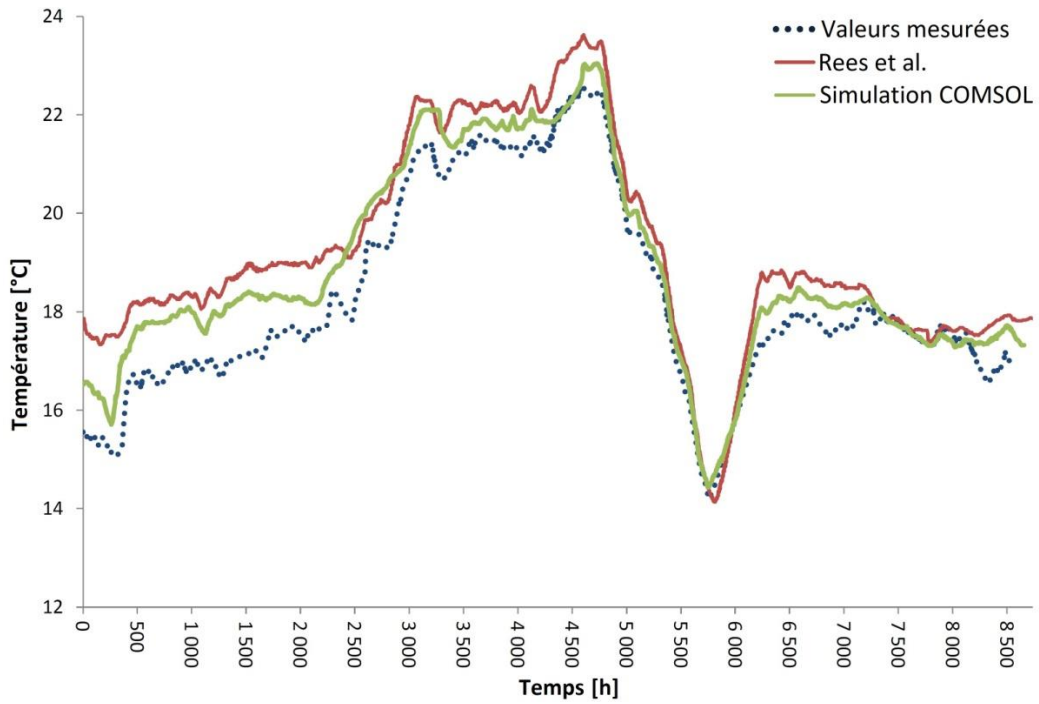


Figure 5. 13. Profils des températures sur une période d'une année à 1,571m en-dessous du niveau naturel [°C].

3.5.6.2. Flux de chaleur

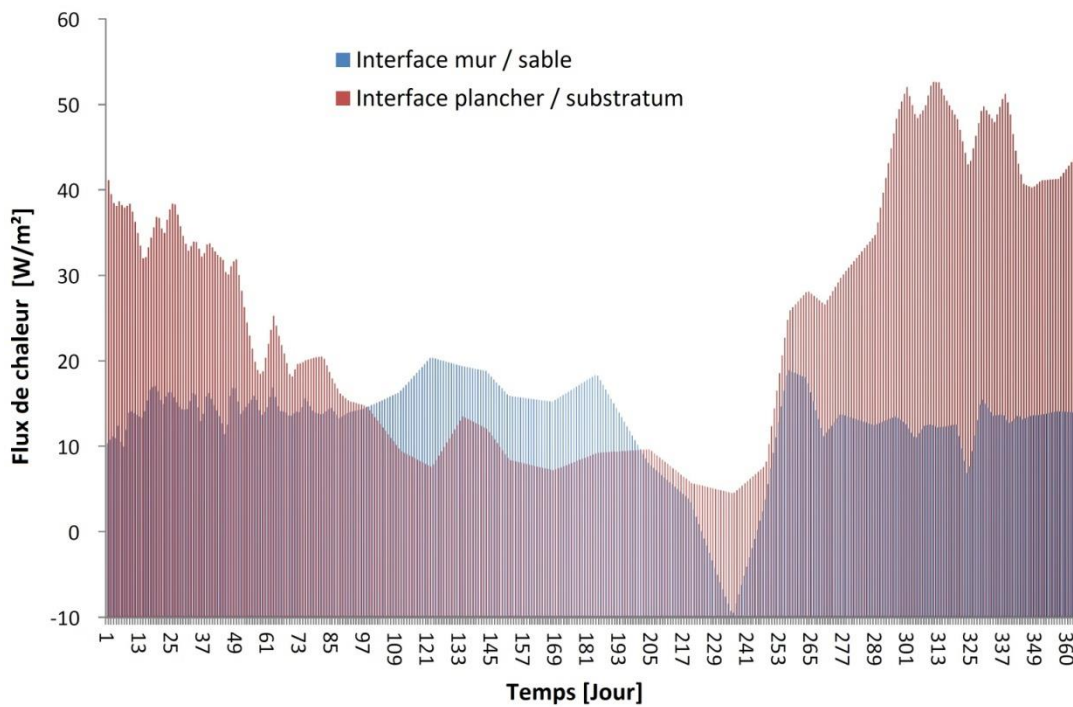


Figure 5. 14. Profils des flux de chaleur à travers les interfaces sol-structure.

La figure 5. 14. représente les fluctuations en fonction du temps du flux de chaleur qui traverse l'excavation remplie de sable en contact direct avec le mur, comparé au flux à l'interface du plancher et du sol non remanié. Les équations des conditions aux limites (4.65) et (4.66) ont été mises à contribution pour le calcul des flux entrants et sortants.

Il est à noter que les pertes de chaleurs au niveau du mur sont nettement moins considérables que celles qui s'opèrent au niveau du plancher bas. On enregistre un écart moyen de 6.9% entre les deux courbes en faveur de l'interface plancher-substratum.

On observe que le flux qui émane de la dalle est supérieur à celui qui traverse le mur durant toute l'année considérée, à l'exception de la période entre le jour 100 et le jour 200 c'est-à-dire entre la date du 08 Juin 1990 et celle du 16 Septembre 1990 qui est la période chaude de l'année.

Cette tendance nous a permis, à juste titre, de conclure que la présence de sable aux alentours de la structure enterrée permettrait de limiter les déperditions d'énergie, contrairement à l'éventualité de remettre le sol initialement excavé lors de la fouille.

Ceci peut s'expliquer par deux facteurs essentiels :

- La nature même du sable caractérisé par une forte porosité comparé au sol non remanié, la présence d'air dans le sable permet de limiter d'avantage les déperditions comparées à un autre sol plus dense et plus compact.
- La faible valeur de la conductivité thermique de la terre végétale 0,942 qui recouvre le sable contre 1,146 pour le sol non remanié.

Il n'est pas à exclure que la particularité du comportement du flux est due au fait qu'à cette période précise, les variations de températures, intérieures et extérieures, ont montré des allures très similaires et leurs valeurs étaient très rapprochées, avec une différence moyenne de 0,96°C comparée aux deux autres périodes hivernales dans lesquelles des différences de températures  $T_{int}$  et  $T_{ext}$  sont respectivement : 3,99°C et 6,37°C.

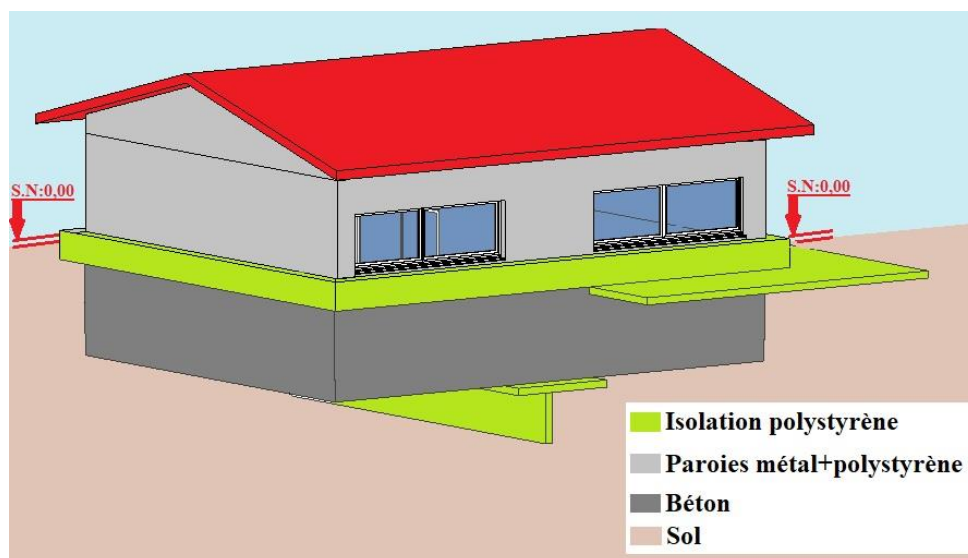
## 5.4. Expérience de la maison test japonaise.

### 5.4.1. Description du dispositif expérimental.

En septembre 1984, une maison d'essai à double usage a été construite sur le campus de l'Université de Tokyo, dans la ville de Sendai, au nord du Japon. La figure 5.15. montre la configuration globale de la maison d'essai.

La maison d'essai a deux salles, chacune avec une fenêtre orientée au sud au-dessus de la surface du sol et il y a un couloir entre les deux pièces. Les salles de test ont une profondeur de 5,4 m et une largeur de 2,7 m. La pièce du côté ouest est désignée comme pièce **C**; la pièce du côté est, comme pièce **D**. Les murs latéraux au-dessus de la surface du sol ont 0,2 m d'isolant en polystyrène expansé et des revêtements en métal pour finir la couche d'air qui relie l'air extérieur. Le mur faisant face au couloir et la cession de chaque pièce sont également isolés avec 0,2 m de polystyrène expansé. Toutes les fenêtres ont un double vitrage. Les fenêtres orientées au sud ont une hauteur de 0,8 m et une largeur de 2,56 m. Les petites fenêtres du mur nord ont une hauteur de 0,96 m et une largeur de 0,8 m. La figure 5.16. montre un plan d'étage de la maison d'essai.

Chaque chambre dispose d'un radiateur électrique contrôlé par thermostat. Les chambres ne disposent pas de systèmes de ventilation. Les fuites dans l'enveloppe du bâtiment ont été remplies de matériaux d'étanchéité. Les salles d'essais sont tellement étanches que les fuites d'air n'ont pas influencé les performances thermiques. Les résultats des mesures d'étanchéité à l'air ont été rapportés par Hasegawa et al. [154].



**Figure 5. 15.** Vue d'ensemble de l'expérience de la maison test japonaise.

Le niveau du plancher (bas) est à 1,3 m sous la surface du sol. Une partie des murs en béton, autour de la surface du sol, a une isolation de 0,1 m. Seulement la salle D est entourée d'une «isolation horizontale», 0,1 m de profondeur et 1,35 m de largeur à un niveau de 0,3 m sous la surface du sol. La chambre C n'a pas la même isolation. Le taux de transmission de chaleur total de chaque pièce hors sol par surface de plancher est de 1,01 kcal / m<sup>2</sup>hK. Plus d'informations sur la maison d'essai sont données dans Hasegawa et al. [154] et Yoshino et al.[155].

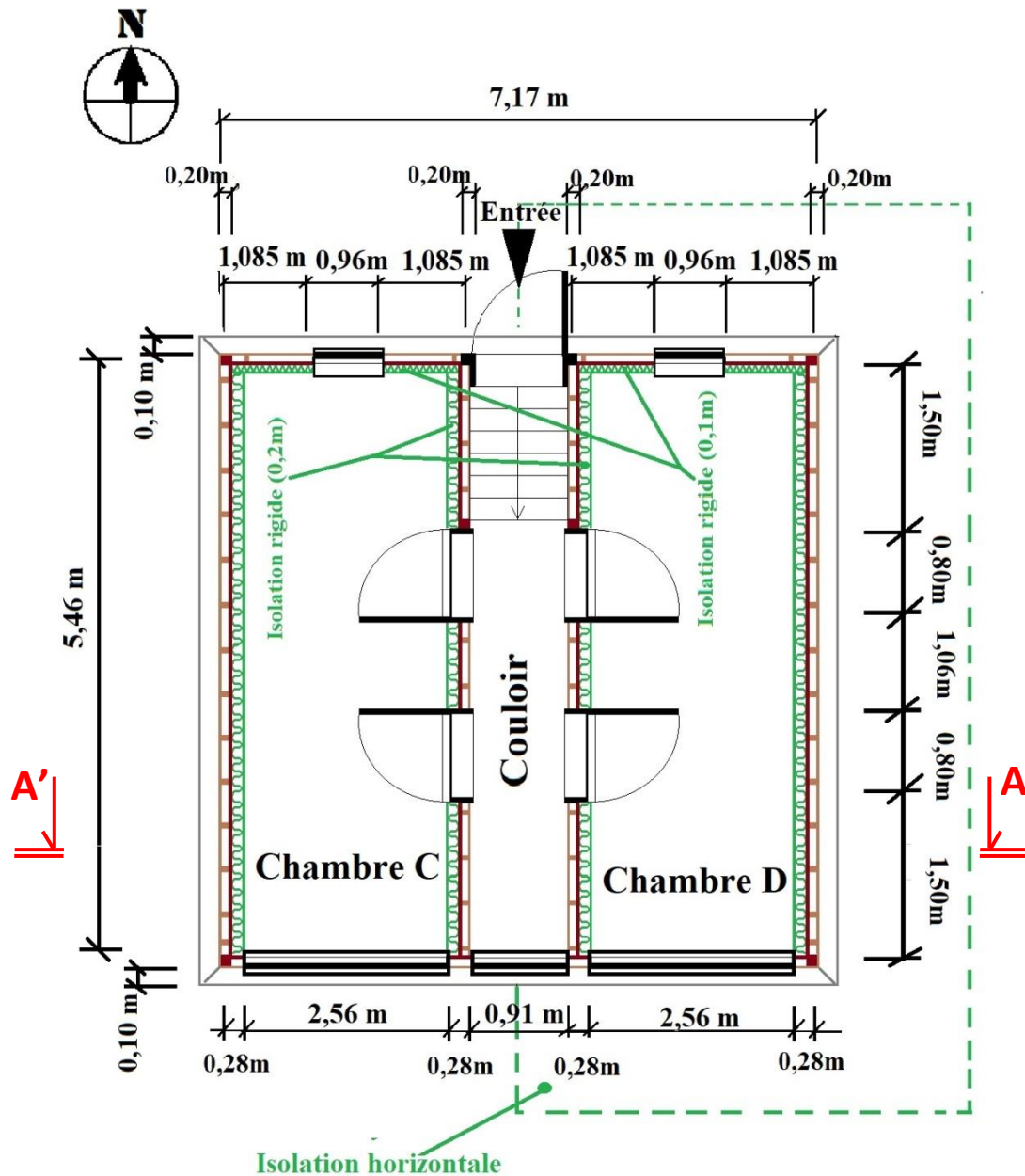


Figure 5. 16. Plan d'étage de la maison d'essai.

Quatre sondes thermiques ont été fixées à différentes positions de profondeur du sol adjacent à chacune des chambres (voir Figure 5.17. et Figure 5.18.). Ces valeurs de la température mesurées du sol seront, par la suite, comparées aux résultats des températures obtenues par la simulation.

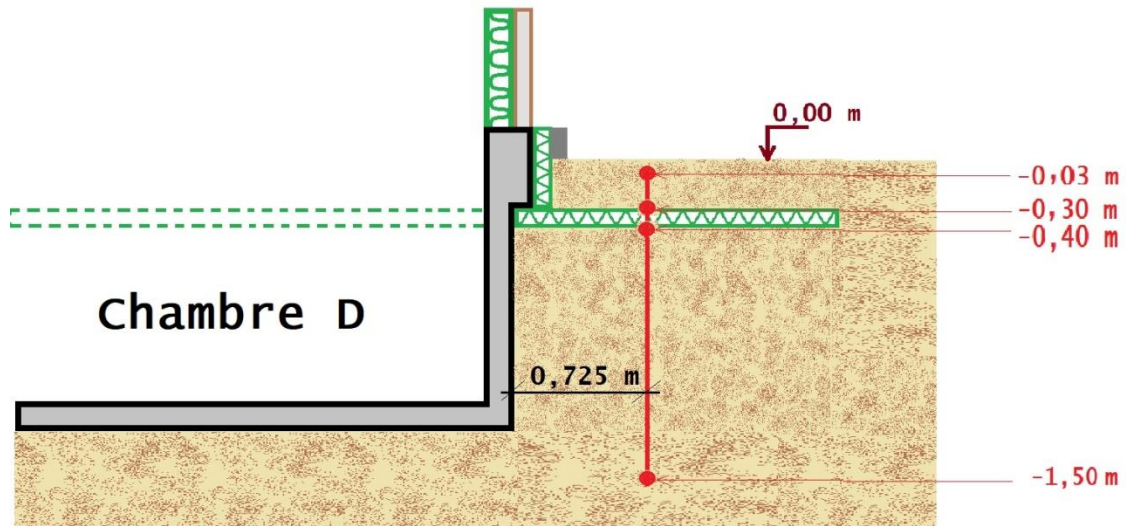


Figure 5. 17. Positions des sondes thermiques pour la chambre D.

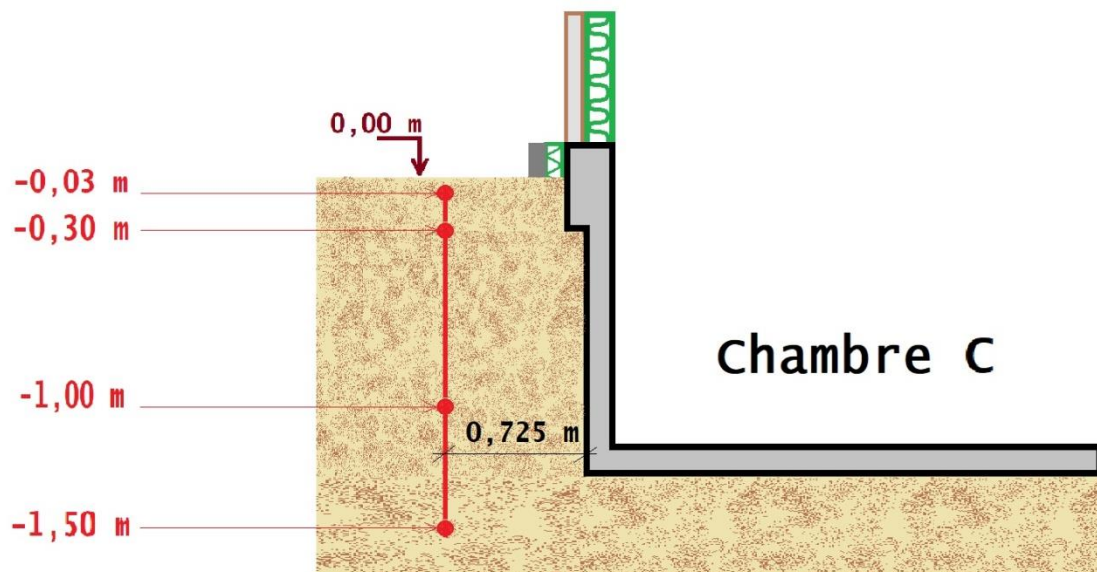
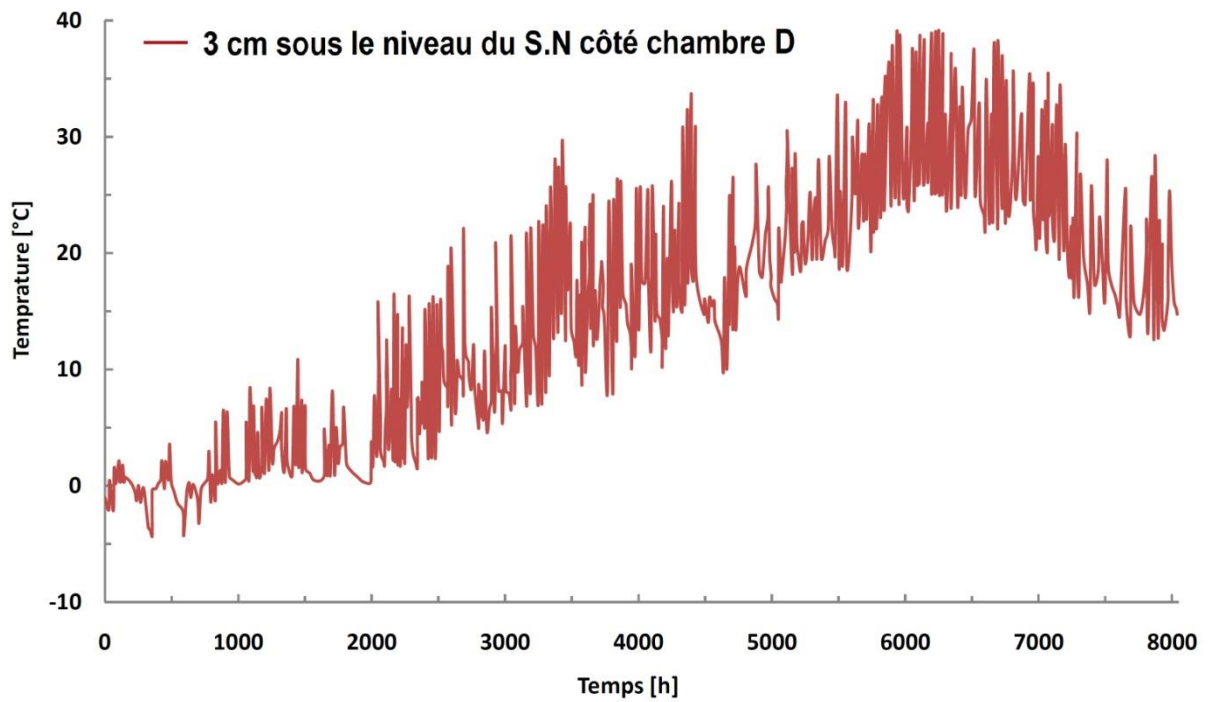
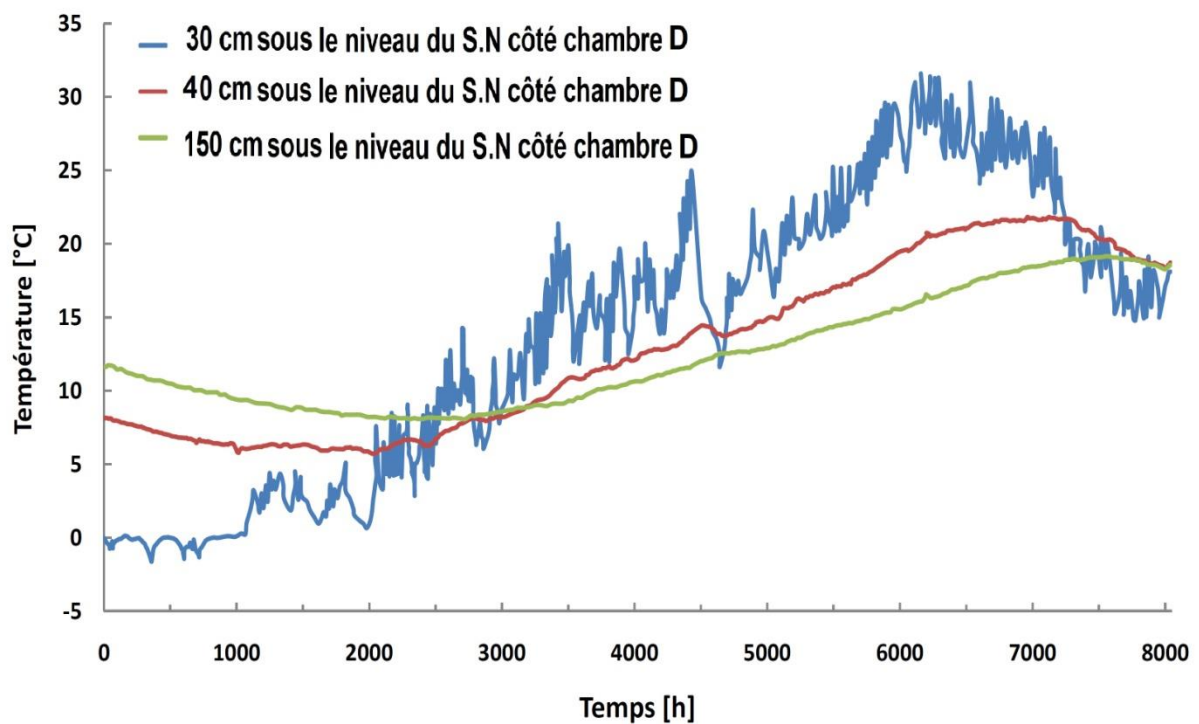


Figure 5. 18. Positions des sondes thermiques pour la chambre C.



**Figure 5. 19.** Valeurs mesurées de la température à une profondeur de 3 cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent à la chambre D].



**Figure 5. 20.** Valeurs mesurées de la température aux profondeurs 30 cm, 40cm et 150cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent à la chambre D].

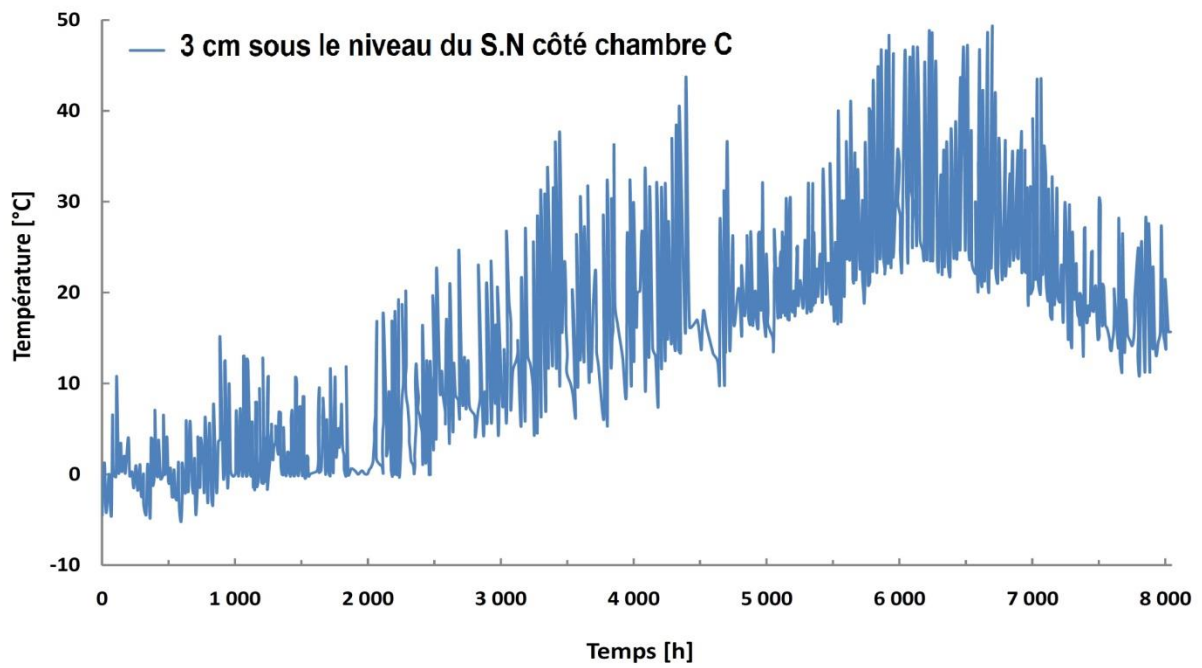


Figure 5. 21. Valeurs mesurées de la température à une profondeur de 3 cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent à la chambre C].

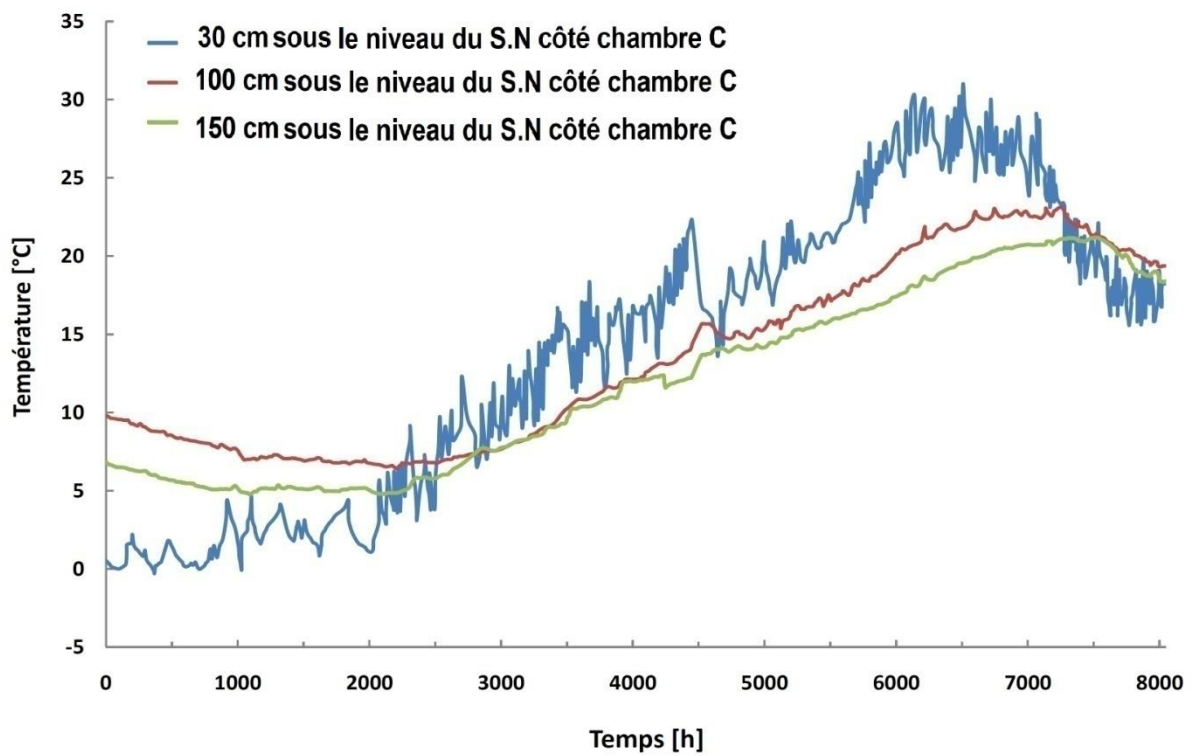
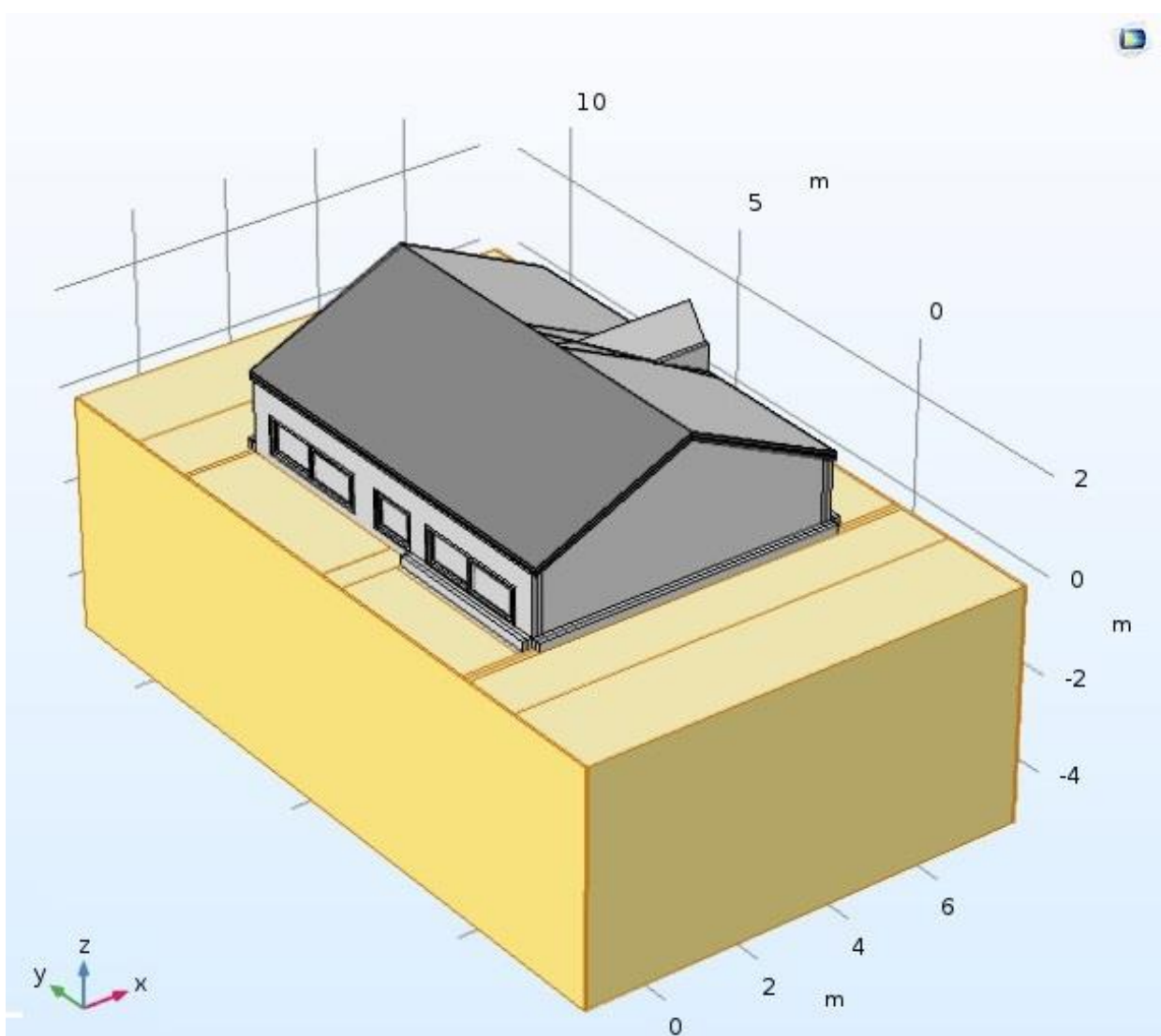


Figure 5. 22. Valeurs mesurées de la température aux profondeurs 30 cm, 100cm et 150cm sous le niveau du sol naturel [sol adjacent à la chambre C].

### 5.4.2. Géométrie.

La géométrie de la maison d'essai ancrée dans le sol est représentée en figure 5.23. en considérant les différents domaines la constituant.

Contrairement à l'application précédente, la configuration de ce cas d'étude n'étant pas symétrique, nous avons été dans l'obligation de modéliser la géométrie dans un concept tridimensionnel afin de n'omettre aucun détail structural pouvant fausser la précision des calculs. La géométrie finale modélisée dans le logiciel COMSOL Multiphysics contient: 197 domaines, 1276 faces, 2146 bords et 1085 points.



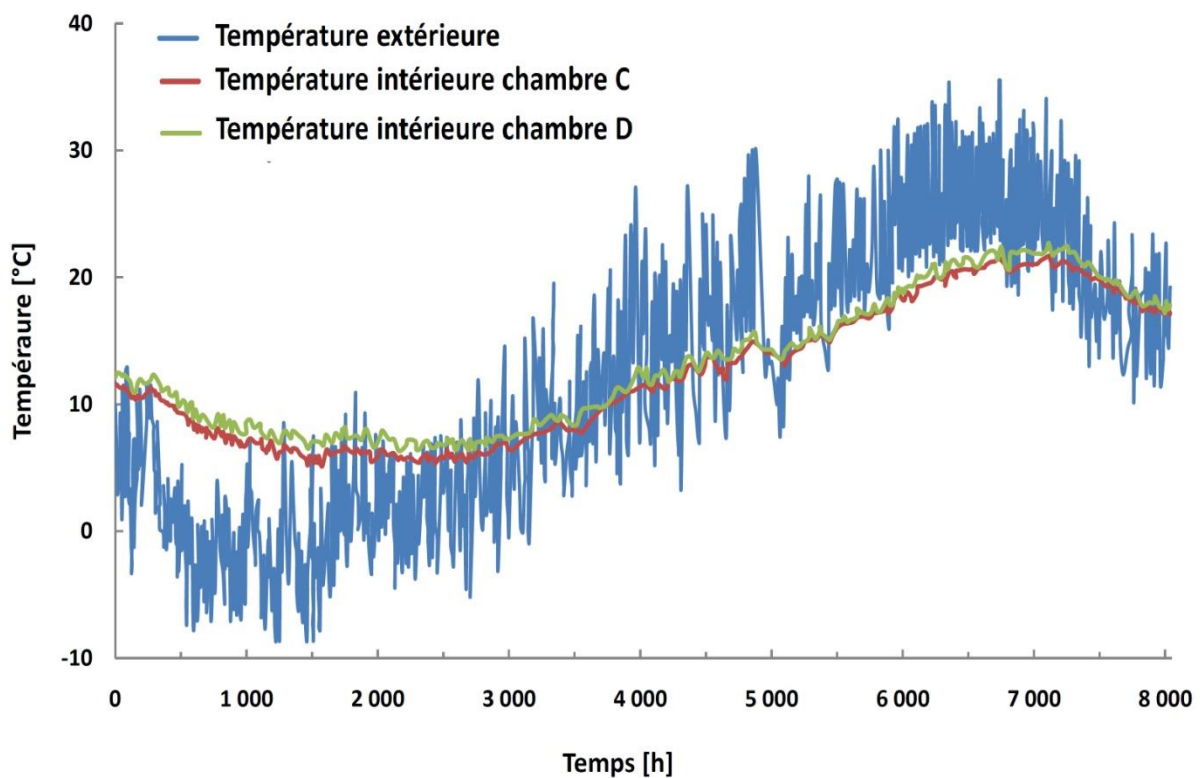
**Figure 5. 23.** Vue de la structure modélisée / COMSOL.

### 5.4.3. Conditions aux limites et initiales

Les conditions aux limites extérieures ont été obtenues à partir des données climatiques de la région de Sendai, Tokyo au nord du Japon mesurées sur une période de dix mois. Des opérations de mesure de la température à l'intérieur de chacune des chambres, ont été réalisées sur la même période prise choisie pour les données météorologiques. La figure 5.24. montre les valeurs des températures extérieures et intérieures sur la période considérée.

Une analyse préliminaire des données a indiqué qu'au delà de 10m en dessous du niveau naturel, la température du sol reste constante autour de 12°C. Cette valeur a donc été appliquée en tant que condition aux limites fixe pour la surface inférieure du domaine.

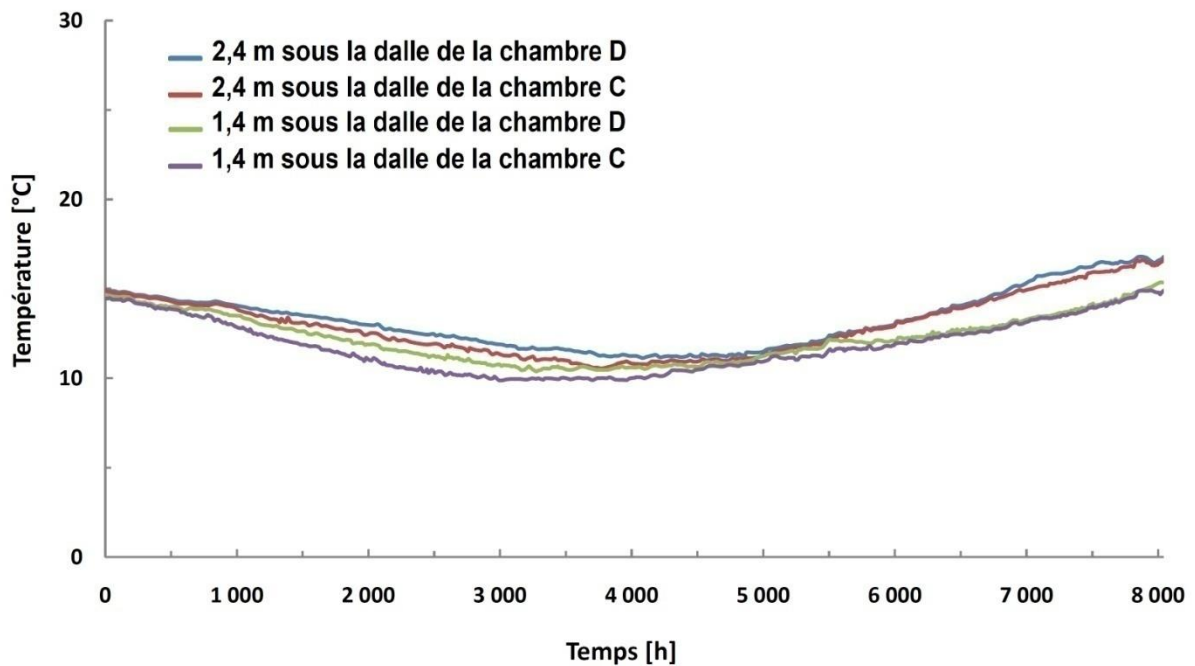
Les conditions initiales de simulation pour l'ensemble de la géométrie ont été fixées à 20°C



**Figure 5. 24.** Conditions aux limites.

Par ailleurs, dans ce cas d'étude des conditions aux limites à différentes profondeurs du sol ont été appliquées. Les valeurs de températures ont été obtenues au moyen de sondes thermiques qui ont été posées symétriquement sous les dalles des chambres aux deux

profondeurs de 2,4m et 1,4m. La figure 5.25. montre les valeurs de ces température sur la période de simulation.



**Figure 5. 25.** Conditions aux limites au sol.

#### 5.4.4. Le maillage.

Le maillage employé est un maillage triangulaire qui consiste en 882414 éléments, 243812 frontière et 21289 nœuds avec une qualité moyenne des mailles de l'ordre de 0.5409.

La simulation a été conduite sur un PC Intel(R) Core(TM) i7 avec un CPU cadencé à 3.80GHz, le temps de calcul est de 55 minutes pour une simulation qui s'étend sur une période de 330 jours (10 mois) et un pas de temps d'une heure.

La figure 5.26. représente la distribution du maillage de l'ensemble de la structure, l'échelle désigne la taille des mailles en mètre (m) ; plus la couleur tend vers le bleu plus la maille est grande.

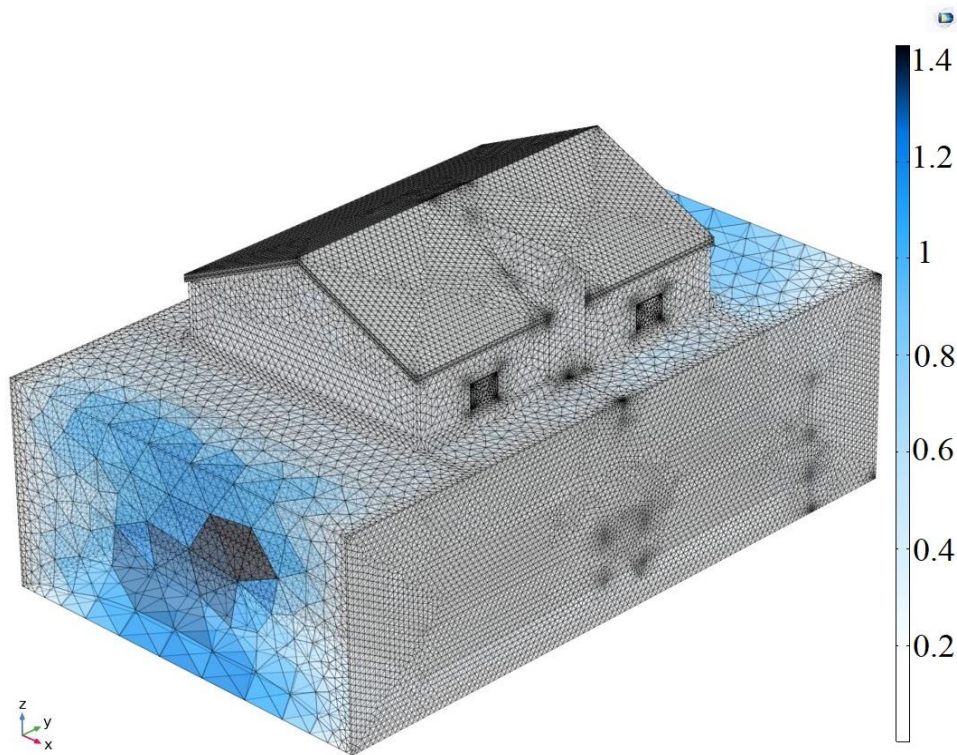


Figure 5. 26. Le maillage de l'ensemble sol-structure.

#### 5.4.5. Résultats de la simulation.

##### 5.4.5.1. Distribution de la température.

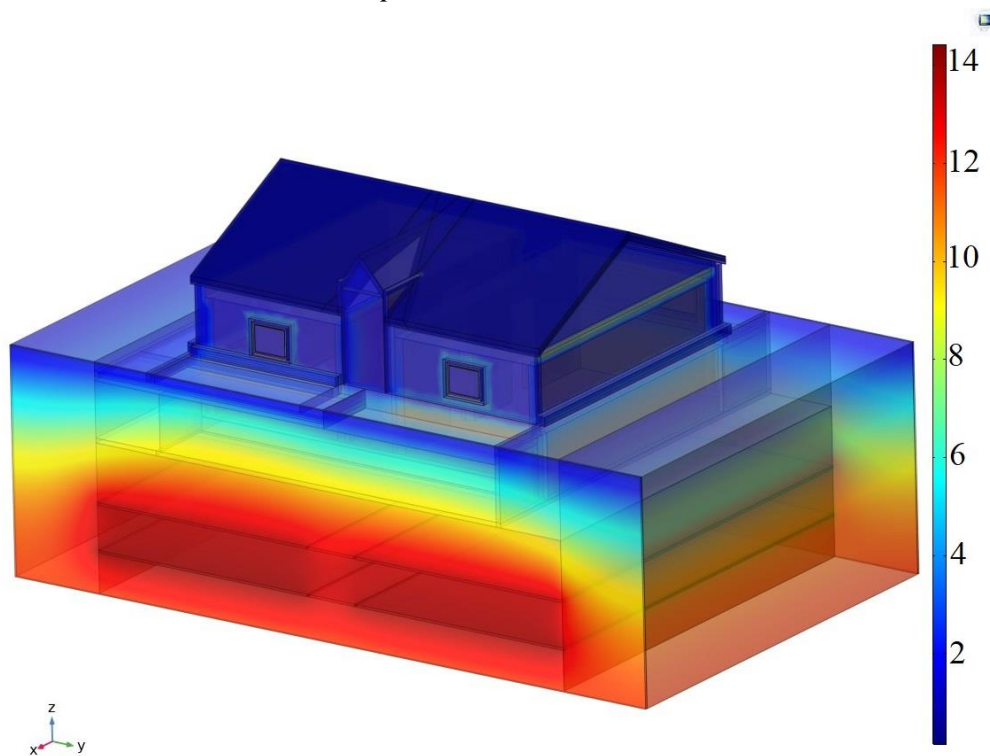
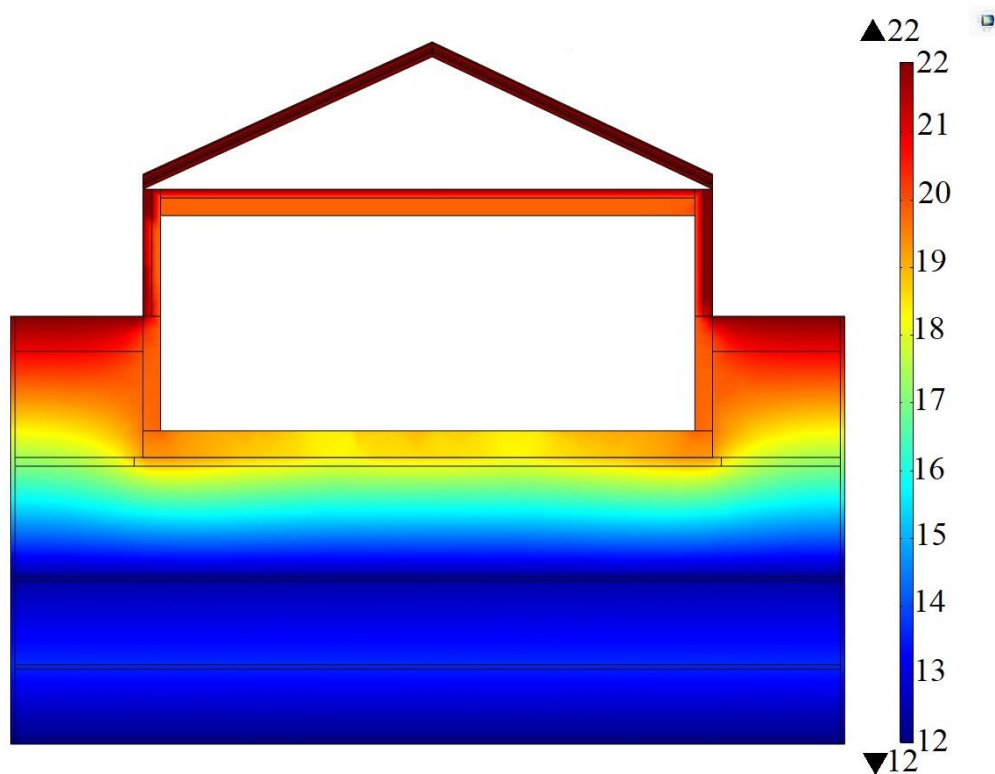


Figure 5. 27. Distribution de la température en 3D (le 20 septembre 1982).

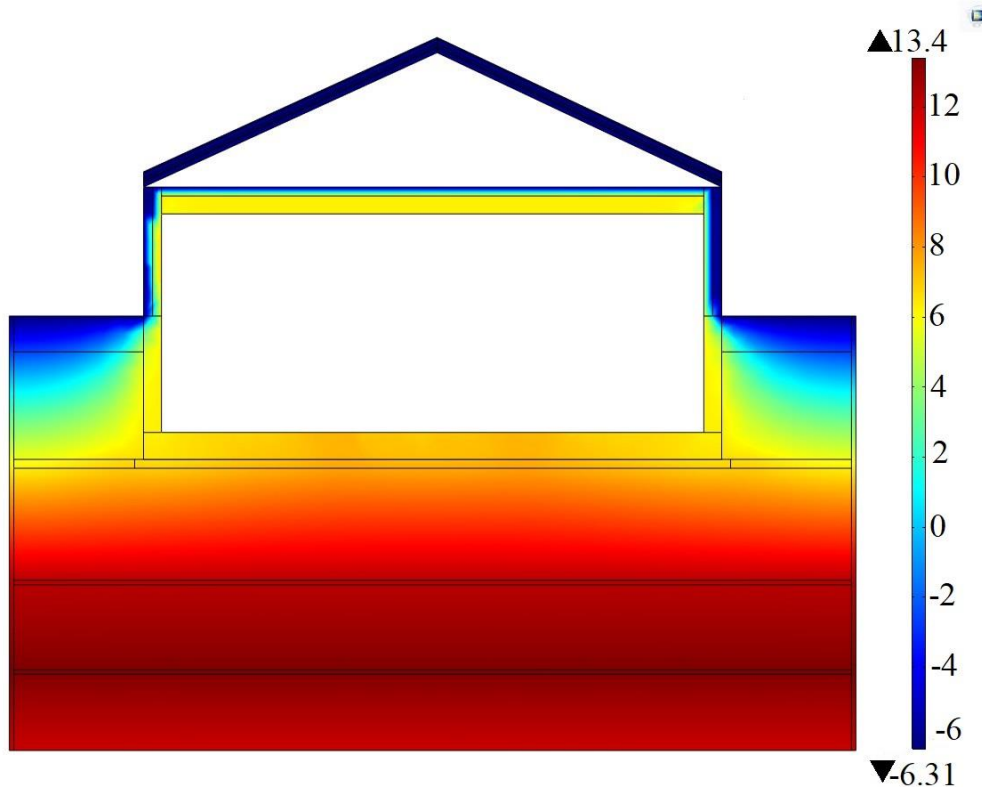
La figure 5.27. montre la distribution de la température après 480 h, ce qui représente le vingtième jour de la période de simulation. Ce temps correspond à la date du 20 janvier de l'année 1982.

Les figures 5.28 et 5.29 quant à elles, représentent la distribution de la température à l'heure la plus chaude et la plus froide, respectivement. La distribution est présentée ici sur la coupe AA (voir la figure 5.16).

- La première est prise le 22 septembre 1982 à 16h00, ce qui correspond à la température extérieure maximum de l'année ( $35.4^{\circ}\text{C}$ ).
- La seconde est prise le 21 février 1982 à 03h40 du matin, ce qui correspond à la température extérieure la plus basse de l'année ( $-8,7^{\circ}\text{C}$ ).



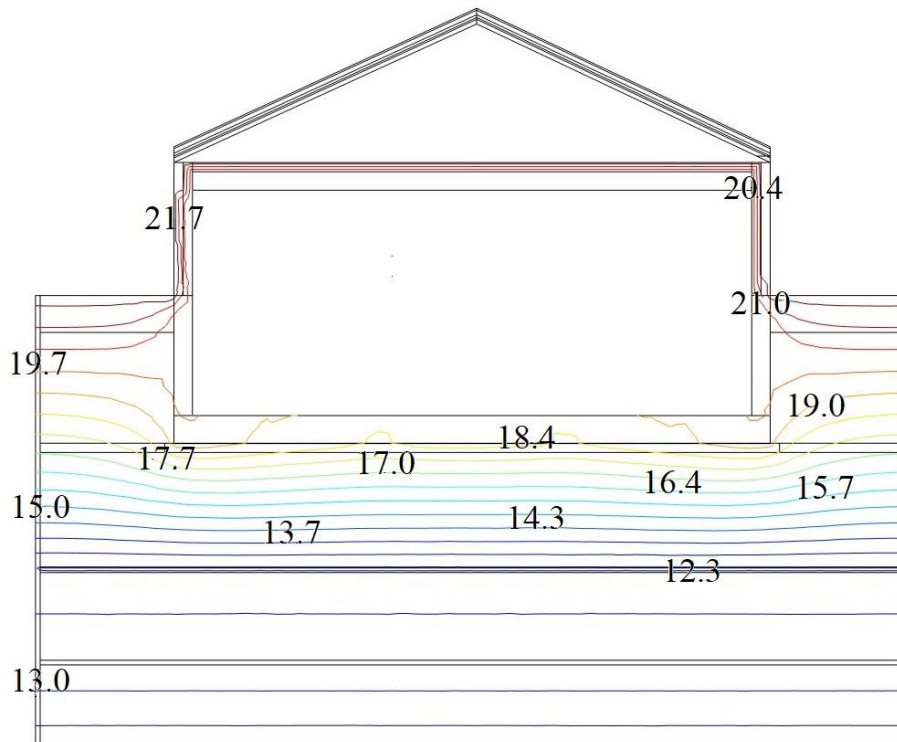
**Figure 5. 28.** Distribution de la température en 2D- Le 22 septembre 1982 à 16h00 [Text= $35,4^{\circ}\text{C}$ ].



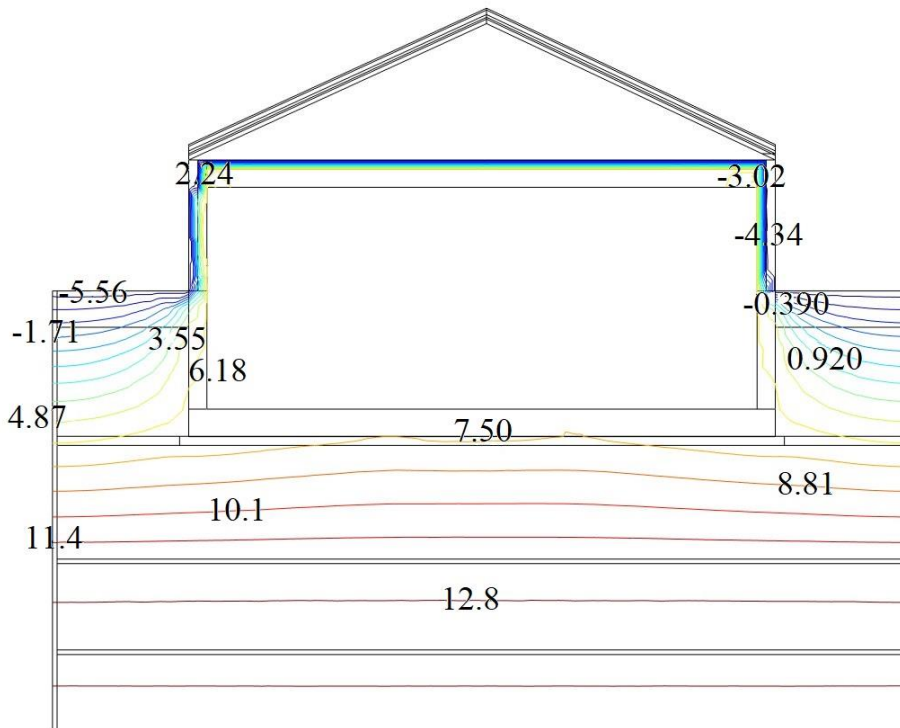
**Figure 5. 29.** Distribution de la température en 2D- Le 21 Février 1982 à 16h00  
[Text=-8,7°C]

La figure 5. 30. montre les contours de température (lignes isothermes) obtenus au début de la période de simulation (période hivernale). Les températures les plus froides sont observées au niveau de la surface du sol, aux côtés latéraux de la superstructure ainsi qu'au niveau de la toiture ; ce qui est logique puisque ces trois derniers sont en contact avec l'atmosphère et que le début de la simulation est dans la période hivernale. Plus on descend en profondeur plus on trouve les températures les plus chaudes (entre 10,1°C et 12,8°C). La température en profondeur ne descend pas sous la valeur de 12,8°C ce qui laisse entendre qu'au début de la simulation (période hivernale) le sol profond reste plus chaud qu'en surface.

La figure 5. 31. montre les contours de température (lignes isothermes) obtenus à la fin de la période de simulation (période chaude). Les températures les plus froides sont observées en profondeur du sol. La température en profondeur ne descend pas sous la valeur de 13°C. La structure de la maison enregistre les valeurs de température les plus chaudes (entre 18,4°C et 21,7°C) ce qui est logique puisque cette dernière est en contact avec l'atmosphère et que la fin de la simulation est dans la période la plus chaude.



**Figure 5. 30.** Lignes isothermes à la température maximale- Le 22 septembre 1982 à 16h00 [Text=35,4°C].

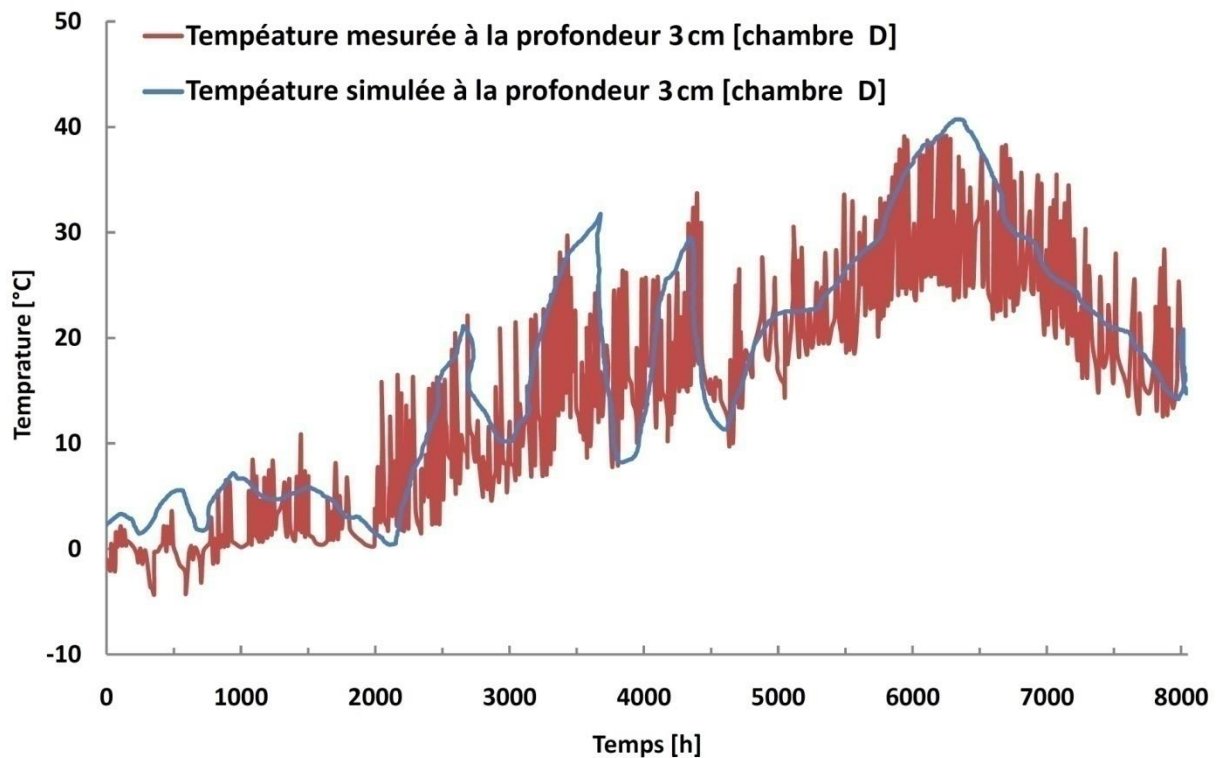


**Figure 5. 31.** Lignes isothermes à la température minimale- Le 21 Février 1982 à 16h00 [Text=-8,7°C].

## 5.4.5.2. Validation des résultats.

Afin de vérifier la concordance des résultats de température présentés dans la section précédente, nous avons procédé à la comparaison des courbes de température mesurées et celles obtenues par la simulation via Comsol.

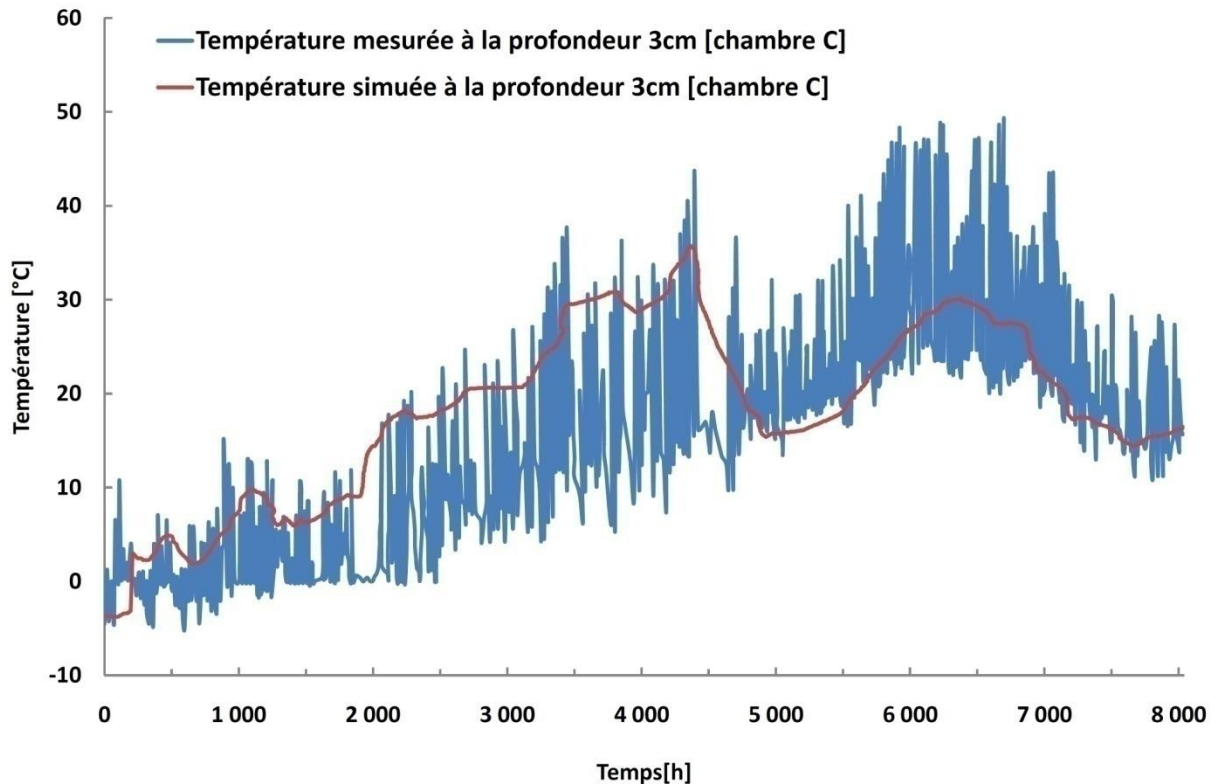
Les figures 5.32.-.39 montrent les résultats de température obtenus par simulation comparés aux valeurs réelles relevées par les sondes thermiques aux différentes profondeurs du sol adjacent à la chambre D et à la chambre C.



**Figure 5. 32.** Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 3 cm- [chambre D].

Les figures 5.32. et 5.36. illustrent les variations de températures à 3 cm en-dessous de la surface du sol adjacent à la chambre D et à la chambre C respectivement. Dans les deux cas (chambre D / chambre C), l'allure de la courbe simulée présente une évolution similaire à celle de la température mesurée. Cependant, il est à noter qu'il y a une disparité assez remarquable dans le détail des fluctuations. En effet, pour chacune des deux chambres, la courbe de température obtenue par simulation a une allure globalement plus linéaire que celle des valeurs mesurées. Les températures mesurées ont logiquement des variations importantes semblables aux conditions climatiques extérieures (voir figure 5.24.), puisque la profondeur

ici est très proche de la surface du sol naturel des deux côtés de la maison. Par ailleurs, la concordance entre les résultats de simulation et les valeurs réelles des températures, à cette profondeur, paraît plus réaliste pour la période chaude des dix mois, et ce concernant les deux chambres.



**Figure 5. 33.** Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 3 cm- [chambre C].

Les figures 5.32. et 5.36. montrent les variations de températures à 30 cm en-dessous de la surface du sol adjacent à la chambre D et à la chambre C respectivement. Il convient à dire ici que pour les deux graphes, les courbes simulées et celles des valeurs de température relevées évoluent d'une manière globalement semblable, par rapport à la profondeur précédente, l'allure des courbes obtenues par COMSOL se rapproche plus des courbes de valeurs mesurées et est plus réaliste. De plus, on note à cette profondeur, que pour la chambre D, les résultats de température simulés qui convergent le plus vers les valeurs réelles ont été observés sur la période entre 2500 et 4600 heures ce qui correspond à peu près aux deux mois du 14 avril au 11 juillet de cette année. Cependant les résultats se rapportant à la chambre C rendent mieux à la fin de la simulation (sous les températures les plus chaudes).

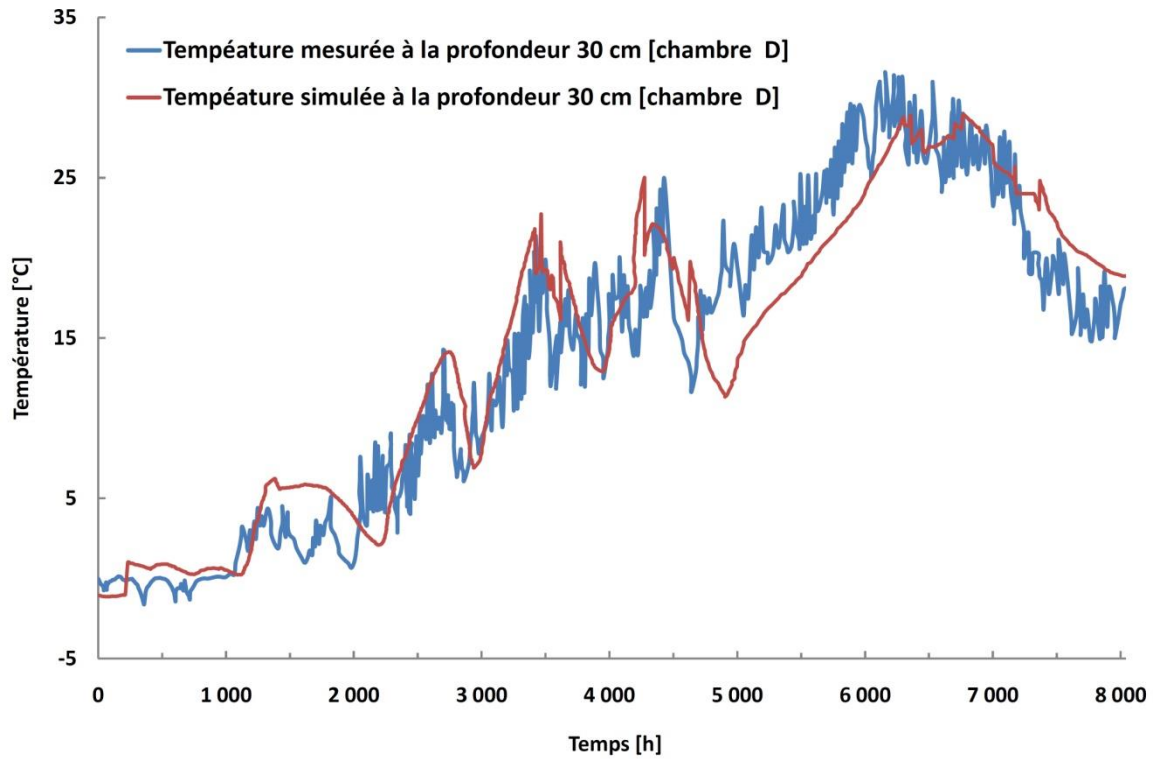


Figure 5. 34. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 30cm- [chambre D]

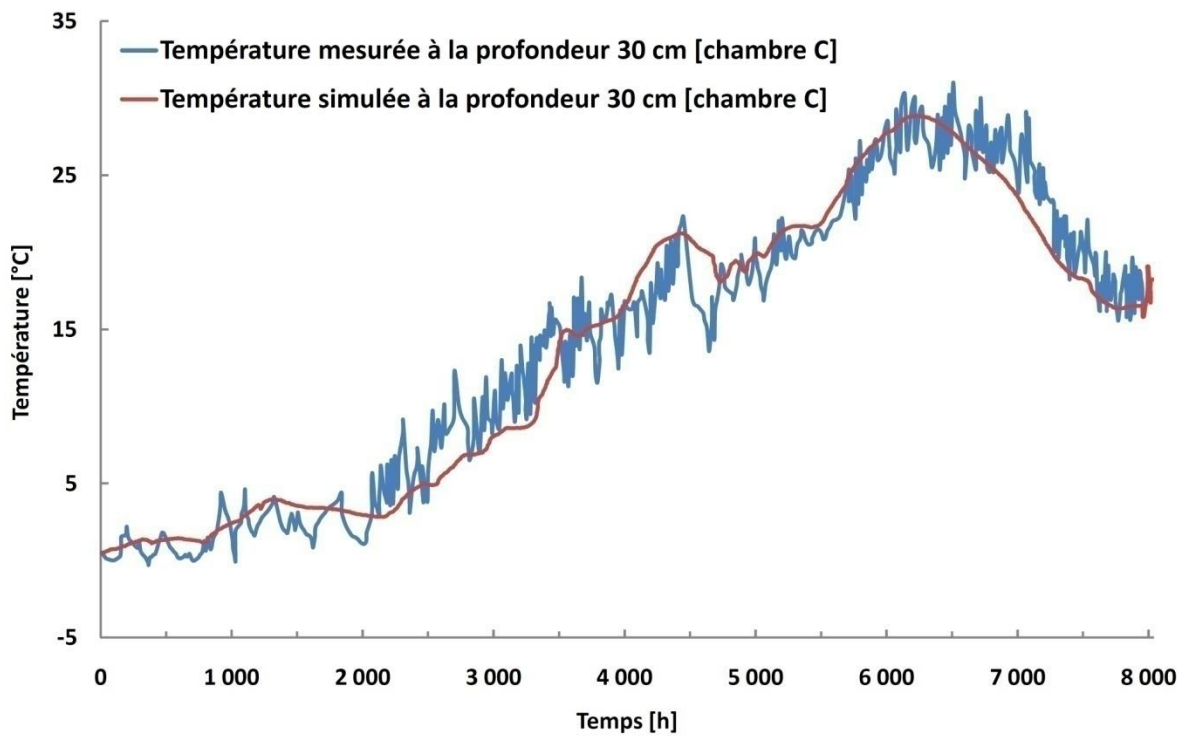
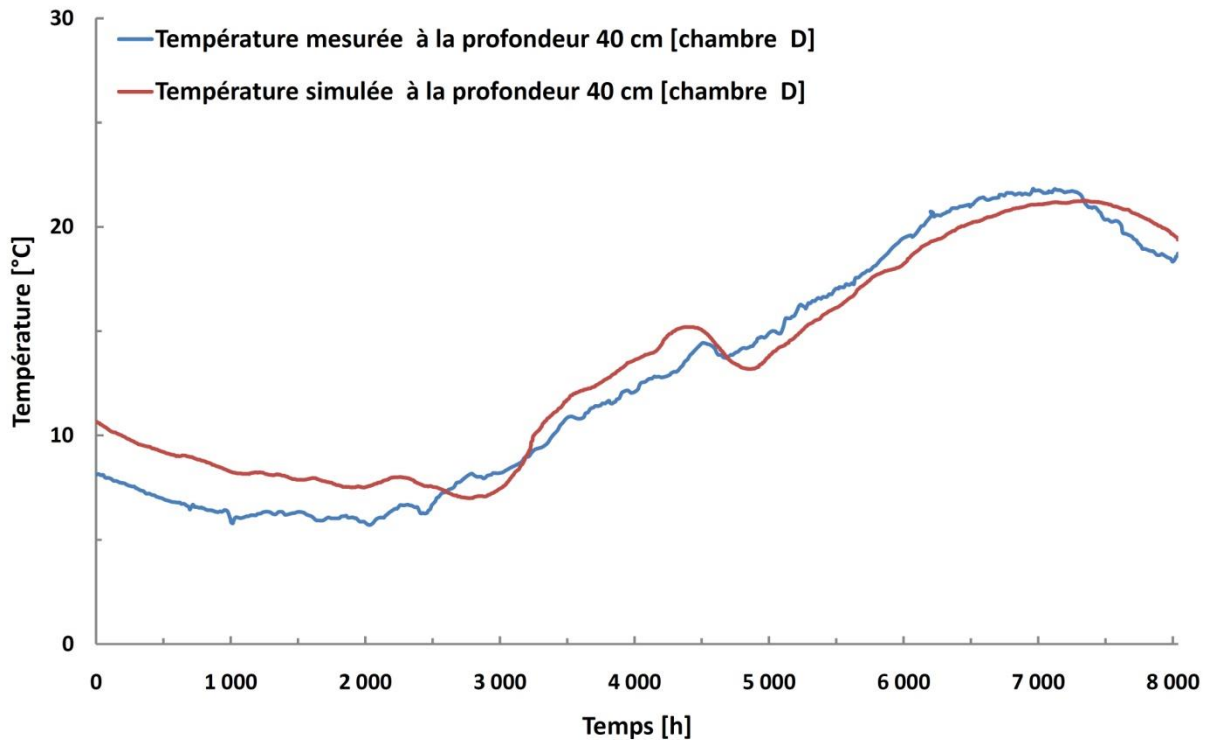


Figure 5. 35. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 30cm- [chambre C].

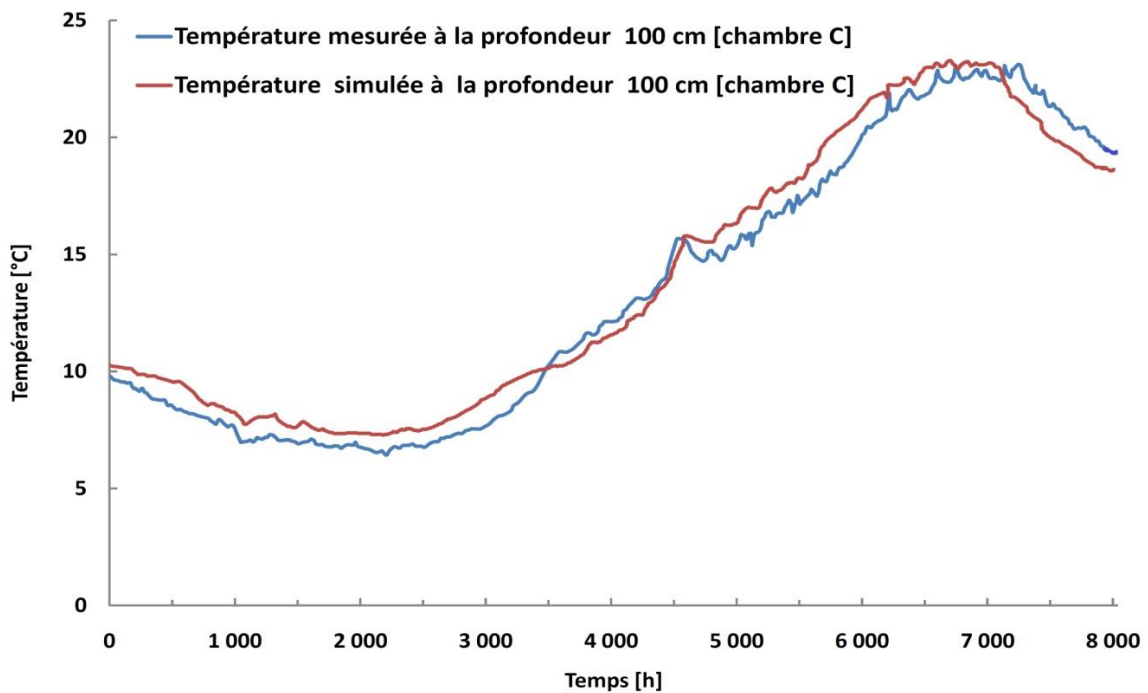
La figure 5.36. quant à elle représente la comparaison des résultats de température issus de la simulation avec les températures mesurées à une profondeur de 40 cm sous la surface du sol adjacent à la chambre D. Cette profondeur correspond à la limite inférieure de l'isolation horizontale en polystyrène installée uniquement au pourtour de la chambre D.



**Figure 5. 36.** Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 40cm- [chambre D].

Les allures des deux courbes sont globalement concordantes et présentent une évolution similaire. Cependant, il est à noter qu'il y a une certaine disparité durant la partie la plus froide des dix mois et que la corrélation entre les résultats est optimale au niveau des températures les plus élevées. L'écart type moyen a été estimé à 9,274% entre la courbe des valeurs calculées et celles mesurées de la température.

La figure 5.37. représente l'évolution de la température à une profondeur de 100 cm sous la surface du sol adjacent à la chambre C.



**Figure 5. 37.** Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 100cm- [chambre C].

Une certaine altérité est observée entre les valeurs de température mesurées et les deux courbes de valeurs simulées, cela même au début et malgré la tentative de reproduire une température initiale réaliste.

Dans l'ensemble, l'allure des deux courbes concorde au-delà du fait que les valeurs issues de la simulation via le logiciel COMSOL convergent vers les valeurs mesurées d'une manière plus marquée par rapport aux positions précédentes des capteurs. Les résultats simulés via COMSOL et ceux mesurés enregistrent un écart moyen de 2.54%.

Pour finir, dans les figures 5.38. et 5.39. nous avons procédé à la comparaison des valeurs de la température calculée par simulation et celles qui ont été relevées par les sondes thermiques positionnées à une profondeur de 150 cm sous le niveau du sol naturel côté chambre D et chambre C respectivement.

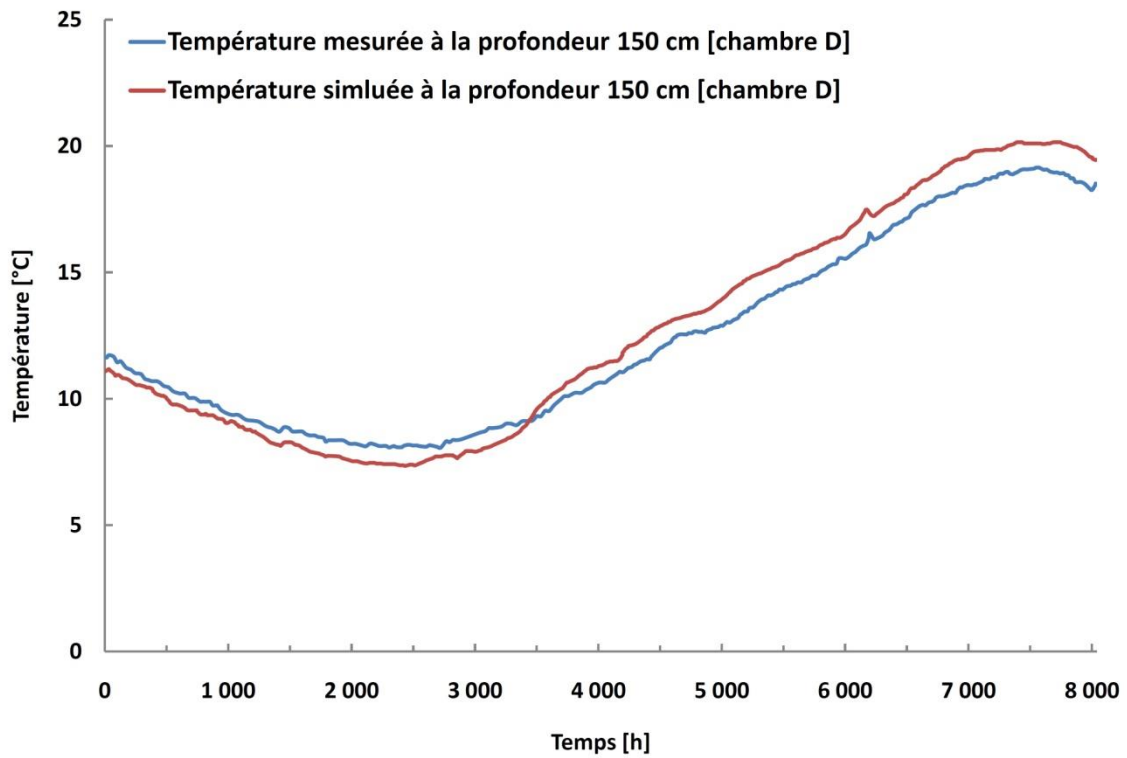


Figure 5. 38. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 150cm- [chambre D].

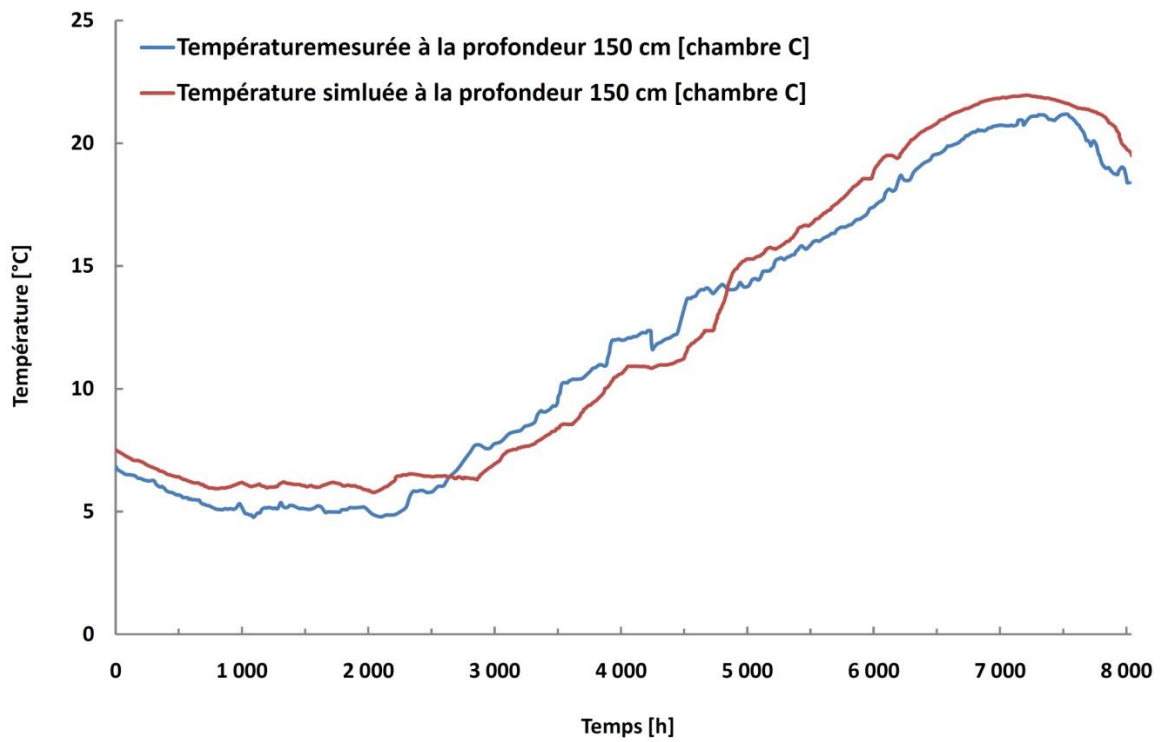


Figure 5. 39. Comparaison température simulée/ température mesurée à la profondeur 150cm- [chambre C].

De même que pour la position du capteur de température précédente, nous notons, là aussi, que les aspects des courbes (simulée / mesurée) sont globalement semblables. Nous nous permettons d'affirmer qu'à cette profondeur, les résultats de température simulés concordent le mieux avec les valeurs mesurées pour les deux chambres. Les écarts moyens ont été estimés à 0,95% et 1.33% pour les chambres D et C respectivement.

Globalement, les résultats de température calculés par simulation correspondent aux valeurs de température mesurées de par leurs allures qui présentent une évolution générale similaire. Cependant, la concordance des températures simulées manque de précision au niveau des profondeurs les plus proches de la surface du sol naturel et présente dans la plus part des cas une certaine disparité pour la période hivernale par rapport à la période chaude des dix mois qui paraît plus réaliste

### **5.5.Conclusion**

La première simulation présentée dans ce chapitre, nous a permis, dans un premier lieu, d'analyser la répartition de la température dans les différentes couches du sol de fondation. D'un autre côté, la deuxième simulation présentée qui s'est avérée être un peu plus complexe de part sa géométrie non-symétrique nous a aussi permis de tester la fiabilité de la réflexion mathématique présentée dans le chapitre précédent.

Dans les deux applications de simulation numérique, la corrélation globale des résultats obtenus nous affirme que les hypothèses posées et la réflexion mathématique employée pour la détermination des propriétés thermiques sont plausibles.

Les résultats de températures obtenues par simulation via COMSOL concordent avec les valeurs réelles de température et par conséquent viennent valider la fiabilité du modèle théorique proposé. De plus, le rapprochement des profils de température, obtenus via le logiciel COMSOL, de ceux mesurés laisse à croire que l'utilisation de ce logiciel serait plus judicieuse dans ces tentatives d'estimation.

## **I. Conclusion générale.**

L'analyse des statistiques alarmantes de la situation énergétique mondiale et nationale, et la réalité de la consommation démesurée du secteur tertiaire et résidentiel en termes d'énergie, nous ont inévitablement menés à une réflexion sur une tentative de limiter la consommation de ce secteur, afin de contribuer à la résolution de la problématique énergétique.

Si la littérature convient que la majorité des déperditions de chaleurs, en cause ici, ont lieu principalement au niveau de l'enveloppe de la superstructure d'une construction, nous avons tenté néanmoins, de traiter celles qui s'opèrent par le sol de fondation en contact direct avec l'infrastructure. Le but étant de mettre en avant l'intérêt qu'il y a à essayer de les maîtriser, afin de contribuer à réduire la demande totale d'énergie de chauffage et de refroidissement pour les habitations et d'influencer positivement l'efficacité énergétique du secteur tertiaire

La recherche bibliographique effectuée, nous a permis de nous familiariser avec les définitions techniques souvent employées dans cette thèse, de cerner les différents types de modèles existants dans la littérature qui visent à approximer la réponse thermique du sol, d'argumenter l'importance des propriétés thermiques dans l'efficacité des modèles et enfin de souligner la difficulté de l'estimation de la conductivité thermique d'un sol.

Notre travail a transité d'une recherche bibliographique étendue vers un modèle mathématique bidimensionnel qui a été concrétisé par deux simulations numériques au moyen du logiciel COMSOL Multi-physics.

Par ailleurs, nous avons abouti à ce que la maîtrise du phénomène de transfert de chaleur dépendait d'un grand nombre de paramètres à considérer ainsi que des relations implicites qui les lient, ce qui en soit constitue la difficulté majeure à dépasser. La modélisation de ce phénomène s'articule autour d'une compréhension approfondie des concepts de base de la physique des sols.

Se basant sur une analyse comparative existante dans la littérature, nous nous sommes également essayés à une approximation réaliste des propriétés thermo-physiques des sols étudiés, qui reposent sur des corrélations mathématiques, dans une optique de précision des résultats de la réponse thermique.

La compréhension des mécanismes de transfert de chaleur dans le sol reposant sur la résolution d'équations à dérivées partielles très complexes, qui nécessite l'intervention de l'outil informatique, nous avons procédé à une présentation de l'ensemble des corrélations visant à cerner les propriétés thermo-physiques des sols ainsi que les équations (EDP) gouvernant les transferts thermiques et ce, dans le but de développer un modèle similaire.

De plus, nous avons présenté dans le quatrième chapitre la partie essentielle de notre travail, qui consiste au développement du modèle numérique bidimensionnel orienté vers le transfert de chaleur dans le sol ayant principalement pour but, de prédire de comportement de la température dû au phénomène de conduction. Cet outil a directement découlé des équations de la physique mathématique qui ont été minutieusement décrites dans ce même chapitre.

Nous pouvons dire que l'outil développé dans cette thèse est une formulation théorique qui peut facilement être adapté à différents cas d'étude expérimentaux de par la modification des propriétés thermo-physiques, ainsi que celle des conditions météorologiques et géographiques, spécifiques à chaque système considéré.

Le cheminement méthodologique combinant l'exécution du modèle développé et l'affectation de la conductivité thermique adéquate à chaque sous domaines de la géométrie, a permis la construction d'un algorithme qui réunit la totalité des étapes nécessaires au bon accomplissement de la modélisation.

Au final, dans un souci de vérification de son efficacité, le modèle proposé a été testé sur deux expériences réalistes, celle du Minisota et celle de la « maison japonaise ».

Cette partie du travail nous a permis, dans un premier lieu, d'analyser la répartition de la température dans les différentes couches du sol de fondation. La corrélation globale des résultats obtenus nous ont affirmé que les hypothèses posées et la réflexion mathématique employée pour la détermination des propriétés thermiques, sont plausibles.

En outre, le rapprochement des profils de température obtenus via le logiciel COMSOL de ceux mesurés, laisse à croire que l'utilisation de ce logiciel serait plus judicieuse dans ces tentatives d'estimation.

D'autres perspectives peuvent être envisagées afin d'améliorer ce modèle, à savoir :

- Intégrer dans le modèle proposé les termes de transfert thermique convectif et celui du au changement de phase de l'eau.

- Explorer plus d'approches de prédiction de la conductivité thermique globale du sol et les intégrer à l'outil proposé.
- Déterminer si le modèle de transfert de chaleur peut simuler les effets de l'humidité prédits par le modèle de transfert de chaleur et d'humidité.
- Généraliser le modèle proposé dans une perspective tridimensionnelle.

**Références bibliographiques [155 références]**

- [1] A. Fouquier, S. Robert, F. Suard, L. Stéphan, et A. Jay, « State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 23, 272-288., 2013.
- [2] X. Zhang et J. L. Briaud, « Three-dimensional numerical simulation of residential buildings on shrinking floors inflated in response to climatic conditions », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, p. 39(13), 1369- 1409, 2015.
- [3] A. M. Măgurean, L. Czumbil, D. L. Manea, et D. D. Micu, « Artificial intelligence based prediction model for the long-term heat flux losses through ground applied to large non-residential buildings », *Procedia Manufacturing*, p. 32, 434- 441, 2019.
- [4] EIA, « International Energy Outlook 2016 », vol. Senario 2016, p. 290, 2016.
- [5] EIA, « Annual Energy Outlook 2018 with projections to 2050 », p. 74, 2018.
- [6] D. en ligne Eurostat, « Bilans énergétiques - Eurostat », 2018. <https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/energy/data/energy-balances> (consulté le déc. 01, 2020).
- [7] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Evolution Rétrospective du Bilan Énergétique National Algérien (1980-2004) », ALGERIE, 2004.
- [8] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2005 », ALGERIE, 2006.
- [9] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2006 », ALGERIE, 2007.
- [10] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2007 », ALGERIE, 2008.
- [11] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2008 », ALGERIE, 2009.
- [12] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2009 », ALGERIE, 2010.
- [13] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2010 », ALGERIE, 2011.
- [14] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2011 », ALGERIE, 2012.

- [15] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2012 », ALGERIE, 2013.
- [16] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2013 », ALGERIE, 2014.
- [17] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2014 », ALGERIE, 2015.
- [18] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2015 », ALGERIE, 2016.
- [19] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2016 », ALGERIE, 2017.
- [20] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2017 », ALGERIE, 2018.
- [21] MINISTERE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES, « Bilan énergétique national de l'année 2018 », ALGERIE, 2019.
- [22] M. MALIKI, « Modélisation tridimensionnelle du comportement hygrothermique dans les parois multicouches de bâtiments », Mostaganem- ALGERIE, 2015.
- [23] M. Deru, « A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings », 2003.
- [24] J. Neymark, R. Judkoff, I. Beausoleil-Morrison, A. Ben-Nakhi, M. Crowley, et M. Deru, « International Energy Agency Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method (IEA BESTEST) », In-Depth Diagnostic, (IEA BESTEST), 2008.
- [25] C. Dong, « Heat Loss via Concrete Slab Floors in Australian Houses », *Elsevier Ltd.*, Jinan, China, p. 108- 115, 2017.
- [26] F. K. NATHANAEL JOHNS, « Development and Application of a Numerical Framework for Improving Building Foundation Heat Transfer Calculations », University of Colorado at Boulder, 2015.
- [27] G. J. Van Den Brink et C. J. Hoogendoorn, « Ground water flow heat losses for seasonal heat storage in the soil », *Solar Energy*, p. 30(4):367±71., 1983.
- [28] M. Santamouris, G. Mihalakakou, A. Argiriou, et D. Asimakopoulos, « On the performance of buildings coupled with earth to air heat exchangers », *Solar Energy*, p. 54(6):375±80., 1995.
- [29] G. R. DAVIES, « Thermal analysis of earth covered buildings. In: Proc », Kansas City, oct. 1979, p. 744±8.

- [30] M. A. Standeven, « A study of the suitability of earth sheltering as low-energy building in the UK environment », MSc. thesis, Cranfield Institute of Technology, UK, 1992.
- [31] R. L. Sawhney, B. C. Jayashankar, et M. S. Sodha, « Thermal performance of an earth-integrated building for different surface treatments of the surrounding earth », Kobe, Japan, 1990, vol. 1, p. 1158±62.
- [32] M. Deshmukh, M. Sodha, et R. Sawhney, « Effects of depth of sinking on thermal performance of partially underground building », p. 391±403, 1991.
- [33] P. Sobotka, H. Yoshino, et S. Matsumoto, « Thermal comfort in passive solar earth integrated rooms », *Build. Environ.*, n° 31(2), p. 155±66, 1996.
- [34] H. Yoshino, S. Matsumoto, M. Nagatomo, et T. Sakanishi, « Five-year measurement of thermal performance for a semi-underground test house », *Tunn. Undergr. Space Technol.*, n° 7(4), p. 339±46, 1992.
- [35] C. E. Hagentoft, « Steady-State Heat Loss for an Edge-Insulated Slab : Part I », *Building and Environment*, p. 19- 25, 2002.
- [36] R. Judko et J. Neymark, « Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140 », p. 367- 376, 2006.
- [37] F. C. Houghten, S. I. Taimuty, C. Gutberlet, et C. J. Brown, « Heat Loss Through Basement Walls and Floors », *ASHVE Transaction*, vol. 48. p. 369- 384, 1942.
- [38] H. D. Bareither, A. N. Fleming, et B. E. Alberty, « Temperature and Heat Loss Characteristics of Concrete Floor Laid on the Ground », Chicago, Rapport technique du Conseil des petites maisons de l'Université de l'Illinois., 1948.
- [39] P. H. Shipp, « The Thermal Characteristics of Large Earth-Sheltered Structures », Ph.D. Thesis, University of Minnesota, Minneapolis, 1979.
- [40] M. H. Adjali, M. Davies, et S. W. Rees, « A comparative study of design guide calculations and measured heat loss through the ground », *Building and Environment*, p. 1301- 1311, 2004.
- [41] T. P. Knoth, B. H. Smith, et D. M. Apthorp, « Earth Contact Systems: Soil Temperature and Thermal Conductivity Data, Heat Flux Data and Meter Calibration », Washington, 1982, p. 73- 86.
- [42] T. P. Bligh et B. H. Knoth, *Data From One-, Two-, and Three Dimensional Temperature Fields in the Soil Surrounding an Earth-Sheltered House*, vol. 89. ASHRAE, 1983.
- [43] H. Yoshino, S. Matsumoto, M. Nagatomo, et T. Sakanishi, « Five-year measurement of thermal performance for a semi-underground test house », *Tunn. Undergr. Space Technol.*, n° 7(4), Art. n° 7(4), 1992.

- [44] H. R. Thomas et S. W. Rees, « The Thermal Performance of Ground Floor Slabs – a Full Scale in-situ Experiment », *Build. Environ.*, vol. 34, p. 139- 164, 1999.
- [45] S. W. Rees, M. H. Adjali, Z. Zhou, M. Davies, et H. R. Thomas, « Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 213- 265, 2000.
- [46] M. H. Adjali, M. Davies, S. W. Rees, et J. Littler, « Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three dimensional numerical simulations and comparison with experimental data. », *Building and Environment*, p. 655- 62, 2000.
- [47] H. H. Mercey, *Heat Loss Through a Solid Floor*, vol. 22. Journal of the Institute of Fuel, 1949.
- [48] A. Lachenbruch, « Three-Dimensional Heat Conduction in Permafrost Beneath Heated Buildings », Geological Survey: Experimental and Theoretical Geophysics., Washington D.C: United States Government Printing Office, 1959, p. 51 - 69.
- [49] A. Delsante, A. Stokes, et P. Walsh, « Application of Fourier Transforms to Periodic Heat Flow into the Ground Under a Building », p. 121- 132, 1983.
- [50] T. Kusuda et J. W. Bean, *Simplified Methods for Determining Seasonal Heat Loss From Uninsulated Slab-on-Grade Floors*, vol. 90(1B). ASHRAE Transactions, 1984.
- [51] T. Kusuda, M. Mizuno, et J. W. Bean, « Seasonal Heat Loss Calculation for Slab on-Grade Floors », U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Center for Building Technology, 1982.
- [52] R. W. R. Muncey et J. W. Spencer, *Heat Flow into the Ground Under a House*, vol. 2. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1978.
- [53] L. S. Shen et J. W. Ramsey, *A Simplified Thermal Analysis of Earth-Sheltered Buildings Using a Fourier-Series Boundary Method*, ASHRAE Transactions., vol. 89(1B). 1983.
- [54] A. E. Delsante et A. E. Stokes, *Application of Fourier Transforms to Periodic Heat Flow into the Ground Under the Building*, Int. J. Heat Mass Transfer., vol. Vol. 26, 1 vol. 1983.
- [55] A. E. Delsante, *Theoretical Calculations of the Steady State Heat Losses Through a Slab-on-Ground Floor*, Building and Environment., vol. Vol. 26, 4 vol. 1988.
- [56] A. E. Delsante, *Steady-State Heat Losses from the Core and Perimeter Regions of a Slab-on-Grade Floor.*”, Building and Environment., vol. Vol. 24, 3 vol. 1989.
- [57] A. E. Delsante, *A Comparison Between Measured and Calculated Heat Losses Through a Slab-on-Ground Floor*, Building and Environment., vol. Vol. 25, 1 vol. 1990.

- [58] J. Claesson et C. E. Hagentoft, *Heat Loss to the Ground From a Building - I. General Theory*, vol. Vol. 26. Building and Environment, 1991a.
- [59] J. Claesson et C. E. Hagentoft, *Heat Loss to the Ground from a Building - II. Slab on the Ground*, vol. Vol. 26, 4 vol. Building and Environment, 1991b.
- [60] C. E. Hagentoft, « Heat Loss to the Ground from a Building: Slab on the Ground and Cellar », Lund Institute of Technology, Sweden, 1988.
- [61] C. E. Hagentoft, *Heat Losses and Temperature in the Ground under a Building with and without Ground Water Flow—I.*, vol. 31(1). Infinite Ground Water Flow Rate., 1996.
- [62] C. E. Hagentoft et J. Claesson, « Influence of Rain Water Percolation on Ground Heat Losses and Temperature for Basement Foundation », présenté à Proceedings of the 3rd International Conference on Research in Building Physics and Building Engineering, Montreal, Canada, 2006.
- [63] G. R. MacDonald, D. E. Claridge, et P. A. Otman, *A Comparison of Seven Basement Heat Loss Calculation Methods Suitable for Variable-Base Degree-Day Calculations*, ASHRAE Transactions., vol. 91(1B). 1985.
- [64] ASHRAE, « ASHRAE Handbook—Fundamentals », Atlanta, Georgia, 2009.
- [65] G. Boileau et National Research Council Canada. Division of Building Research, « Heat Losses from House Basements », *National Research Council of Canada, Division of Building Research*, p. XIX(10) : 39-42, 1969.
- [66] F. Wang, *Mathematical Modeling and Computer Simulation of Insulation Systems in Below Grade Applications*. Clearwater, Florida: Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings I, 1979.
- [67] M. Krarti, D. Claridge, et J. Kreider, « ITPE Technique Applications to Time Varying TwoDimesional Ground Coupling Problems », *International Journal of Heat and Mass Transfer*, p. 31(9) : 1899-1911, 1988.
- [68] M. Krarti, D. Claridge, et J. Kreider, « ITPE Technique Applied to Steady State GroundCoupling Problems. », *Journal of Heat Transfer*, p. 849- 856, 1990.
- [69] M. Krarti, « Time-Varying Heat Transfer From Slab on-Grade Floors with Vertical Insulation. », p. 55- 61, 1994.
- [70] M. Krarti, « Effect of Spatial Variation of Soil Thermal Properties on Slab-on Ground Heat Transfer », p. 31(1):51-57, 1996.
- [71] S. Choi et M. Krarti, « Heat transfer for slab-on-grade floor with stepped ground », *Energy Conversion and Management*, p. 39(7) : 691-701, 1998.

- [72] S. Choi et M. Krarti, « Thermally optimal insulation distribution for underground structures. », p. 251 - 265, 2000.
- [73] P. Chuangchid et M. Krarti, « Steady-State Component of Three Dimensional Slab-on-Grade Foundation Heat Transfer », *Journal of Solar Energy Engineering*, p. 123(1) : 18, 2001.
- [74] W. Bahnfleth, « Three-Dimensional Modeling of Heat Transfer from Slab Floors », Ph.d. thesis, University of Illinois at Urbana Champaign, 1989.
- [75] W. Bahnfleth et C. Pedersen, « A Three-Dimensional Numerical Study of Slab-on-Grade Heat Transfer », p. 61 - 72, 1990.
- [76] C. Cogil, « Modeling of Basement Heat Transfer and Parametric Study of Basement Insulation for Low Energy Housing », Master's thesis, Pennsylvania State University, 1998.
- [77] E. Clements, « Three Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for Whole-Building Energy Analysis », Master's thesis, Pennsylvania State University, 2004.
- [78] (DOE) United States Department Of Energy, « EnergyPlus: Input Output Reference », The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, version 8, 2014.
- [79] D. Claridge, *Design Methods for Earth-Contact Heat Transfer*, 4<sup>e</sup> éd. Boulder, CO: American Solar Energy Society, 1988.
- [80] M. H. Adjali, M. Davies, et J. Littler, « Littler. Earth-Contact Heat Flows: Review and Application of Design Guidance Predictions », p. 19 (3) : 111-121, 1998.
- [81] Krarti, *Effect of Spatial Variation of Soil Thermal Properties on Slab-on Ground Heat Transfer*, 13<sup>e</sup> éd. Boulder, CO: American Solar Energy Society, Inc., 1999.
- [82] T. Kusuda et P. R. Achenbach, *Numerical Analyses of the Thermal Environment of Occupied Underground Spaces With Finite Cover Using a Digital Computer*, vol. Vol. 69. ASHRAE Transactions, 1963.
- [83] F. S. Wang, « Mathematical Modeling and Computer Simulation of Insulation Systems in Belos Grade Applications », présenté à Proceedings of ASHRAE/DOE-ORNL Conference on Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, Kissimmee, FL, 1979.
- [84] ASHRAE Handbook of Fundamentals, « American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers », Atlanta, GA, 1979.

- [85] J. Speltz, « A Numerical Simulation of Transient Heat Flow in Earth Sheltered Buildings for Seven Selected U.S. Cities », MS Thesis, Trinity University, San Antonio, 1980.
- [86] M. H. Adjali, M. Davies, et J. Littler, *Three-Dimensional Earth-Contact Heat Flows: A Comparison of Simulated and Measured Data for a Buried Structure*, vol. Vol. 15. Renewable Energy, 1998b.
- [87] Z. Zhong et J. E. Braun, *A simple method for estimating transient heat transfer in slab-on-ground floors*, *Building and Environment*, vol. 42. 2007.
- [88] S. W. Rees, H. R. Thomas, et Z. Zhou, *Ground heat transfer: some further insights on the influence of three dimensional effects*, vol. 21(4). CIBSE BSER & T.
- [89] M. H. Adjali, M. Davies, et S. W. Rees, *Temperatures in and under a slab-on ground floor: two- and three dimensional numerical simulations and comparison with experimental data*, vol. 35(7). Building and Environment, 2000.
- [90] G. S. Campbell, K. Calissendorff, et J. H. Williams, « Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method », *Soil Sci*, p. 55 : 291-293, 1991.
- [91] G. J. Kluitenberg, J. M. Ham, et K. L. Bristow, « Error analysis of the heat pulse method for measuring volumetric heat capacity of soil », p. 1444- 1451, 1993.
- [92] K. L. Bristow, G. J. Kluitenberg, et R. Horton, « Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat pulse technique », *Soil Sci*, p. 58 : 1288-1294, 1994.
- [93] J. R. Bilskie, « Dual probe methods for determining soil thermal properties: Numerical and laboratory study », Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, 1994.
- [94] K. L. Bristow, « Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat pulse probes », *Agric for meteorol*, p. 89 : 75- 84, 1997.
- [95] T. E. Ochsner, R. Horton, et T. Ren, « A new perspective on soil thermal properties », p. 1641- 1647, 2001.
- [96] T. Ren, T. E. Ochsner, R. Horton, et Z. Ju, « Heat-pulse method for soil water content measurement: Influence of the specific heat of the soil solids », p. 1631- 1634.
- [97] S. Lu, T. S. Ren, Y. S. Gong, et R. Horton, « An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content », p. 8- 14, 2007.
- [98] S. Lu, Y. Wang, et T. Ren, « Using late time data improves the heat-pulse method for estimating soil thermal properties with the pulsed infinite line source theory », p. 1- 9, 2013.

- [99] J. L. Heitman, X. Xiao, R. Horton, et T. J. Sauer, « Sensible heat measurements indicating depth and magnitude of subsurface soil water evaporation », *Water Resour*, 2008.
- [100] X. Liu, T. Ren, et R. Horton, « Determination of soil bulk density with thermo-time domain reflectometry sensors », p. 1000- 1005, 2008b.
- [101] X. Zhang, S. Lu, J. L. Heitman, R. Horton, et T. Ren, « Measuring subsurface soil-water evaporation with an improved heat pulse probe », p. 76 : 876-879, 2012.
- [102] L. Gang, L. Yili, W. Minmin, R. Tusheng, et H. Robert, « Advances in the Heat-Pulse Technique: Improvements in Measuring Soil Thermal Properties », p. 1- 8, 2018.
- [103] L. Wenxin, L. Xiangdong, P. Yuanling, W. Yong, et T. Jiyuan, « Experimental and numerical investigations on heat transfer in stratified subsurface materials », p. 228- 237, 2018.
- [104] S. W. Rees, M. H. Adjali, Z. Zhou, M. Davies, et H. R. Thomas, « Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures », *Elsevier*, p. 213- 265, 1999.
- [105] D. A. De Vries, « The thermal conductivity of soil », *Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen*, p. 52(1);1-73, 1952.
- [106] W. Woodside et J. H. Messmer, « Thermal conductivities of porous media: unconsolidated soils », *J. Appl Phys*, p. 32(9):1699-706, 1961.
- [107] O. T. Farouki, *Thermal properties of soils*, vol. 11. Trans Tech Publications, 1986.
- [108] D. Barry-Macaulay, A. Bouazza, B. Wang, et R. M. Singh, « Evaluation of soil thermal conductivity models », *Canadian Geotechnical Journal*, p. 52(11), 1892- 1900, 2015.
- [109] O. T. Farouki, *Thermal Properties of Soils*, Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, RH, 1981.
- [110] J. K. Mitchell et T. Kao, « Measurements of soil thermal resistivity », *J. Geotech. Engrg*, p. 1307- 1320, 1978.
- [111] P. Mogensen, « Fluid to duct wall heat transfer in duct system heat storages », *Swedish Council for Building Research*, p. 652-657., 1983.
- [112] B. Sanner, G. Hellström, J. Spitler, et al., « Thermal response test—current status and world-wide application[C] », 2005, p. 200.
- [113] J. D. Spitler et S. E. A. Gehlin, « Thermal response testing for ground source heat pump systems—An historical review[J]. », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 50: 1125-1137, 2015.

- [114] J. E. Low, F. A. Loveridge, W. Powrie, et D. Nicholson, « A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications », *Acta geotechnica*, 2014.
- [115] D. A. De Vries, « Thermal properties of soils. In Physics of Plant Environment », *North-Holland Publishing Company*, Amsterdam, p. 210- 235, 1963.
- [116] A. Gemant, *How to compute thermal soil conductivities.*, vol. 24, no 1. Heating, Piping and Air Conditioning, 1952.
- [117] O. Johansen, « Thermal conductivity of soils. », PhD thesis, University of Trondheim, 1975.
- [118] M. s Kersten, « Thermal properties of soils », University of Minnesota Engineering Experiment Station, Bulletin No.28, 1949.
- [119] D. Kunii et J. M. Smith, « Heat transfer characteristics of porous rocks », *A.I.Ch.E Journal*, p. 6(1): 71-77, 1960.
- [120] R. McGaw, « Heat conduction in saturated granular materials », Highway Research Board (Special Report), 1969.
- [121] A. S. Mickley, « The thermal conductivity of moist soil », American Institute of Electrical Engineers, 1951.
- [122] W. O. Smith, « The thermal conductivity of dry soil », *Soil Science*, p. 53(6): 435-440, 1942.
- [123] M. Van Rooyen et H. F. Winterkorn, « Structural and textural influences on thermal conductivity of soils », *Highway Research Board Proceedings*, p. 39: 576-621, 1959.
- [124] W. Woodside et J. H. Messmer, « Thermal conductivity of porous media. II. consolidated rocks », *Journal of Applied Physics*, p. 32: 1699-1706., 1961.
- [125] V. Balland et P. A. Arp, « Modeling soil thermal conductivities over a wide range of conditions », *Journal of Environmental Engineering Science*, p. 4: 549-558., 2005.
- [126] J. Côté, et J. M. Konrad, « A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. », *Canadian Geotechnical Journal*, p. 42(2): 443-458, 2005a.
- [127] D. Barry-Macaulay, A. Bouazza, R. M. Singh, B. Wang, et P. Ranjith, « Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region », *Engineering Geology*, p. 164: 131- 138, 2013.
- [128] D. Barry-Macaulay, « An investigation on the thermal and thermo- mechanical behaviour of soils », Masters Thesis, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 2013.

- [129] T. Kusuda, « The Effect of Ground Cover on Earth Temperature », juill. 1975, p. 279- 303.
- [130] M. Chalhoub, M. Bernier, Y. Coquet, et M. Philippe, « A simple heat and moisture transfer model to predict ground temperature for shallow ground heat exchangers », *Renewable Energy*, p. 103: 295-307, 2017.
- [131] M. Cuny, J. Lin, M. Siroux, V. Magnenet, et C. Fond, « Influence of coating soil types on the energy of earth-air heat exchanger », *Energy and Buildings*, p. 158: 1000-1012, 2018.
- [132] D. A. De Vries, « Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media », *Trans. American Geophysical Union*, p. 909- 915, 1958.
- [133] J. R. Philip et D. A. De Vries, *Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradient.*, Transactions American Geophysical Union., vol. 38(2). 1957.
- [134] S. Clark, *Handbook of physical constants*, Geological Society of America., vol. 97. 1966.
- [135] B. Hough, « In: Basic soils engineering », *New York: Ronald Press*, p. 634, 1969.
- [136] J. Côté et J. M. Konrad, « Thermal conductivity of base-course materials », *Canadian Geotechnical Journal*, p. 42(1): 61-78, 2005b.
- [137] H. Bel Hadj Salah, « Modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse dans le sol, appliquée au calcul des déperditions thermiques des bâtiments », Thèse de doctorat, Université Paris-Sud, Paris, France, 1990.
- [138] H. Carslaw et J. Jaeger, « Conduction of heat in solids », *Clarendon Press*, Oxford, p. 510, 1959.
- [139] R. Horton et P. J. Wierenga, « Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface », *Soil Sci Soc Am J*, p. 47(1):25- 32, 1983.
- [140] A. Verhoef, B. J. Van Den Hurk, A. F. Jacobs, et B. G. Heusinkveld, « Thermal soil properties for vineyard (EFEDA-I) and savanna (HAPEX-Sahel) sites », *Agric For Meteorol*, p. 78(1):1- 18, 1996.
- [141] W. R. Van Wijk, « Physics of plant environment », *North Holland Publishing Company*, Amsterdam, p. 382, 1963.
- [142] A. De Silans, B. A. Monteny, et J. Lhomme, « Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX Sahel experiment », *Agric For Meteorol*, p. 81(3-4):201-216, 1996.
- [143] Z. Gao, X. Fan, et L. Bian, « An analytical solution to one dimensional thermal conduction convection in soil », *Soil Sci*, p. 168(2):99- 107, 2003.

- [144] Z. Gao, « Determination of soil heat flux in a tibetan short-grass prairie », *Boundary-Layer Meteorol*, p. 114(1):165-178, 2005.
- [145] S. R. Evett, N. Agam, W. P. Kustas, et P. D. Colaizzi, « Soil profile method for soil thermal diffusivity, conductivity and heat flux: comparison to soil heat flux plates. », *Adv Water Resour*, p. 50:41-54, 2012.
- [146] J. W. Cary et S. A. Taylor, *The Interaction of the Simultaneous Diffusions of Heat and Water Vapor*, vol. 26. Proc: Soil Science Society Am, 1962a.
- [147] J. W. Cary et S. A. Taylor, *Thermally Driven Liquid and Vapor Phase Transfer of Water and Energy in Soil*, Soil Science Society Am., vol. 26. Proc, 1962b.
- [148] W. A. Jury, « Simultaneous Transport of Heat and Moisture Through a Medium Sand », Ph.D. Thesis, University of Wisconsin, Madison, WI, 1973.
- [149] D. A. De Vries, *Heat Transfer in Soils*, De Vries, D.A. and Afgan, N.H. Eds. New York: John Wiley & Sons, 1975.
- [150] H. J. Steeman, M. Van Belleghem, A. Janssens, et M. De Paepe, « Coupled simulation of heat and moisture transport in air and porous materials for the assessment of moisture related damage », *Build. Environ*, p. 44(10) : 2176-84, 2009.
- [151] D. A. De Vries, « Simultaneous Transfer of Heat and Moisture in Porous Media », *Trans. American Geophysical Union*, p. 909- 915, 1958.
- [152] R. W. Lewis, K. Morgan, et H. R. Thomas, « In: The finite element method in heat transfer analysis », *Chichester*, UK: Wiley, p. 279, 1996.
- [153] S. W. Rees, Z. Zhou, et H. R. Thomas, « Ground heat transfer: A numerical simulation of a full-scale experiment », *Build. Environ*, p. 42(3) : 1478-1488, 2007.
- [154] F. Hasegawa, H. Yoshino, et S. Matsumoto, « Optimal use of solar energy techniques in a semi-underground house: first year measurement and computer analysis », *Tunnelling and Underground Space Technology*, p. 2(4), 429- 435, 1987.
- [155] H. Yoshino, S. Matsumoto, M. Nagatomo, et T. Sakanishi, « Five-year measurements of thermal performance for a semi-underground test house », *Tunnelling and underground space technology*, p. 7(4), 339- 346, 1990b.