ÉTUDE DU STOCKAGE THERMIQUE DANS LE SOL EN UTILISANT UN SCHÉMA A DIFFÉRENCES FINIES UNIDIMENSIONNEL

Bogdan HORBANIUC, Gheorghe DUMITRASCU, Andrei DUMENCU

UNIVERSITÉ TECHNIQUE "GHEORGHE ASACHI", Iaşi, Roumanie

Abstract. The paper deals with the ground storage of the heat resulting from the thermal coversion of the solar energy, with the purpose of using it as a heat source for heat pumps. The heat storage system is of the borehole type, with vertical pipes along which the hot respectively the cold fluid flow alternately. A single tube model is considered for which the unsteady, one-dimension conduction heat transfer across the soil is studied. The implicit finite difference technique is used. On the basis of the temperature field obtained by means of the finite difference technique, the stored respectively the released heat are determined for each moment.
Keywords: borehole heat strorage, single pipe; numerical simulation; finite difference.

1. PROLOGUE

Le stockage thermique est une technique utilisée dans le but de mettre en correspondance la fourniture de l'énergie (éolienne, solaire etc.) et la demande d'énergie du consommateur car celle-ci manifeste des fluctuations importantes ou cut-offs (périodiques ou aléatoires).

Il y trois deux types de systèmes de stockage thermique (SST) [1]: à chaleur sensible (la chaleur est stockée en tant que chaleur spécifique du matériel de stockage – eau, roches, sol, aquifère), à chaleur latente (la chaleur est stockée en tant que chaleur latente de fonte d'une substance qui parcourt une transition de phase – des sels fondus, paraffines, alliages etc.), respectivement thermochimique, qui utilise la chaleur d'une réaction chimique réversible.

Les effets bénéfiques immédiats du stockage thermique [2] dérivent principalement de l'amélioration de la capacité de génération d'énergie résultant d'une meilleure correspondance des courbes d'offre et de demande, parce que très rarement un pic de la demande peut être synchronisé avec la production d'énergie primaire.

Les plus importants avantages du stockage thermique sont [3, 4]: coûts réduits de la production et diminution de la consommation d'énergie, flexibilité en fonctionnement, coûts d'exploitation réduits, une plus grande efficacité de l'utilisation des équipements et réduction des émissions polluantes et par conséquent un impact écologique réduit.

La performance d'un système de stockage thermique peut être établie par l'intermédiaire des paramètres tels que : capacité de stockage [kWh/m^3, ou kWh/kg], taux de charge/décharge [kW], efficacité du stockage déterminée par l'intermédiaire de la dimension des pertes de chaleur [kW] et le comportement du matériau de stockage (MS) au cyclage thermique (la capacité de celui-ci de conserver ses propriétés thermophysiques pendant des longues périodes d'exploitation caractérisées par un très grand nombre de cycles charge/décharge).

Le stockage thermique dans le sol (également connu sous le nom de stockage diffusif) a quelques avantages supplémentaires tels que : propriétés thermophysiques favorables du sol en tant que MS, grande disponibilité du matériau de stockage, des coûts minimales de la construction du système de stockage (seulement des coûts de forage et de posage des tubes de circulation du fluide caloporteur) et une capacité de stockage pratiquement illimitée (par addition de nouveaux puits). Le principal désavantage de ce type de stockage dérive de la configuration du SST : celui-ci ne peut pas être isolé du point de vue thermique et par conséquent, les pertes de chaleur sont importantes. De plus, quelques limitations sont imposées : on limite la température à 135°C, car les sols sont humides et peuvent se dessécher si la température est trop élevée, respectivement une protection du site de stockage contre la circulation des eaux souterraines est nécessaire, entraînant une modification de la nappe phréatique.

Un système de stockage thermique dans le sol à tubes verticaux (acronyme consacré : BTES – Borehole Thermal Energy Storage) consiste en un

réseau de forages (puits) verticaux dans lesquels sont posés des tubes métalliques interconnectés, constituant un circuit d'un fluide caloporteur. Ces tubes transfèrent la chaleur dans le sol pendant la période de charge du SST et la soutirent pendant la période de décharge du cycle. Généralement, ces types de systèmes de stockage sont mieux adaptés au stockage intersaisonnier (à long terme) par exemple été-hiver, mais on peut l'utiliser également pour le stockage à court terme (diurne).

Les taux de charge / décharge de la BTES peuvent être évalués par la détermination de la dynamique du champ de température dans le matériau de stockage. Des différentes approches peuvent être considérées : le traitement analytique de la conduction thermique instationnaire respectivement l'approche numérique utilisant la méthode des différences finies qui évite les difficultés mathématiques presque insurmontables de la méthode analytique. Notre approche implique l'utilisation de la méthode numérique par l'intermédiaire d'un schéma unidimensionnel implicite à différences finies.

2. MODÈLE MATHÉMATIQUE ET APPROCHE NUMÉRIQUE

Un schéma du système este présenté sur la Figure 1. Le tube de rayon intérieur R_0, rayon extérieur R_P et longueur L est introduit dans le puits vertical ; un fluide caloporteur circule dans le tube, en échangeant de la chaleur avec le coefficient convectif k. Le rayon du domaine du matériau de stockage est R, suffisamment grand pour considérer que l'influence thermique du tube n'atteint pas ce point dans un délai raisonnable, ce qui conduit à considérer que ce domaine peut être considéré comme infini. La température du fluide caloporteur échauffé est t_{FC}, tandis que la température du fluide froid est considérée comme égale à la température t_∞ du sol, qui est initialement isotherme.

Hypothèses :

– le sol est homogène et isotrope en ce qui concerne les propriétés thermophysiques;

– le sol est sec (l'influence de l'humidité est négligeable);

– propriétés physiques du sol constantes;

– le tube est isotherme en longueur;

– la propagation de la chaleur est unidimensionnelle (radiale).

Dans le but d'obtenir la plus générale forme des solutions, on utilise des températures adimensionnelles définies comme suit :

$$\theta = \frac{t - t_\infty}{t_{FC} - t_\infty} \tag{1}$$

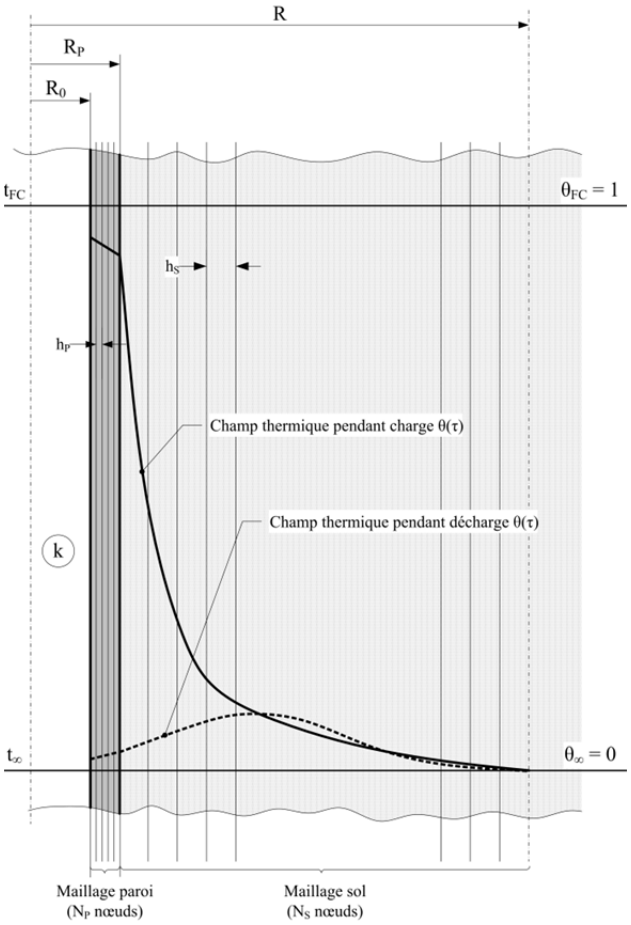


Fig. 1. Schéma du système analisé.

Les équations qui décrivent le phénomène de transfert thermique sont :

- l'équation du transfert par conduction en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial \tau} = a_i \left(\frac{\partial^2 \theta_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_i}{\partial r} \right) \tag{2}$$

où a est la diffusivité thermique et l'indice inférieur i signifie « P » pour la paroi métallique du tube, respectivement « S » pour la région du matériau de stockage thermique (le sol).

- l'équation de bilan thermique sur la surface extérieure de la paroi cylindrique du tube :

$$\lambda_P \left(\frac{\partial \theta_P}{\partial r} \right)_{r=R_P} = \lambda_S \left(\frac{\partial \theta_S}{\partial r} \right)_{r=R_P} \tag{3}$$

avec λ [W/mK] la conductivité thermique.

La condition initiale est :

$$\tau < 0: \quad \theta = \theta_0 \quad \forall r \in [R_P, R] \tag{4}$$

Les conditions aux limites sont :

- sur la surface intérieure du tube ($r = R_0$):

$$r = R_0: \quad \theta_{P,0} = \theta_R = 0 \tag{5}$$

– au bout de la région du matériau de stockage ($r = R$):

$$r = R : \left(\frac{\partial \theta_S}{\partial r}\right)_{r=R} = 0, \tau \geq 0 \qquad (6)$$

avec τ temps.

2.2. APPROCHE NUMÉRIQUE

L'équation de transfert par conduction (2), récrite en différences finies, devient [5], [6] :

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \cong \frac{1}{h^2} \cdot \left[\left(1 - \frac{h}{2 \cdot r_m}\right) \cdot \theta_{m-1} - 2 \cdot \theta_m + \left(1 + \frac{h}{2 \cdot r_m}\right) \cdot \theta_{m+1} \right] \qquad (7)$$

où h est le pas du maillage attaché au domaine du matériau de stockage et l'indice inférieur m signifie le numéro du nœud courant. Après une série de manipulations, l'équation (7) devient:

$$-\theta_{i,m-1}^{p} + \sigma_{i,m} \cdot \theta_{i,m}^{p} - \gamma_m \cdot \theta_{i,m+1}^{p} = \beta_{i,m} \qquad (8)$$

où l'indice supérieur p correspond au pas de temps courant (pas de temps numéro p).

Les coefficients σ, γ et β sont :

$$\sigma_{i,m} = \frac{2\left[N_i \frac{R_i}{\Delta_i} + m\right]}{2\left[N_i \frac{R_i}{\Delta_i} + m\right] - 1} \left[2 + \frac{\left(h_i\right)^2}{a_i \Delta\tau}\right] \qquad (9)$$

$$\gamma_m = \frac{2\left[N_i \frac{R_i}{\Delta_i} + m\right] + 1}{2\left[N_i \frac{R_i}{\Delta_i} + m\right] - 1} \qquad (10)$$

$$\beta_m = \frac{2\left[N_i \frac{R_i}{\Delta_i} + m\right]}{2\left[N_i \frac{R_i}{\Delta_i} + m\right] - 1} \frac{h_i^2}{a_i \Delta\tau} \qquad (11)$$

où Δ est l'épaisseur de la région i ($\Delta = R_P - R_0$ pour i = "P", respectivement $\Delta = R - R_P$ pour i = "S", h este le pas du maillage, $\Delta\tau$ est le pas de temps et N est le nombre total de nœuds d'un domaine.

Pour un pas de temps, les équations à différences finies du type (8), ainsi que l'équation de bilan thermique et les conditions au limites écrites en termes de différences finies, forment un système d'équations linéaires qui doivent résolues simultanément. Puisque la matrice du système est tridiagonale [7, 8], le système peut être résolu par la technique d'élimination de Gauss, qui est recommandable dans se cas en raison de la structure simple de la matrice.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le modèle mathématique et l'approche numérique présentés ont été appliqués sur l'exemple d'un tube singulier. Le but de notre démarche fut d'analyser la dynamique du phénomène de propagation et de stockage de la chaleur dans le sol par l'intermédiaire de l'évolution du champ de température et de la quantité de chaleur stockée/soutirée dans un cycle stockage/déstockage.

On a considéré les propriétés thermophysiques suivantes : pour le matériau de la paroi métallique du tube : λ_W = 50 W/mK, a_W = 13,8 m^2/s; pour le sol (sol argileux) [9]: λ_S = 0,25 W/mK, a_S = 0,18 m^2/s, c_S = 0,89 kJ/kgK, ρ_S = 1600 kg/m^3. Dimensions du tube : R_0 = 25 mm, R_W = 28 mm, L = 10 m. Le rayon du domaine du matériau de stockage : R = 428 mm. Températures : t_{FC} = 100°C, t_∞ = 12°C. Le coefficient convectif : k = 1000 W/m^{2}K.

Les maillages : nombre de nœuds dans la paroi du tube : N_W = 5 ; nombre de nœuds dans la région du matériau de stockage : N_S = 100.

Le pas de temps considéré a été d'une seconde. Les durées des phases de charge respectivement décharge du cycle ont été fixées à 8 heures (28800 s). On a considéré un seul cycle charge/décharge.

On a écrit deux logiciels séparés pour les deux phases du cycle. Les données de sortie du logiciel pour stockage ont été utilisées comme données d'entrée pour le logiciel de déstockage. Supplémentairement, on a écrit un logiciel pour la période de temps pendant laquelle la chaleur stockée diffuse dans le sol sans soutirage. Une telle hypothèse était nécessaire pour étudier ce qui se passe si le soutirage de chaleur ne suit pas immédiatement le stockage.

Les Figures 2 … 4 se réfèrent au processus de stockage. La Figure 2 présente les courbes de variation de la température du sol en direction radiale à des moments de temps sélectionnés. La valeur maximum sur l'axe x a été limitée à 65 nœuds parce que la distance "perceptible" de propagation de la perturbation thermique pendant la période de charge considérée a été d'environ 65 nœuds, ce qui correspond à un longueur de 260 mm. Une meilleure image de l'évolution de la température est offerte par la Figure 3, qui représente une surface 3-D dont les axes du plan horizontal sont le numéro du nœud et le

temps. Ainsi, on peut mieux observer l'évolution de la température dans chaque nœud.

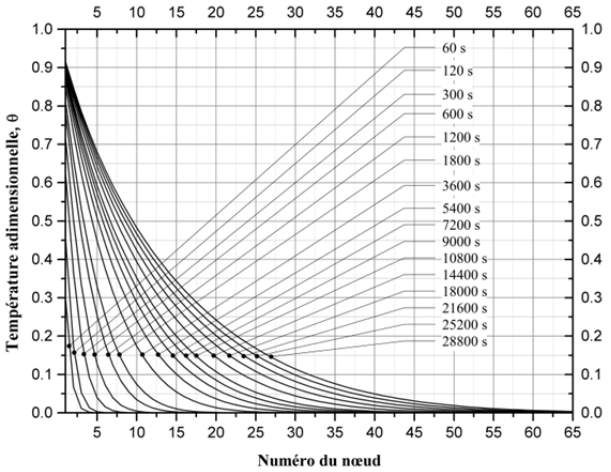


Fig. 2. Le champ de température lors du processus de charge (stockage).

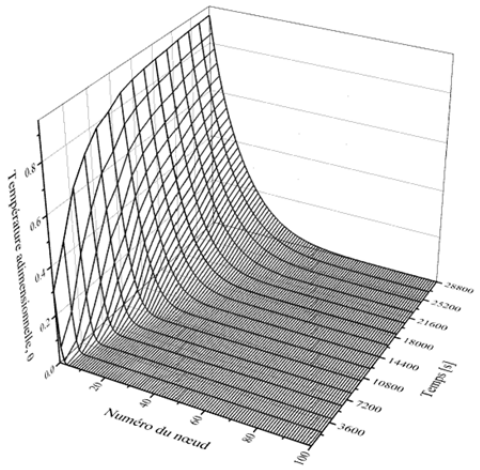


Fig. 3. Surface 3-D du champ de température pendant le stockage.

La Figure 4 présente l'évolution de chaleur stockée dans le sol pendant la phase de charge. A l'exception d'un bref intervalle au début du processus, la quantité de chaleur stockée montre une croissance presque linéaire. La chaleur totale stockée est de 33748,83 kJ, ce qui représente 4,7% de la quantité théoriquement maximum possible, qui est atteinte quand la température du sol égale t_{FC} tout au long de l'épaisseur du domaine du matériau de stockage.

Les Figures 5 … 7 traitent de la phase de déstockage. La Figure 5 représente le diagramme de la variation de la température du sol lors du processus de déstockage. Après l'arrêt du processus de charge, le soutirage de la chaleur stockée est initié immédiatement. En conséquence, le champ de température initial (la distribution spatiale de la température à la fin de la phase de stockage) commence à être déformé par le refroidissement, qui soutire de la chaleur de la couche de sol en contact avec la surface extérieure du tube. En conséquence, les courbes de température présentent un maximum qui migre radialement et s'aplatisse lorsque le processus avance.

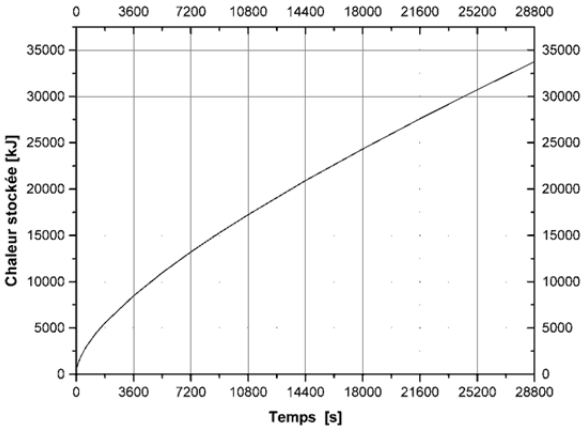


Fig. 4. Évolution de la quantité de chaleur stockée pendant la phase de stockage du cycle.

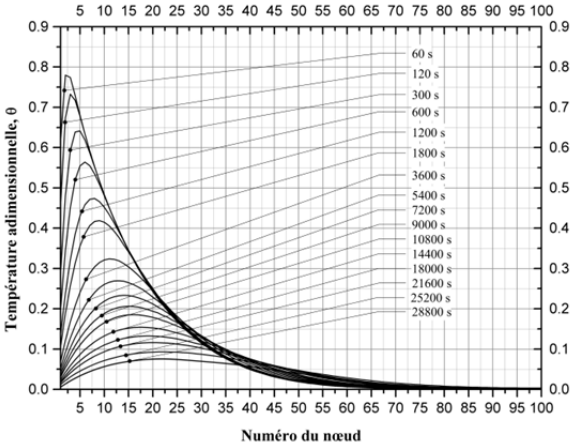


Fig. 5. Le champ de température lors du processus de soutirage (déstockage).

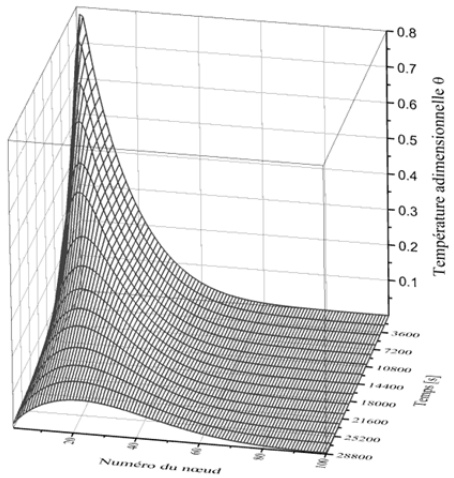


Fig. 6. Surface 3-D du champ de température pendant le soutirage.

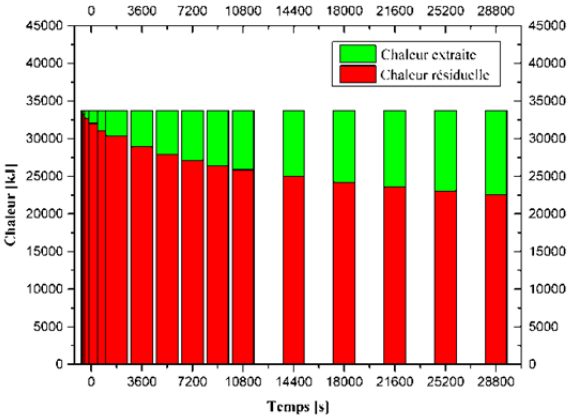


Fig. 7. Évolution des quantités de chaleur extraite, respectivement restée dans le sol.

Lorsque le refroidissement avance et de la chaleur continue a être extraite de la région voisine au tube, les couches de matériau de stockage placées à grande distance du tube continuent à transmettre la chaleur vers les régions plus lointaines et ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'elles sont atteintes par la perturbation thermique. Ceci explique pourquoi les maxima continuent à avancer vers le bout du domaine du matériau de stockage, bien qu'un refroidissement a lieu à l'autre extrémité.

Une représentation 3-D du champ de température similaire à celle correspondant à la phase de stockage est montrée sur la Figure 6.

En ce qui concerne la phase de soutirage, un diagramme du type Figure 4 est moins significatif du point de vue de l'information qu'il offre. C'est pourquoi nous avons choisi de représenter dans un diagramme à barres (Figure 7) la quantité de chaleur extraite du sol jusqu'au moment considéré, respectivement la quantité de chaleur restée sous forme de chaleur stockée jusqu'à ce moment. A la fin du processus de soutirage pendant lequel une quantité de chaleur de 11173,76 kJ avait été extraite, 22575,07 kJ de chaleur restent encore stockés dans le sol.

Afin d'étudier ce qui se passe si le déstockage ne poursuit immédiatement le stockage, nous avons simulé la propagation de la chaleur existante dans le sol à la fin de la phase de stockage sans soutirage (phase dite "Stand by") et la configuration du champ de température à différents moments. On a considéré un période de 8 heures, bien qu'en réalité la durée de la phase *Stand by* puisse être plus courte. Les Figures 8 et 9 montrent les résultats de la simulation numérique.

La Figure 8 présente les courbes de variation de la température pour des différents moments de la phase *Stand by*. Comme on s'y attendait, les courbes de température conservent la même allure, mais au fur et à mesure que le temps avance, la pente diminue et les courbes s'aplatissent. Seulement 50 nœuds ont été considérés parce que sur cette distance les différences entre les courbes de température sont visibles.

La Figure 9 présente la surface 3-D du champ de température. Cette fois-ci on a considéré le domaine entier et on peut observer que sur les derniers 10 nœuds le champ est pratiquement isotherme.

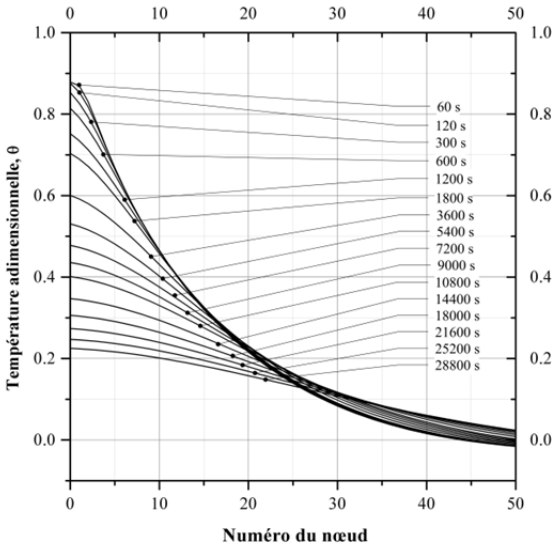


Fig. 8. Évolution du champ de température pendant la période de Stand by.

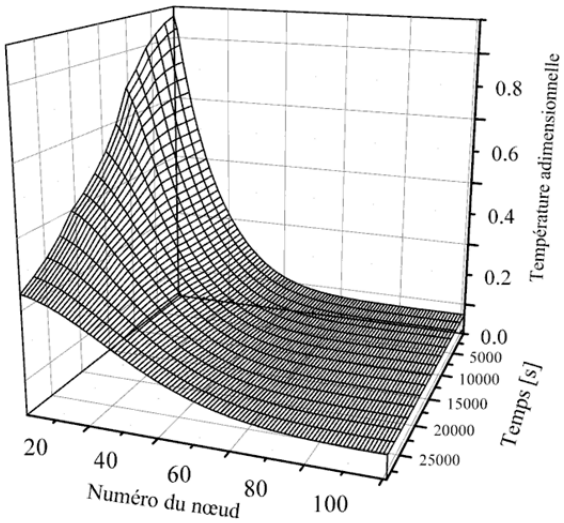


Fig. 9. Surface 3-D du champ de température pendant le Stand by.

4. CONCLUSIONS

Le stockage thermique dans le sol à tubes verticaux (BTES) peut représenter un candidat sérieux pour le stockage diurne de la chaleur, notamment pour les installations à pompe à chaleur.

On a développé un modèle mathématique et un traitement numérique à différences finies du pro-

blème de la diffusion unidimensionnelle de la chaleur dans le sol dans le cas d'un tube singulier. En utilisant ce modèle dans le but d'étudier la dynamique du phénomène, on a déterminé le champ de température en direction radiale et la quantité de chaleur stockée/déstockée. Le champ de température a été déterminé pour les deux phases d'un cycle (stockage et soutirage) et pour la période *Stand by*.

L'exemple présenté dans cet article montre que le modèle mathématique et l'approche numérique à différences finies que nous avons développés fonctionnent bien sur le cas d'un système de stockage thermique dans le sol à tube singulier et par conséquent on peut passer à un modèle perfectionné à plusieurs tubes et en considérant la diffusion de la chaleur en deux directions.

RÉFÉRENCES

[1] ADEME – *Les systèmes de stockage de l'énergie. Feuille de route stratégique*. En libre accès sur le site www.ademe.fr, (2011).

[2] I. Dincer, M. A. Rosen – *Thermal Energy Storage. Systems and Applications*, Second Edition, J. Wiley & Sons Ltd, Chichester, West Sussex, United Kingdom, (2011).

[3] I. Dincer, M. A. Rosen – Energetic, environmental and economic aspects of thermal energy storage systems for cooling capacity, *Applied Thermal Engineering*, 34, p.377-388, (2001).

[4] I. Dincer – On thermal energy storage systems and applications in buildings, *Energy and Buildings*, 21, p.1105-1117, (2002).

[5] B. Horbaniuc, Gh. Dumitraşcu, A.Popescu – *Inward Solidification in Cylindrical Tubes*, ASME Proceedings of the 6th ICCES Conference, Corfu, Greece, on CD, (2003).

[6] B. Horbaniuc, Gh. Dumitraşcu, – *Outward Solidification around Cylindrical Metallic Walls*, Buletinul Institutului Politehnic din Iaşi, publicat de Universitatea Tehnică Gh. Asachi, Iaşi, LII (LVI), Fasc. 6C, Secţia Construcţii de Maşini, p.157-164, (2006).

[7] D. R. Croft, D. L. Lilley – *Heat Transfer Calculations Using Finite Difference Equations*, Applied Science Publishers Ltd., London, (1977).

[8] R. LeVeque – *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations*, S.I.A.M., Philadelphia, (2007).

[9] P. Arya – *Introduction to Micrometeorology*, Academic Press, London, (2001).