

Etude de l'Efficacité d'un Echangeur Géothermique Horizontal

Abdel ylah Benazza¹, Nouredine Retiel², Mostefa Aichouba¹, Samir Laouedj¹
¹Djillali Liabes University of Sidi Bel-Abbès, Algeria – Laboratory of materials and reactive systems
²Laboratoire de Modélisation Numérique et Expérimentale des phénomènes Mécaniques
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
abdel_benazza@yahoo.fr

Résumé — Les dérèglements climatiques et la forte dépendance énergétique vis-à-vis des énergies fossiles, ont amené un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables parmi lesquelles l'énergie géothermique. Les installations géothermiques basses enthalpies utilisent des capteurs enfouis verticalement ou horizontalement dans le sol et couplés à une pompe à chaleur (pac) à des fins de chauffage ou climatisation. Dans cet article une configuration horizontale d'un échangeur de chaleur constitué de séries de tubes disposés de façon concentriques et en plusieurs couches a été étudiée. Une simulation numérique quasi tridimensionnelle instationnaire du transfert de chaleur entre le capteur et le sol a été réalisée afin d'estimer le potentiel de climatisation d'un édifice sous conditions climatiques spécifiques à une zone de l'Algérie. La variation des conditions climatiques a été prise en compte en modélisant la température de l'air et du sol à l'aide d'une fonction harmonique pure. L'influence des paramètres géométriques tels que la profondeur d'enfouissement, le nombre de couches et leurs espacements sur l'efficacité de l'échangeur a été aussi étudiée.

Mots Clés : géothermie, échangeur de chaleur horizontal, simulation numérique

Abstract — Ground-coupled heat exchangers have been recognized as being among the most energy efficient systems for space heating and cooling in residential and commercial buildings. Many research projects have focused towards the use of ground as a heat source considering vertically or horizontally buried pipes coupled to a heat pump. In this paper the study was carried out on a horizontal configuration based on a series of concentric pipes. An unsteady quasi-3D numerical simulation was established for cooling purposes in continuous operating mode. The variation of the climatic conditions in transient simulation was taken into account by modeling the air and ground temperature using a simple harmonic function. Several parameters such as: burial depth, ground layers number and their spacing have been studied in order to analyze their influences on ground-coupled heat exchangers efficiency.

Keywords: geothermal energy, horizontal heat exchanger, numerical simulation.

NOMENCLATURE

- T Température, [K].
- T_{ma} Moyenne annuelle de la température de l'air [K].
- T_{va} Amplitude de la température de l'air, [K].
- t Temps, [jours].
- α Diffusivité thermique, [m²/s].

ϕ_s	Déphasage entre la température de l'air et celle du sol, [rad].
T_m	Moyenne de la température du sol, [K].
T_v	Amplitude de la température du sol, [K].
k	Conductivité thermique, [W/m K].
y	Profondeur, [m].
ω	Pulsation : $2\pi/365$ [rad/j].

Index

a : Air

0 : jour ou la température est maximale

S : Sol

1. INTRODUCTION

Maintenir une température confortable dans un bâtiment peut requérir une importante quantité d'énergie. Des systèmes indépendants de chauffage et de climatisation sont le plus souvent utilisés pour maintenir cette température en utilisant une source d'énergie qui est généralement l'électricité ou un combustible fossile. La forte dépendance énergétique vis-à-vis des énergies fossiles et le réchauffement de la terre ont amené un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables parmi lesquelles l'énergie géothermique. La géothermie de surface ou géothermie très basse température s'appuie sur l'inertie thermique du sol. En effet, la température du sol reste globalement constante dans une zone s'étendant d'une profondeur de 6m à environ 45m (Chiasson, A.D [1]). Cette zone de température constante est le résultat d'une interaction complexe des flux de chaleur provenant de la surface du sol (soleil et atmosphère) et ceux issus du noyau de la terre. Par conséquent la température du sol dans cette zone est toujours plus élevée que celle de l'air extérieur en hiver et est plus basse en été. Plusieurs technologies existent pour assurer l'échange de chaleur entre un édifice et le sol. La chaleur peut être prélevée dans le sol grâce à un forage dont la profondeur est de l'ordre de la centaine de mètres, ou grâce à des capteurs horizontaux couplés aux pompes à chaleur. Les capteurs horizontaux sont enfouis à des profondeurs comprises entre 1 et 3 m leur performance est donc affectée par les conditions climatiques à la surface du sol. Dans la littérature plusieurs travaux ont été réalisés pour traiter le problème de transfert de chaleur dans le sol. Les modèles analytiques sont typiquement basés sur la théorie de la ligne source (Ingersoll, [2]) ou la source cylindrique (Carslaw et Jaeger, [3]), les deux modèles supposent une source de longueur infinie dans un milieu isotrope, ces modèles ne prennent pas en compte la variation de la température en profondeur et les effets de surface tel que la radiation et la convection. D'autre part plusieurs études numériques et expérimentales ont traitées les échangeurs géothermiques verticaux. Eskilson [4] a étudié le problème de la réponse thermique d'un échangeur à sondes géothermiques multiples

soumis à des conditions variées. Rottmayer, et al. [5] ont développés un modèle numérique basé sur une technique de différence finie explicite afin de simuler les conditions de transfert de chaleur d'une sonde géothermique tube en U. MURAYA, et al. [6] ont réalisé un modèle transitoire bidimensionnel en éléments finis pour étudier l'interférence thermique entre les tubes en U. Peu de travaux ont été consacrés aux capteurs horizontaux. Mei [7] a utilisé la méthode des différences finis pour étudier l'influence des variations saisonnières de la température du sol sur les échanges de chaleur d'un tube linéaire disposé horizontalement. Il a comparé ses résultats avec les modèles de la ligne source. Piechowsky [8] introduit le transfert de masse dans son modèle numérique aux différences finis pour prendre en compte l'humidité du sol. Les effets de la convection au niveau de la surface du sol ont été étudiés par B.Bohm [9] et M Chung et al. [10]. Inalli, M et Esen, H. [11] ont étudié expérimentalement l'influence des paramètres comme la profondeur à laquelle sont enterrés les échangeurs ou le débit massique de la solution eau –antigel dans un échangeur horizontal en forme de serpent. Demir et al. [12] ont réalisé une étude numérique bidimensionnelle en différences finis prenant en compte les effets climatiques sur les performances d'un échangeur horizontal constitué de trois tubes parallèles. Leurs résultats ont été comparés à des mesures expérimentales réalisées sur site.

Dans cet article une simulation quasi 3D d'une configuration d'échangeur horizontal a été menée en prenant en compte la variation des conditions climatiques. L'influence des paramètres géométriques tels que la profondeur d'enfouissement, le nombre de couches et leurs espacements sur l'efficacité de l'échangeur a été aussi étudiée.

2. MODELE NUMERIQUE

L'étude numérique porte sur un échangeur constitué d'une série de tubes concentriques enterrés à une profondeur donnée et couvrant une surface circulaire de 100m². Le domaine entourant les tubes est représenté par un cylindre de hauteur et de rayon assez larges et présentant donc une symétrie axiale. Le modèle de simulation quasi 3D a été développé en un domaine 2D avec une condition axisymétrique (Fig.1.).

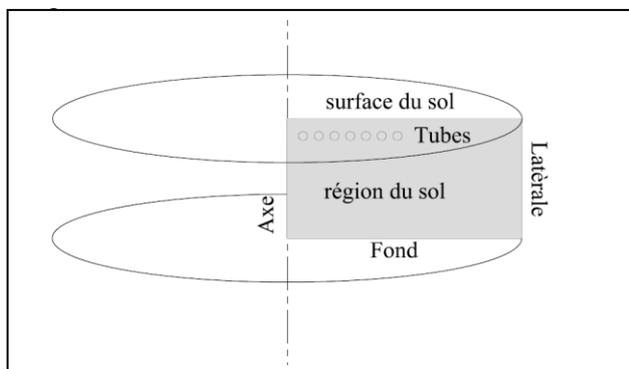


Fig.1. Configuration de l'échangeur et du terrain

L'échangeur est couplé à une PAC destinée à la climatisation d'un édifice et de ce fait le transfert de chaleur s'effectue des tubes vers le sol. L'équation de transfert de chaleur en régime transitoire est résolue par la méthode des volumes finis en utilisant le code de calcul Fluent. La simulation est réalisée durant les deux

mois de l'été juillet et aout en prenant en compte les effets climatiques. Les variations saisonnières de la température de l'air et du sol peuvent être approximée par des fonctions harmoniques pures comme suit (Kusuda, T., and Achenbach, P. R [13], Krarti et al. [14]).

$$T_a = T_{ma} + T_{va} \cos \omega(t - t_0) \quad (1)$$

$$T_s = T_m + T_v \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} y\right) \cos\left(\omega(t - t_0) - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} y - \phi_s\right) \quad (2)$$

T_{ma} et T_{va} sont obtenues par lissage des données de la température de l'air fournies par la station météo du lieu considéré. Le lissage de la courbe des températures porte sur des valeurs moyennées de 20 années consécutives (1986, 2005) d'un site Algérien située à une latitude de 35° et une longitude de 0.15 (Fig.2).

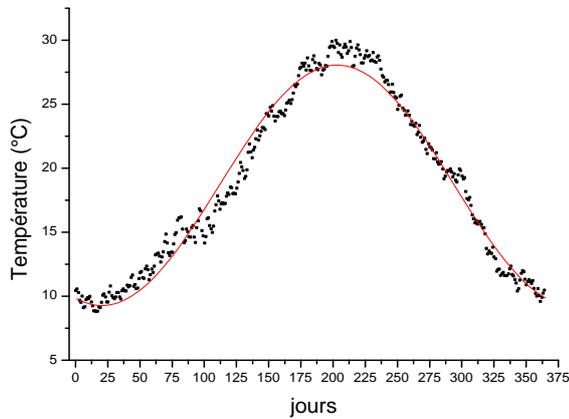


Fig.2. Lissage de la température de l'air

Les paramètres du sol T_m , T_v et Φ_s représentant respectivement la température moyenne, l'amplitude et le déphasage sont fonction des paramètres de l'air (T_{ma} , T_{va}) et des différents flux énergétiques au niveau de la surface du sol. Ces grandeurs ont été déterminées en utilisant le modèle analytique de Krarti et al. [14] intégrant les différents flux thermiques tel que : la radiation solaire, la convection au sol, la radiation des ondes longues, la précipitation et l'évaporation. Les valeurs du flux solaire au lieu considéré ont été tirées de la base de données "SSE" de la NASA [15]. Les résultats obtenus dans le cas d'un sol argileux sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: Valeurs de T_m , T_v , Φ_s et propriétés thermo physiques du sol testé.

Sol : argile sec	T_m °K	T_v °K	Φ_s rad
k=0.87	294.34	284.83	0.070
$\alpha=0.54 \times 10^{-6}$			

2.1 Maillage et conditions aux limites

La configuration de base est un domaine de taille 180m x 180m comportant 8 tubes de diamètres 30 mm, espacés d'une distance de 0.7m et enfouis à une profondeur de 2.5m (fig.3). Le maillage est de type triangulaire non structuré avec 148904 cellules concentrées principalement aux voisinages des surfaces des tubes (fig.4).

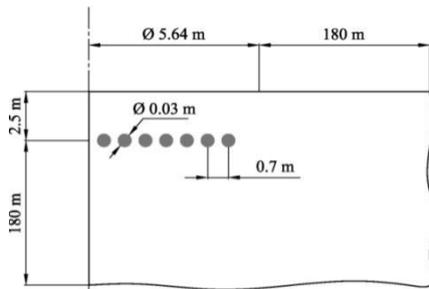


Fig.3. Configuration de base

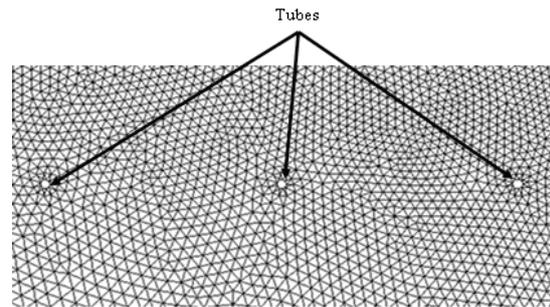


Fig.4. Vue du maillage autour des tubes

La température des tubes est fixée à une valeur constante $T=29^{\circ}\text{C}$ sans aucune modélisation de l'écoulement du liquide à l'intérieur des tubes ceci nécessite une étude tridimensionnelle. Sur la surface du sol la température est imposée par l'équation (1) par contre suivant l'axe du domaine une condition de symétrie axiale est appliquée. Sur les deux frontières fond et latérale placées suffisamment loin, les températures imposées sont dépendantes de la saison et de la profondeur y , elles sont déterminées en utilisant l'équation (2) (Kusuda, T., and Achenbach, P. R [13], Krarti and al. [14]). L'initialisation des températures du terrain au début de la simulation (1^{er} juillet) est réalisée à l'aide de l'équation (2).

3. RESULTATS-DISCUSSION

3.1 Configuration de base : évolution du flux thermique et champ de température

Les simulations ont été réalisées durant 60 jours pour un régime de fonctionnement continu de la climatisation (24h/24h). La fig.5 montre la distribution de la température dans le sol, on constate que la répartition du champ de température n'est pas uniforme elle est concentré aux voisinages des tubes de sorte que plus on s'éloigne des tubes le gradient de température devient moins important, on peut dire que l'onde de chaleur ne pénètre pas suffisamment dans le terrain due à l'inertie thermique du sol.

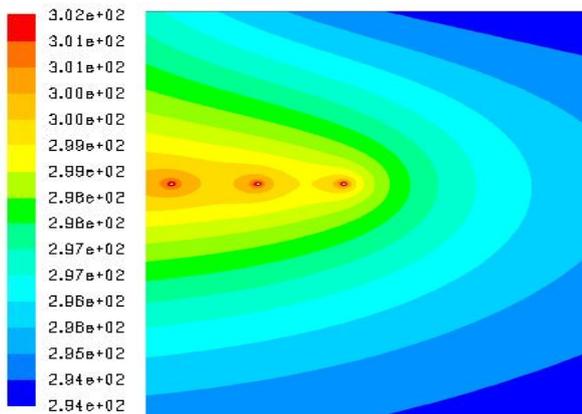


Fig.5. Champ de température dans le sol (°K)

Sur la fig.6 est présentée l'évolution temporelle du flux de chaleur injecté rapporté au m^2 de la surface couverte par les tubes. On constate que la quantité de chaleur échangée diminue de manière très accentuée dans la première semaine de fonctionnement pour tendre de façon asymptotique vers une valeur constante après une période de fonctionnement assez conséquente, montrant ainsi une certaine saturation thermique du sol.

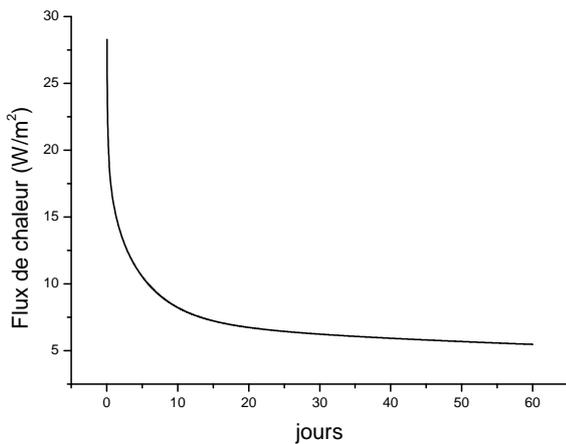


Fig.6. Evolution du flux de chaleur pour 60 jours de fonctionnement

3.2 Profondeur d'enfouissement

Pour cette étude nous avons considéré quatre valeurs de profondeur (1.2, 2, 2.5 et 3.2 m) afin d'analyser l'influence de la profondeur d'enfouissement des tubes sur le flux de chaleur.

La figure 7 présente la variation du flux de chaleur moyen en fonction de la profondeur d'enfouissement.

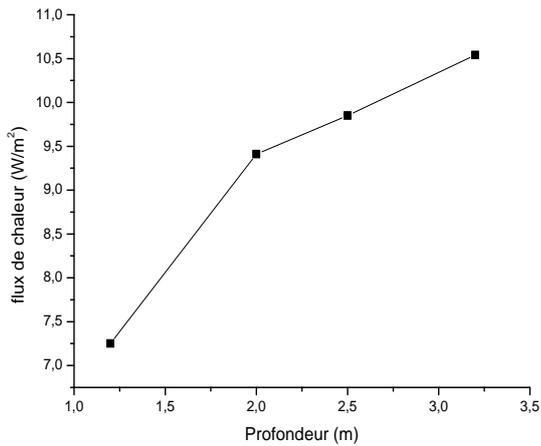


Fig.7. Flux thermique moyen en fonction de la profondeur d’enfouissement de l’échangeur.

On constate sur la figure 7 que le flux de chaleur moyen échangé augmente à mesure que la profondeur augmente. Ce qui est en relation avec la tendance décroissante de la température initiale du terrain avec la profondeur établie par l’équation (2), et indique que les variations de température de l’air extérieur imposées comme conditions aux limites sur la surface du sol sont d’autant plus amorties et déphasées par le terrain que la profondeur est grande. D’autre part le gradient du flux «pente de la courbe» diminue lorsque la profondeur augmente, conséquence d’un gradient de température initiale du terrain décroissant et tendant vers une valeur nulle pour les profondeurs comprises entre 6m et 45 m (Chiasson [1]). On peut dire finalement qu’au delà d’une certaine profondeur le gain en flux de chaleur pourrait ne pas compenser le cout des travaux d’excavation du terrain.

3.3 Effet de la distance inter couche

L’étude de l’influence de l’espacement inter couche sur le flux de chaleur pour une configuration à deux couches (fig.8.) a porté sur cinq valeurs de cet espacement (0.5, 0.8, 1.10, 1.30, 1.50 m) pour la même surface de sol couverte (100m²).

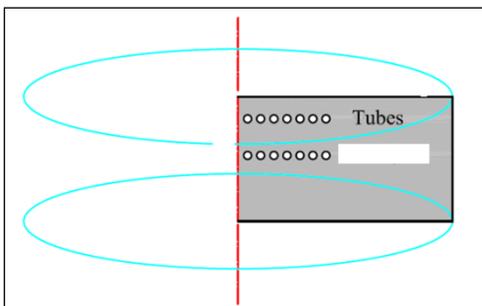


Fig.8. Configuration à double couche

La figure 9 illustre la variation du flux de chaleur moyen en fonction de la distance séparant les deux couches. On constate un accroissement linéaire du flux de chaleur avec l'espacement inter couche qui pourrait être dû à la baisse de l'influence thermique mutuelle entre les deux couches lorsque leur espacement augmente. Mais l'accroissement n'est pas très significatif, il passe de 9.5 W/m^2 à 11.5 W/m^2 lorsque l'espacement est triplé.

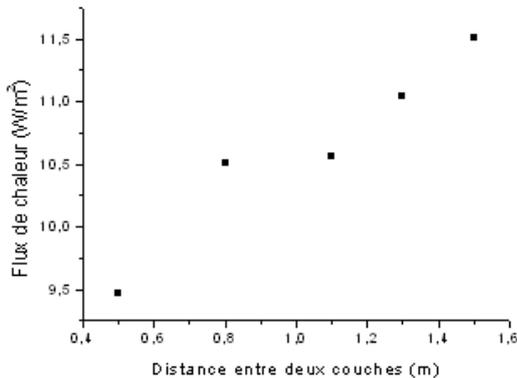


Fig.9. Variation du flux de chaleur avec la distance entre deux couches.

3.4. Nombre de couches

Des configurations à $N=2, 3$ et 4 couches agencées à distances inter couches constantes (0.5m) ont été simulées afin d'étudier l'influence du nombre de couches sur le flux de chaleur échangé. La figure 10 montre que le flux de chaleur moyen transmis augmente de manière quasi linéaire avec le nombre de couches du capteur. Un accroissement du flux thermique de l'ordre de 40% est obtenu pour la configuration à quatre couches. Néanmoins ceci en dépit d'une augmentation du coût lié au prix de l'échangeur et au coût des travaux d'excavation du terrain.

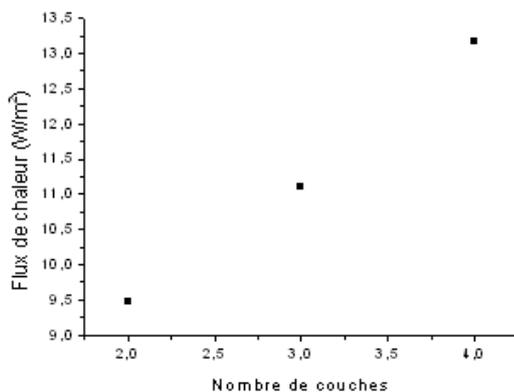


Fig.10. Flux de chaleur moyen en fonction du nombre de couches

4. CONCLUSION

Une simulation numérique quasi tridimensionnelle d'un échangeur de chaleur géothermique horizontal a été réalisée pour les besoins de climatisation en mode de fonctionnement continu. L'effet des paramètres géométriques tels que la profondeur d'enfouissement, le nombre de couches et leurs espacements sur l'efficacité de l'échangeur a été aussi analysé. Il a été montré que le mode de fonctionnement continu produit une certaine saturation thermique du sol de sorte que le flux de chaleur chute à des valeurs assez basses. L'effet du nombre de couche de l'échangeur thermique est traduit par un accroissement linéaire du flux de chaleur transmis. La profondeur d'enfouissement de l'échangeur et l'espacement inter couche permettent une certaine augmentation mais elle n'est pas très significative. On note finalement que pour le sol étudié argile sec à conductivité thermique basse les valeurs des flux de chaleur échangés restent encore moins importante ce qui nécessite une augmentation de la surface du sol utilisée où bien un couplage du capteur à une pompe à chaleur.

Bibliographie

- [1] Chiasson, A.D., "Advances in modelling of ground-source heat pump systems", MSc. Thesis, Oklahoma State University, 168 p. (1999)
- [2] Ingersoll, L. R., "Theory of Earth Heat Exchangers for the HeatPump," *Heat Conduction*, University of Wisconsin Press, Madison, W I. (1954), pp. 240-271.
- [3] Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed, 1959, Oxford University Press, Oxford, England U.K.
- [4] Eskilson, P. "Thermal analysis of heat extraction boreholes". PhD. Thesis. (1987): Lund University Sweden.
- [5] Rottmayer, S.P., Beckman, W.A., and Mitchell, J.W. "Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium". *Ashrae Transactions*, Vol. 103, No. 2, (1997), pp. 651-658.
- [6] Muraya, N. K. et al. "Thermal interference of adjacent legs in a vertical U-tube heat exchanger for a ground-coupled heat pump". *Ashrae Transactions*, Vol. 102, No. 2, (1996): pp. 12-21.
- [7] Mei, V. C, "Horizontal Ground-Coil Heat Exchanger Theoretical and Experimental Analysis," ORNL/CON- 193, 1986, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN
- [8] Piechowsky, M. "A Ground Coupled Heat Pump System with Energy Storage", PhD thesis, The University of Melbourne, 1996.
- [9] Bohm, B. "On transient heat losses from buried district heating pipes", *Int. J. Energy Res.* 24 (2000) 1311–1334.
- [10] Chung, M., Jung, P.S., Rangel, R.H. "Semi-analytical solution for heat transfer from a buried pipe with convection on the exposed surface", *Int. J. Heat Mass Transfer.* 42 (1999) 3771–3786.

- [11] Inalli, M., Esen, H. “Experimental thermal performance evaluation of a ground-source heat pump system”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, (2004): pp. 2219-2232.
- [12] Demir, H., Koyun. A., and Temir. G. “ Heat transfer of horizontal parallel pipe ground heat exchanger and experimental verification”. *Applied Thermal Engineering*. 29(2009) 224-233.
- [13] Kusuda, T., and Achenbach, P. R., "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in United States," *ASHRAE Transactions*, Vol. 71, 1965, Part 1.
- [14] Krarti. M., Lopez-Alonzo. C., Claridje. D. E., Kreider. J. F. “Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation”. *Journal of Solar Energy Engineering*. May 1995, Vol. 117/91
- [15] Surface meteorology and solar energy.
www.eosweb.larc.nasa.gov/sse