ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Energie Solaire et Bâtiment
Sonnenenergie und Bauwesen
Solar Energy in Buildings

Conférence Internationale Energie Solaire et Bâtiment

Lausanne, 22 - 23 septembre 1999

LOGICIEL

PILESIM - LASEN, June 99 version D. Pahud, A. Fromentin		*Langues disponibles* ☐ Français ☒ Anglais ☐ Allemand ☐ ..... ☐ Italien ☐ .....
Editeur LASEN-DGC EPFL CH - 1015 Lausanne	*Distributeur* ENET Postfach 130 CH - 3000 Bern 16	*Prix* Frs 300.-

Descriptif

PILESIM is a dynamic simulation programme for the assessment of the thermal performances of a heating/cooling system which uses heat exchanger piles or borehole heat exchangers. The long-term effects, which can be determinant in correctly sizing such an installation, can be simulated for up to 25 years. A user-friendly interface allows the user to define the parameters relative to his particular problem: heating and cooling demand, heat pump and cooling machine, heat exchanger piles or borehole heat exchangers, local geology and hydrogeology. Several system configurations are available. The piles or boreholes can be directly coupled to the distribution of the cooling energy, or through the intermediary of a cooling machine. The system can be bivalent, i.e. auxiliary energy can be provided in order to meet the heating and cooling requirements.

PILESIM was developed at the Laboratory of Energy Systems (LASEN) of the Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL). The development was supported financially by the Swiss Federal Office of Energy (OFEN) in the framework of the Heat Storage Programme.

PILESIM takes advantage of the experience gained from the simulation of systems with heat exchanger piles (development and validation of simulation tools) and uses the TRNSED feature of the TRNSYS programme. Ask for a free demo version by e-mail: *Daniel.Pahud@epfl.ch* (size of the file to be transferred: 1.4 Mb).

Données techniques

Systèmes d'exploitation		*Processeur* **Pentium**
☒ **Windows 95** ☒ **Windows 98** ☒ **Windows NT**	☐ **Mac OS** ☐ **Mac + SoftWindows** ☐ **Mac + Carte PC** ☐ **Unix**	*Mémoire nécessaire* **16 Mb**
☐ **Autre**		*Espace disque nécessaire* **11 Mb**

PILESIM, UN OUTIL DE SIMULATION DYNAMIQUE D'INSTALLATIONS AVEC PIEUX ÉCHANGEURS OU SONDES GÉOTHERMIQUES

D. Pahud; A. Fromentin

LASEN - Département de génie civil EPFL - Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, CH - 1015 Lausanne EPFL

ABSTRACT

PILESIM is a user-friendly programme devised for the thermal simulation of heat exchanger pile systems. A heat exchanger pile system is a system which uses the foundation piles of a building for heating and cooling purposes. Borehole heat exchangers may also be simulated with PILESIM. PILESIM is based on the development of simulation tools with the TRNSYS system simulation programme, in which the non-standard TRNVDST component was adapted for the simulation of heat exchanger piles. A short description of the PILESIM programme and the calculation models are presented.

RÉSUMÉ

PILESIM est un programme convivial destiné à la simulation thermique d'installations avec pieux échangeurs. Une installation avec pieux échangeurs est un système qui utilise les pieux de fondation d'un bâtiment pour servir des besoins de chauffage et de refroidissement. Un ensemble de sondes géothermiques peut également être simulé avec PILESIM. PILESIM est basé sur le développement d'outils de simulation avec le programme de simulation dynamique TRNSYS, dans lequel le composant non-standard TRNVDST a été adapté à la simulation de pieux échangeurs. Une brève description de PILESIM et des modèles de calcul utilisés sont présentés dans ce papier.

INTRODUCTION

Une installation avec pieux échangeurs est un système de chauffage et/ou de refroidissement qui utilise des pieux de fondation comme échangeur de chaleur avec le terrain. En d'autres termes, un tube ou un réseau de tubes est installé dans les pieux pour pouvoir faire circuler un fluide caloporteur qui échangera de la chaleur avec le terrain. Les pieux sont généralement raccordés à une pompe à chaleur pour satisfaire des besoins de chaleur en hiver. Les charges thermiques issues d'une production de froid en été peuvent être rejetées dans le terrain par les pieux, soit directement ou soit par le biais d'une machine frigorifique.

La contrainte principale imposée au système concerne les sollicitations thermiques subies par les pieux. Elles ne doivent pas nuire à leur fonction première, qui est de supporter les charges du bâtiment. En particulier, le gel des pieux doit être évité à tout prix. Dans un système bien dimensionné, le fluide caloporteur circulant dans les pieux ne descend jamais sous la barre des 0°C pendant une durée prolongée. Cette contrainte de température influence la taille de la pompe à chaleur et ainsi le potentiel de chauffage offert par les pieux. Par ailleurs, le refroidissement direct sur les pieux, c'est-à-dire le transfert de charges thermiques dans le terrain par le biais des pieux et sans machine frigorifique, est très sensible au niveau de température requis dans la distribution d'énergie frigorifique. Finalement, les bilans annuels de l'énergie extraite et injectée par les pieux déterminent l'évolution de la température moyenne du terrain année après année, ce qui peut affecter les performances thermiques du système à long terme. Une évaluation précise du potentiel de chauffage/refroidissement offert par des pieux demande une bonne connaissance des besoins thermiques du bâtiment, des caractéristiques thermiques du système et de la géologie et hydrogéologie locales. Tous ces facteurs demandent l'usage d'un outil de simulation dynamique de l'ensemble du système qui prenne aussi bien en compte les effets à court terme qu'à long terme.

Des outils de simulation d'installations avec pieux échangeurs ont été développés au Laboratoire de Systèmes Energétiques (LASEN) de l'EPFL. Ils ont été confrontés et validés à des mesures d'installations existantes [1]. Le programme de simulation dynamique de systèmes thermiques TRNSYS [2] a été utilisé, dans lequel un modèle de calcul non standard, développé pour la simulation de stockage diffusif dans le terrain [3], a été adapté à la problématique des pieux échangeurs [4]. L'expérience gagnée dans le développement et la validation de ces outils de calcul a été mise à profit pour la création de PILESIM [5], un outil de simulation pour ce type de système. On peut noter que PILESIM peut également simuler des sondes géothermiques à la place des pieux échangeurs. Ce papier permet de donner un aperçu de l'outil de simulation PILESIM.

LE PROGRAMME PILESIM

PILESIM a été développé avec le programme TRNSYS [2] puis adapté au format de TRNSED. TRNSED est un utilitaire du programme TRNSYS qui permet l'utilisation d'une application TRNSYS, comme PILESIM, sans la nécessité d'avoir des connaissances préalables de TRNSYS. Une interface conviviale permet à l'utilisateur de définir les paramètres relatifs à son problème particulier, tout en pouvant bénéficier d'une aide en ligne pour chaque paramètre. L'exécution d'une simulation est démarrée par une simple commande. La figure 1 permet de visualiser les types de système simulés avec PILESIM.

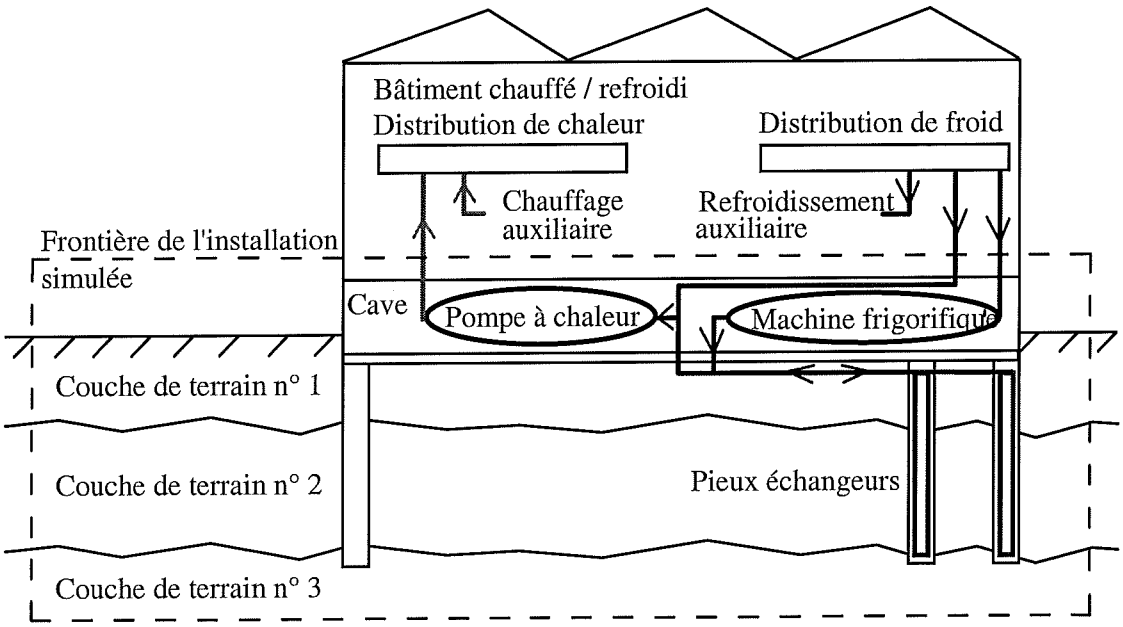

Figure 1: Vue schématique d'une installation avec pieux échangeurs. La partie du système simulée avec PILESIM est délimitée par la ligne en traitillé.

Dans la figure 1, la frontière indique la partie du système simulée par PILESIM. Les conditions d'exploitations, déterminées par les évolutions en valeurs horaires de la demande de chaleur, de refroidissement et de leurs niveaux de température associés, doivent être connues pour une année type. Des conditions d'exploitations normalisées sont précalculées pour différents endroits de Suisse, sur la base d'un modèle simplifié du type degré-jour. L'utilisateur a aussi la possibilité de fournir ses propres conditions d'exploitation dans un fichier ASCII, qui est ensuite lu par PILESIM. La cave est supposée non chauffée. Sa température dépend des transferts de chaleur avec le sol, le bâtiment et l'extérieur. Les coefficients de transfert de chaleur peuvent être choisis de manière à ce que la température de la cave corresponde à la température extérieure.

Quatre différents types de système peuvent être simulés. Le chauffage peut être combiné avec une recharge thermique du terrain en été, ou avec du refroidissement qui peut être effectué de trois manières différentes: refroidissement direct, refroidissement avec machine frigorifique couplée sur les pieux, ou combinaison des deux modes avec priorité au refroidissement direct.

Les tailles de la pompe à chaleur (PAC) et de la machine frigorifique sont fixées par leur puissance électrique nominale. Les niveaux de température dans le condenseur et l'évaporateur influencent le coefficient de performance (COP) de la machine, et par voie de conséquence les puissances thermiques délivrées et absorbées. Toutefois, la puissance électrique de la machine peut être diminuée pour ajuster, si nécessaire, la puissance thermique délivrée par la PAC à la demande de chaleur du bâtiment. La puissance électrique peut également être diminuée pour satisfaire la contrainte en température qui est spécifiée par l'utilisateur sur le fluide circulant dans les pieux (généralement fixée à 0 °C). Des considérations similaires s'appliquent également à la machine frigorifique.

Les calculs sont effectués avec un pas de temps horaire. Pour chaque pas de temps, le mode opératoire qui permet de satisfaire la plus grande partie des besoins thermiques du bâtiment est déterminé, en fonction du type de système choisi, des conditions d'exploitation et des

performances thermiques des composants (pompe à chaleur, machine frigorifique, pieux échangeurs, etc.).

MODÈLES DE CALCUL ET PRINCIPALES HYPOTHÈSES

Le modèle de calcul développé pour contrôler le système suppose une gestion optimale des différents modes opératoires. Les puissances de chauffage et de refroidissement sont ajustées, si nécessaire, aux besoins thermiques du bâtiment, tout en satisfaisant aux contraintes de température imposées au fluide circulant dans les pieux.

Le modèle de pompe à chaleur (ou de machine frigorifique) est basé sur le modèle utilisé dans MINSUN [6]. Le COP est calculé en fonction des pertes de niveau de température dans le condenseur et l'évaporateur, du rendement de Carnot et d'un rendement technique. Les pénalités induites par des fonctionnements à charge partielle ne sont pas prises en considération, bien qu'une pénalité, constante quel que soit la charge de la machine, puisse être spécifiée sur le COP.

Les pieux échangeurs sont simulé par TRNVDSTP [4]. Le modèle permet de calculer la relation entre la température d'entrée du fluide (et de son débit) et la puissance thermique transférée par les pieux échangeurs (ou les sondes géothermiques) pour des conditions d'exploitation arbitraires. Le modèle suppose un volume de stockage cylindrique dont l'axe est vertical. Les pieux (ou les sondes) sont verticaux et uniformément placés dans ce volume. Le transfert de chaleur par convection forcée du fluide caloporteur est couplé au transfert de chaleur transversal dans le terrain, traité par conduction pure. L'équation de la chaleur est résolue par la superposition de deux phénomènes: le problème local et le problème global. Le problème local permet de solutionner les transferts de chaleur radiaux autour des pieux, tandis que le problème global traite des transferts de chaleur tridimensionnels à grande échelle dans le volume du stockage et le terrain environnant. Après un temps suffisamment long, l'énergie transférée par le problème local est transmise au problème global. Les problèmes global et local sont résolus par la méthode des différences finies explicites, chacun avec leur pas de temps propre, ajusté en fonction de leur maillage respectif et des propriétés thermiques du terrain. L'influence d'un mouvement régional de l'eau souterraine dans une couche de terrain horizontale est calculée sous la forme d'approximations, de même que le transfert de chaleur des tubes connectant les pieux en surface.

Les principales hypothèses relatives au modèle TRNVDSTP sont:

- le nombre de pieux échangeurs est relativement grand;
- l'arrangement spatial des pieux échangeurs est plus ou moins régulier;
- la surface de terrain occupée par les pieux échangeurs a une forme qui s'apparente à un cercle ou un carré;
- les pieux échangeurs ont plus ou moins la même longueur active. (La longueur active d'un pieu est la longueur sur laquelle un transfert de chaleur radial a lieu.)

PILESIM n'est donc pas recommandé pour la simulation d'un pieu ou d'une sonde unique. L'espacement moyen entre les pieux ou les sondes est un paramètre d'entrée du programme. Pour des situations extrêmes (arrangement des pieux très irrégulier et/ou dans une surface très allongée), l'espacement moyen peut être calibré avec un programme plus détaillé, par exemple avec TRNSBM [7].

RÉSULTATS OBTENUS AVEC PILESIM

PILESIM est destiné à pré-dimensionner une installation qui utilise des pieux échangeurs ou des sondes géothermiques. Les énergies transférées entre les différents composants du système sont calculés et intégrés sur une base mensuelle ou annuelle. Le diagramme des flux d'énergie montré dans la figure 2 peut être établi avec PILESIM.

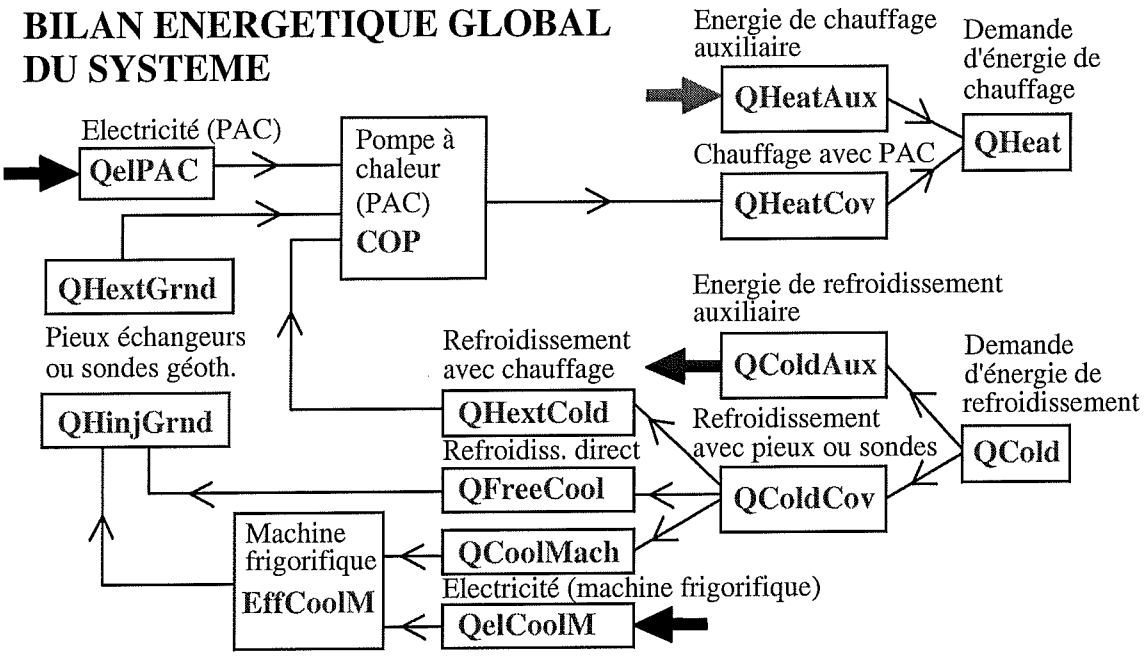

Figure 2: Diagramme des flux d'énergie relatifs au bilan énergétique du système. Il peut être établi avec les grandeurs calculées par PILESIM.

Les niveaux de température moyen à différents endroits du système, le coefficient de performance moyen de la pompe à chaleur, l'efficacité moyenne de la machine frigorifique, etc., sont également calculés. La période simulée peut s'étendre jusqu'à 25 ans, ce qui permet d'évaluer les effets à long terme. L'évolution temporelle de puissances et températures sélectionnées peuvent être visualisées sous forme de graphique grâce à une fonctionnalité de TRNSED.

CONCLUSION

PILESIM est un nouvel outil de calcul pour la simulation thermique d'installations avec des pieux échangeurs ou des sondes géothermiques. PILESIM a été développé avec TRNSYS, sur la base de l'expérience gagnée dans la simulation de telles installations, et bénéficie de l'environnement convivial offert par TRNSED. Les personnes impliquées dans la planification de tels systèmes devraient être capable d'utiliser PILESIM, bien qu'elles n'aient pas forcément de connaissances préalables du programme TRNSYS. Les performances thermiques du système, le potentiel d'utilisation de pieux échangeurs et une grande variété de systèmes peuvent être évalués avec PILESIM. PILESIM est en vente auprès d'ENET (ENET, Administration und Versand, Postfach 130, CH - 3000 Bern 16, numéro de fax: + 41 (0)31 352 77 56). Une version de démonstration peut être obtenue par e-mail: *Daniel.Pahud@epfl.ch.*

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Office fédéral de l'énergie pour son soutien financier.

RÉFÉRENCES

1. Fromentin A., Pahud D., Jaquier C., et Morath M. (1997), Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme, Rapport final, décembre 1997, Office fédéral de l'énergie, Bern, Switzerland.
2. Klein S. A. et al. (1998), TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 14.2, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
3. Pahud D., Hellström G. and Mazzarella L. (1996), Heat Storage in the Ground. Duct Ground Heat Storage Model for TRNSYS (TRNVDST). User Manual for the October 1996 Version. LASEN - DGC- EPFL, Switzerland.
4. Pahud D., Fromentin A. and Hadorn J.-C. (1996), The Duct Ground Heat Storage Model (DST) for TRNSYS Used for the Simulation of Heat Exchanger Piles. User Manual, Internal Report, LASEN - DGC- EPFL, Switzerland.
5. Pahud D. (1999), PILESIM- LASEN: Simulation Tool for Heating / Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers. User Manual. Laboratory of Energy Systems, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Switzerland.
6. MINSUN (1985), Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage. The MINSUN Simulation and Optimization Program. Application and User's Guide. International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme, Task VII.
7. Pahud D., Fromentin A. and Hadorn J.-C. (1996), The Superposition Borehole Model for TRNSYS (TRNSBM), User Manual for the November 1996 Version, Internal Report, LASEN - DGC- EPFL, Switzerland.