

# **Annexe 1: Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure**

## **Table des matières:**

<b>A1. Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure</b> .....	p. A1.1
<b>A1.1 Modèle de stockage</b> .....	p. A1.1
<b>A1.2 Mesures effectuées sur le stockage</b> .....	p. A1.1
A1.2.1 Puissances thermiques transférées.....	p. A1.2
A1.2.2 Température moyenne du stockage diffusif.....	p. A1.3
A1.2.3 Capacité thermique du stockage.....	p. A1.3
<b>A1.3 Etablissement des paramètres de simulation</b> .....	p A1.4
A1.3.1 Paramètres relatifs au stockage.....	p A1.5
A1.3.2 Paramètres relatifs au terrain.....	p A1.6
A1.3.3 Conditions initiales.....	p A1.7
<b>A1.4 Comparaison simulation - mesure</b> .....	p A1.8
<b>A1.5 Conclusion</b> .....	p A1.13
<b>Références</b> .....	p A1.13

## **A1. Simulation du stockage de chaleur dans le terrain de l'installation Serso et calibrage sur deux ans de mesure**

### **A1.1 Modèle de stockage**

Le modèle de calcul utilisé pour simuler le comportement thermique du stockage est basé sur le modèle DST (Hellström, 1989), développé à l'université de Lund en Suède. Le stockage a un échangeur de chaleur souterrain, formé dans notre cas par un ensemble de sondes géothermiques, qui permet de transférer de l'énergie thermique entre la zone de stockage et le fluide caloporteur qui circule dans les sondes. Le modèle calcule, en particulier, la relation entre la température d'entrée du fluide (et son débit) et la puissance thermique transférée pour des conditions d'exploitation arbitraires.

Le modèle DST a été intégré dans le programme de simulation de système thermique TRNSYS comme un module de calcul non standard appelé TRNVDST (Mazzarella, 1993). Le modèle a été amélioré par Pahud et Hellström (1996), puis adapté à la problématique des pieux échangeurs et nommé TRNVDSTP (Pahud et al., 1996). Cette dernière version est utilisée pour la simulation du stockage de Serso, puisqu'elle permet, en plus de toutes les fonctionnalités que possède les autres versions, de tenir compte de l'influence thermique des raccordements hydrauliques entre les forages et de pouvoir estimer l'influence d'un mouvement régional de l'eau souterraine dans une couche horizontale de terrain.

Le programme de simulation de système thermique TRNSYS 15 (Klein S. A. et al., 2000) est donc naturellement choisi pour simuler le stockage comme partie intégrante d'un système thermique. Le modèle de calcul DST a déjà été largement utilisé et validé par le passé (Pahud, 1993 ; Hellström et Nordell, 1988). La méthodologie suivie pour définir les paramètres de calcul est la même que celle qui a été développée pour la simulation de systèmes avec pieux échangeurs (Fromentin et al., 1997). Elle se base essentiellement sur des paramètres physiques qui permettent de tenir compte des processus thermiques les plus influents. Le modèle de stockage TRNVDSTP est utilisé pour Serso avec la même configuration que celle qui a été implémentée dans PILESIM (Pahud, 1999). Pour information, PILESIM est un outil de simulation dynamique d'une installation de chauffage/refroidissement avec pieux échangeurs.

### **A1.2 Mesures effectuées sur le stockage**

Les mesures disponibles pour le calibrage du modèle de stockage ont été enregistrées en valeurs de 15 minutes du 1.1.1998 au 31.12.1999, soit deux années complètes de mesures. La mise en route de l'installation a débuté en 1994, soit près de 4 ans auparavant. Bien que l'installation a été mesurée depuis le début de sa mise en service, il n'a pas été nécessaire de disposer de la totalité des mesures effectuées.

Les mesures relatives au stockage sont les puissances thermiques transférées par son échangeur souterrain (mesures de températures de fluide et de débit) et des températures de terrain effectuées à différents endroits dans la zone du stockage (Hopkirk et al., 1995).

La première étape avant de pouvoir utiliser les mesures est de contrôler si possible leur exactitude, de déterminer quels sont les capteurs de mesure erronés, d'effectuer des corrections éventuelles et de remplir les trous de mesures.

#### *A1.2.1 Puissances thermiques transférées*

Fort heureusement, les puissances thermiques transférées sont mesurées de manière redondantes. Ainsi, l'énergie thermique extraite et injectée dans le stockage est connue par deux groupes de mesures indépendants : par une mesure globale de la puissance thermique transférée et par 4 mesures de puissance dans chacune des 4 branches du stockage (les 4 branches étaient couplées en parallèle durant les deux ans de mesure). L'analyse de ces puissances montre que la puissance globale mesurée est en moyenne plus de 20% inférieure à la somme des puissances des 4 branches du stock, aussi bien en injection qu'en extraction.

D'autre part, de l'autre côté des installations techniques, l'énergie thermique collectée ou diffusée par les chaussées des deux ponts est mesurée séparément pour chacun des ponts. La totalité de cette énergie est également mesurée à l'entrée du local technique. L'analyse de ces trois puissances thermiques montre une très bonne concordance de mesure.

Les installations techniques ont deux stockages à eau de 2'200 litres chacun pour découpler le circuit hydraulique des ponts de celui du stockage diffusif. Compte tenu du débit nominal de l'installation, un tel volume d'eau est déplacé en moins de 10 minutes. La comparaison des puissances thermiques transférées par le stockage et les ponts est donc possible pour des durées de marche du système supérieures au pas de temps de mesure (15 minutes). La comparaison avec la somme des puissances transférées dans les 4 branches du stockage montre que cette dernière est en moyenne 5% inférieure à la puissance transférée par les ponts, aussi bien en injection qu'en extraction. Ceci permet de confirmer un problème de précision dans la mesure de puissance globale échangée par le stockage, qui est environ 25% plus faible que les valeurs mesurées du côté des ponts.

Compte tenu de la bonne concordance des mesures des puissances thermiques absorbées et diffusées par les ponts, la mesure de puissance thermique des deux ponts est choisie comme référence pour la correction des puissances thermiques. Ainsi la puissance thermique transférée dans le stockage diffusif est prise comme la somme des mesures des 4 branches du stock, corrigée par un facteur 1/0.95 (augmentation d'environ 5%).

Finalement, les mesures de températures et de débit permettent de recalculer les puissances thermiques enregistrées avec une très bonne corrélation. Pour toutes les mesures de puissance thermique, la pente de la corrélation est quasiment égale à l'unité si la capacité thermique volumétrique du fluide est fixée à 4.17 MJ/m<sup>3</sup>K, ce qui correspond à celle de l'eau pure. Le fluide utilisé dans l'installation est un mélange d'éthylène glycol (40%) et d'eau (60%), dont la capacité thermique volumétrique est environ 10% inférieure à celle de l'eau. En conséquence, toutes les mesures de puissances thermiques doivent être réduites de 10% pour cette raison. En particulier, la **puissance thermique échangée par l'échangeur souterrain** est prise comme la **somme des mesures des 4 branches du stock, corrigée par un facteur de 0.9/0.95** (diminution des valeurs mesurées d'environ 5%).

### *A1.2.2 Température moyenne du stockage diffusif*

La température du terrain dans la zone du stockage a été mesurée dans 9 forages (voir Hopkirk et al., 1995), placés à différents endroits représentatifs et à égale distance des sondes les plus proches, de manière à ne pas être influencée par les variations de température à court terme au voisinage des sondes. La visualisation de l'évolution de chacune des mesures de température a permis de déterminer les mesures défectueuses pendant les deux années analysées. Sur les 45 mesures de température enregistrées, 34 ont pu être utilisées.

La température moyenne du stockage est par définition la température moyenne du terrain dans le volume de stockage. Ce dernier est simplement défini en sachant que les sondes de l'échangeur souterrain sont verticales, de même longueur et régulièrement espacées. Ainsi chaque sonde occupe la même surface de terrain. En multipliant cette surface par la longueur d'un forage et par leur nombre, le volume obtenu équivaut au volume « touché » par l'échangeur souterrain. Ce volume est défini comme le volume du stockage.

Le calcul de la température moyenne du stockage a été fait en découpant son volume en couches horizontales superposées et en cylindres creux emboîtés. A chaque portion de volume ainsi découpé correspond une température constante qui est déterminée par une ou plusieurs mesures. La température moyenne du stockage est ensuite calculée en pondérant les températures de chaque portion de volume par leur taille.

La température moyenne du stockage est le résultat des conditions passées de charge et décharge du stockage et des transferts de chaleur avec l'environnement. Elle a en mémoire le passé de l'installation. En d'autres termes, elle permet de remplir les trous de mesure au cours des deux années étudiées. Ces derniers ne sont pas nombreux. Le plus grand trou dure environ 5 jours et leur totalité ne dépasse pas 20 jours, soit moins de 3% de la période de mesure. Les trous sont remplis avec des jours voisins de la date du trou qui conduisent à la même variation de la température moyenne du stockage.

### *A1.2.3 Capacité thermique du stockage*

Les mesures de la puissance transférée par l'échangeur souterrain et de la température moyenne du stockage permettent d'établir la relation entre l'énergie stockée ou déstockée et sa variation de température. La figure A1.1 permet de la montrer avec les mesures corrigées des deux années.

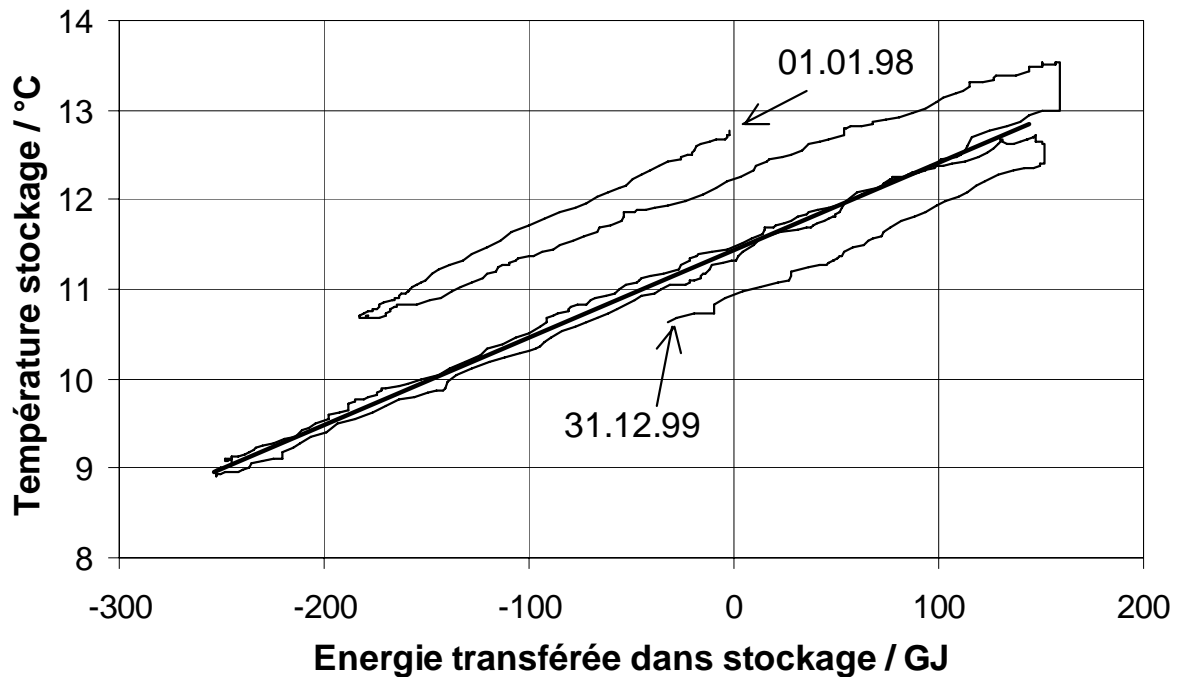


Fig. A1.1 Température moyenne du stockage représentée en fonction de l'énergie nette transférée par l'échangeur souterrain (énergie injectée – énergie extraite).

Si le stockage n'a pas de pertes thermiques, un cycle de charge – décharge fera déplacer les points de la courbe sur une droite dont la pente (en K/GJ) est l'inverse de sa capacité thermique (en GJ/K). Les pertes thermiques du stockage ont pour effet de déplacer les points sur la droite. A l'inverse ils seront déplacés à gauche, si les pertes thermiques sont en réalité des gains thermiques. Lors de l'hiver 98 – 99, l'extraction importante de chaleur a eu pour résultat de sensiblement abaisser la température du stockage, si bien que les pertes du stockages ont été réduites à zéro, voir inversées. Au cours de la décharge du stockage pendant l'hiver 98-99 et de sa recharge le printemps – été suivant, les pertes thermiques du stockage ont été faibles relativement aux énergies transférées. Cette période a l'avantage de permettre une estimation directe de la capacité thermique du stockage. La régression linéaire montrée dans la figure A1.1 permet de l'estimer à environ **100 GJ/K**. La capacité thermique volumétrique moyenne du terrain est ensuite déterminée sur la base du volume du stockage, évalué selon la définition donnée dans la section précédente (section A1.2.2).

Capacité thermique du stockage :	102 GJ/K
Volume du stockage :	46'100 m <sup>3</sup>
Capacité thermique volumétrique du terrain :	2.2 MJ/m <sup>3</sup> K

### A1.3 Etablissement des paramètres de simulation

Les paramètres de simulation doivent permettre de caractériser les propriétés thermiques et hydrauliques du terrain ainsi que ceux qui définissent le stockage (sondes géothermiques, raccords hydrauliques horizontaux au sommet des sondes et isolation sur le toit du stockage). D'autre part, les conditions initiales doivent être représentatives des conditions

dans lesquelles se trouvait le stockage au début de la période de mesure (soit 4 ans après la mise en service de l'installation).

### A1.3.1 Paramètres relatifs au stockage

Les paramètres donnés dans les tables A1.1 à A1.3 sont les paramètres nécessaires à la simulation du stockage. La liste des paramètres, établie pour la simulation d'un système avec pieux échangeurs (Fromentin et al., 1997), permet de prendre en compte les transferts de chaleur principaux pour ce type d'application.

<b>Echangeur souterrain</b>	
Nombre de sondes géothermiques (N)	91
Longueur active des sondes (H)	65 m
Espacement des sondes (B)	3 m (arrangement hexagonal)
Surface de terrain occupée par sonde ( $B^2 \times \sqrt{3}/2$ )	7.8 m <sup>2</sup> /sonde
Volume de stockage ( $B^2 \times \sqrt{3}/2 \times N \times H$ )	46'100 m <sup>3</sup>
Diamètre des sondes (forage)	11.5 cm
Type de sonde	Double-U
Diamètre intérieur des tubes formant les U	26 mm
Matériau de remplissage	Bentonite et ciment
Résistance thermique d'une sonde $R_b^{(1)}$	0.12 K/(W/m)
Résistance thermique interne d'une sonde $R_a^{(1)}$	0.44 K/(W/m)

(1) calculé avec le programme EED (Hellström and Sanner, 2000) et les paramètres supplémentaires suivants :

diamètre externe / interne du tube en plastique	32 / 26 mm
conductibilité thermique du tube en plastique	0.42 W/mK
conductibilité thermique du matériau de remplissage	0.8 W/mK
espacement axe – axe de deux tubes opposés	75 mm
débit de fluide par sonde	440 litres/h
type de fluide	éthylène glycol
point de congélation du fluide	-21 °C

Table A1.1 Paramètres de simulation relatifs à l'échangeur souterrain.

<b>Couplage hydraulique, fluide</b>	
Couplage hydraulique des sondes	En parallèle
Longueur estimée des raccords horizontaux (sans les retours, donc moitié de la longueur totale)	315 m
Diamètre externe des raccords horizontaux	90 mm
Densité du fluide caloporteur	1070 kg/m <sup>3</sup>
Capacité thermique du fluide	3.5 kJ/kgK

Table A1.2 Paramètres de simulation relatifs au couplage hydraulique et au fluide caloporteur.

Les raccordements hydrauliques horizontaux entre les sondes sont noyés dans une couche de sable de 20 cm d'épaisseur. Cette couche est sous l'isolation et fait donc encore partie du stockage. La couche d'isolation est constituée par des morceaux de mousse de verre et fait une épaisseur de 25 cm. Elle est recouverte par une couche de 30 cm d'épaisseur avec des matériaux de très faible perméabilité pour limiter les infiltrations d'eau à travers la couche d'isolation. Puis une couche de drainage de 30 cm d'épaisseur et finalement une couche de terre recouvre le tout. La surface occupée par le stockage peut à nouveau être cultivée. Dans les calculs, l'effet de l'isolation sur le toit du stockage est pris en compte avec un facteur de perte thermique (valeur U) formé par deux couches : la couche d'isolation et une couche de terrain correspondant aux différents matériaux recouvrant l'isolation (cf. table A1.3).

<b>Isolation sur le toit du stockage</b>	
Epaisseur de la couche d'isolation	0.25 m
Conductibilité thermique de la couche d'isolation	0.38 W/mK
Valeur U de la couche d'isolation	1.5 W/m <sup>2</sup> K
Epaisseur couche terrain sur l'isolation	0.60 m
Conductibilité thermique correspondante	1.5 W/mK
Valeur U de la couche de terrain	2.5 W/m <sup>2</sup> K
Valeur U totale prise en compte	0.9 W/m <sup>2</sup> K
Extension horizontale de la couche d'isolation au-delà du bord du stockage	Environ 2 m

Table A1.3 Paramètres de simulation relatifs au toit du stockage.

#### *A1.3.2 Paramètres relatifs au terrain*

A l'endroit du stockage, une couche de rocher non consolidé de 4 à 8 m d'épaisseur recouvre une couche d'au moins 100 m de molasse. Des travaux ont été entrepris pour diminuer la perméabilité du terrain du côté « montagne » du stockage, de manière à limiter les infiltrations d'eau possibles. La conductibilité thermique de la molasse a été mesurée sur des échantillons. Une valeur moyenne de 4.5 W/mK a été obtenue. La capacité thermique volumétrique du terrain a été estimée à 2.2 MJ/m<sup>3</sup>K dans la section A1.2.3 sur la base des 2 ans de mesure.

Le modèle de calcul du stockage, TRNVDSTP, est configuré comme dans PILESIM (Pahud, 1999) avec 4 couches de terrain. La première couche permet de tenir compte de la couche de sable dans laquelle se trouve les raccordements horizontaux entre les sondes. Les trois couches suivantes permettent par exemple de définir une couche intermédiaire dans laquelle circule de l'eau souterraine. Dans notre cas, l'eau souterraine ne circule pas de façon significative et deux couches suffisent pour tenir compte des propriétés thermiques du rocher non consolidé et de la molasse. Comme il n'est pas désiré de changer la configuration du modèle, les mêmes propriétés sont assignées à deux couches dans le modèle (cf. table A1.4).

La température initiale du terrain est fixée constante à 10 °C (légèrement supérieure à la température moyenne annuelle de l'air, notamment pour tenir compte du gradient géothermique naturel).

<b>Terrain</b>	
Température initiale du terrain	10 °C
1. couche contenant les raccordements hydrauliques	
épaisseur	0.8 m (dont 0.5 m sur toit du stockage)
conductibilité thermique	2.0 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m <sup>3</sup> K
2. couche de rocher non consolidé	
épaisseur	6 m
conductibilité thermique	2.8 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m <sup>3</sup> K
vitesse de Darcy (écoulement eau souterraine)	0 m/s
3. couche de molasse (partie 1)	
épaisseur	2 m
conductibilité thermique	4.5 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m <sup>3</sup> K
vitesse de Darcy (écoulement eau souterraine)	0 m/s
4. couche de molasse (partie 2)	
épaisseur	1000 m
conductibilité thermique	4.5 W/mK
capacité thermique volumétrique	2.2 MJ/m <sup>3</sup> K
vitesse de Darcy (écoulement eau souterraine)	0 m/s

Table A1.4 Paramètres de simulation relatifs au terrain.

### A1.3.3 Conditions initiales

Les conditions initiales sont également importantes dans la mesure où le stockage doit se trouver dans un état semblable à celui dans lequel il se trouvait au début de la période de mesure. En particulier la température moyenne du stockage doit correspondre à celle qui est obtenue des mesures. Avant de débiter la simulation, le modèle de calcul permet de simuler une variation sinusoïdale de la température du stockage avec une période annuelle et pendant un nombre arbitraire de périodes (cycles de préchauffage). Les conditions initiales de ce calcul sont la température initiale du terrain. Les conditions aux bords sont fixées par la température de l'air, dont l'évolution suit également une variation sinusoïdale. Ce calcul permet d'amener l'état du stockage dans des conditions initiales pour la simulation qui sont proches de celles qui sont désirées (dans notre cas, c'est l'état du stockage au début de la période de mesure). L'amplitude de variation de la température du stockage est d'environ 3 K. Le niveau de température moyen du stockage est ajusté pour obtenir une température moyenne de stockage comparable à celle du début des 2 ans de mesures. L'ajustement livre une température moyenne de 13 °C. Les paramètres relatifs aux cycles de préchauffage sont énumérés dans la table A1.5.

<b>Cycles de préchauffage du stockage</b>	
Nombre de cycles (1 cycle dure 1 année)	4
Température du stockage	
température moyenne	13 °C
amplitude de variation	1.5 K (Min : 11.5 °C, max : 14.5 °C)
déphasage	180 jours
Température de l'air	
température moyenne	9 °C
amplitude de variation	10 K (Min : -1 °C, max : 19 °C)
déphasage	120 jours

Table A1.5 Paramètres de simulation relatifs au préchauffage du stockage.

#### A1.4 Comparaison simulation - mesure

Le débit total et la température du fluide caloporteur sont donnés comme variables d'entrée au modèle de simulation, de même que la température de l'air extérieur. Parmi les variables calculées par le modèle, la température moyenne du stockage et la puissance thermique transférée par l'échangeur souterrain peuvent être directement comparées aux valeurs issues des mesures (cf. figures A1.2 et A1.3).

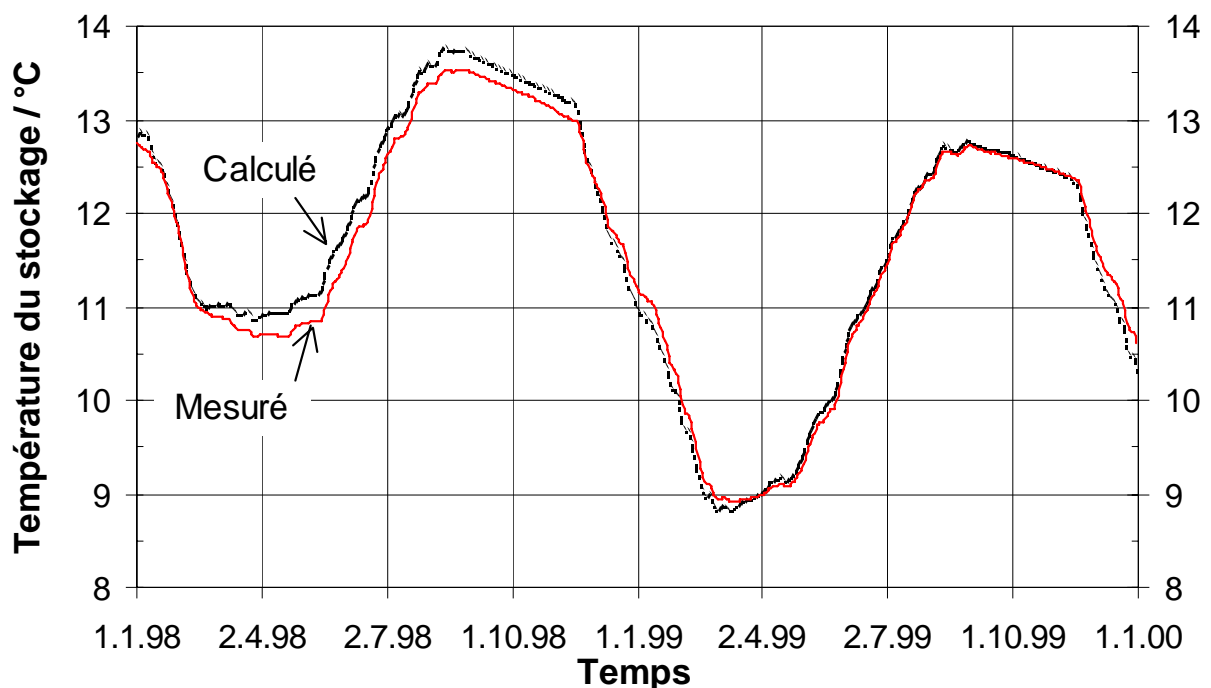


Fig. A1.2 Mesure et calcul de la température moyenne du stockage au cours des deux ans de mesure.

L'écart de température entre les mesures et les calculs reste inférieur à 0.5 K.

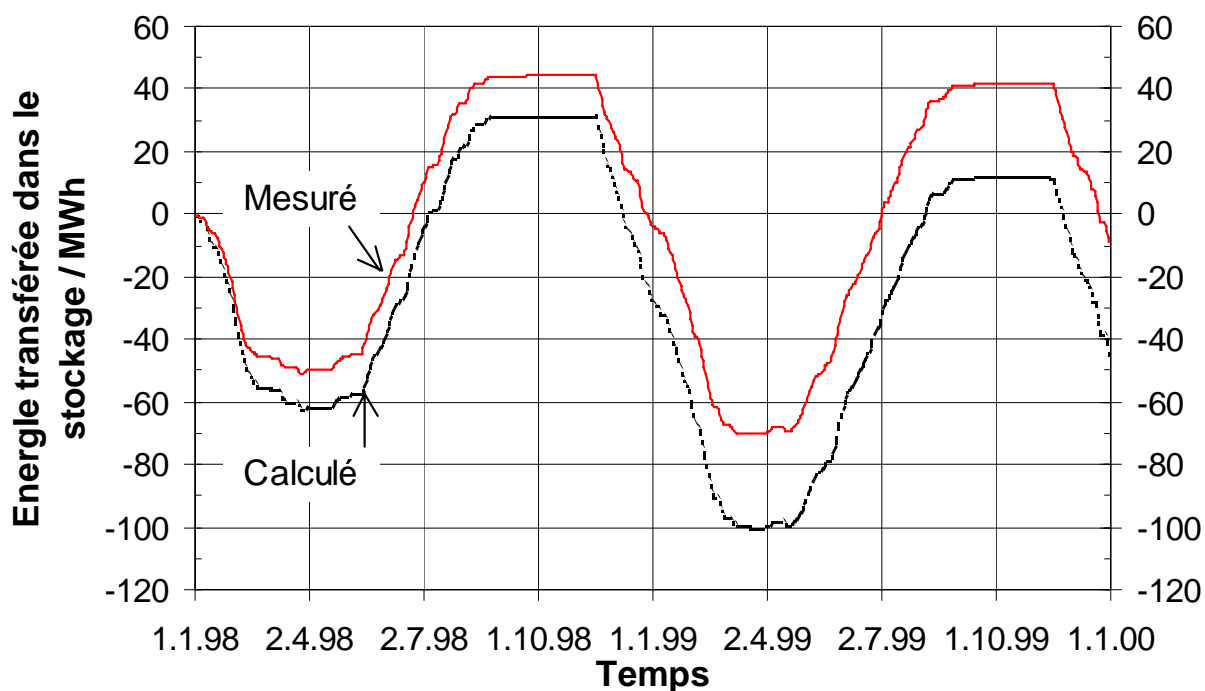


Fig. A1.3 Mesure et calcul de l'énergie nette transférée dans le stockage au cours des deux ans de mesure.

Le concept hydraulique du stockage permet de n'utiliser qu'une partie des sondes. Ainsi, pour un débit et une température d'entrée dans les sondes donnés, la puissance thermique transférée est plus faible lorsque le nombre de sondes utilisées est plus petit. En extraction de chaleur, l'utilisation partielle des sondes est plus fréquente qu'en injection. Comme le modèle de calcul ne permet pas de réduire le nombre de sondes utilisées, les calculs surestiment davantage les mesures en période d'extraction, ce qui se traduit par un décalage vers le bas de la courbe calculée relativement à la courbe mesurée.

Une comparaison directe entre les mesures et les calculs de l'énergie journalière transférée par l'échangeur souterrain permet de mettre en évidence cet effet (cf. figure A1.4). Les calculs correspondent bien aux mesures pour les jours où toutes les sondes sont utilisées. Les points qui se détachent sous la fonction identité en période d'extraction (énergie journalière négative), sont ceux pour lesquels le nombre de sondes géothermiques utilisées a été réduit. Inversement ces points se détachent au dessus de la fonction identité en période d'injection (énergie journalière positive).

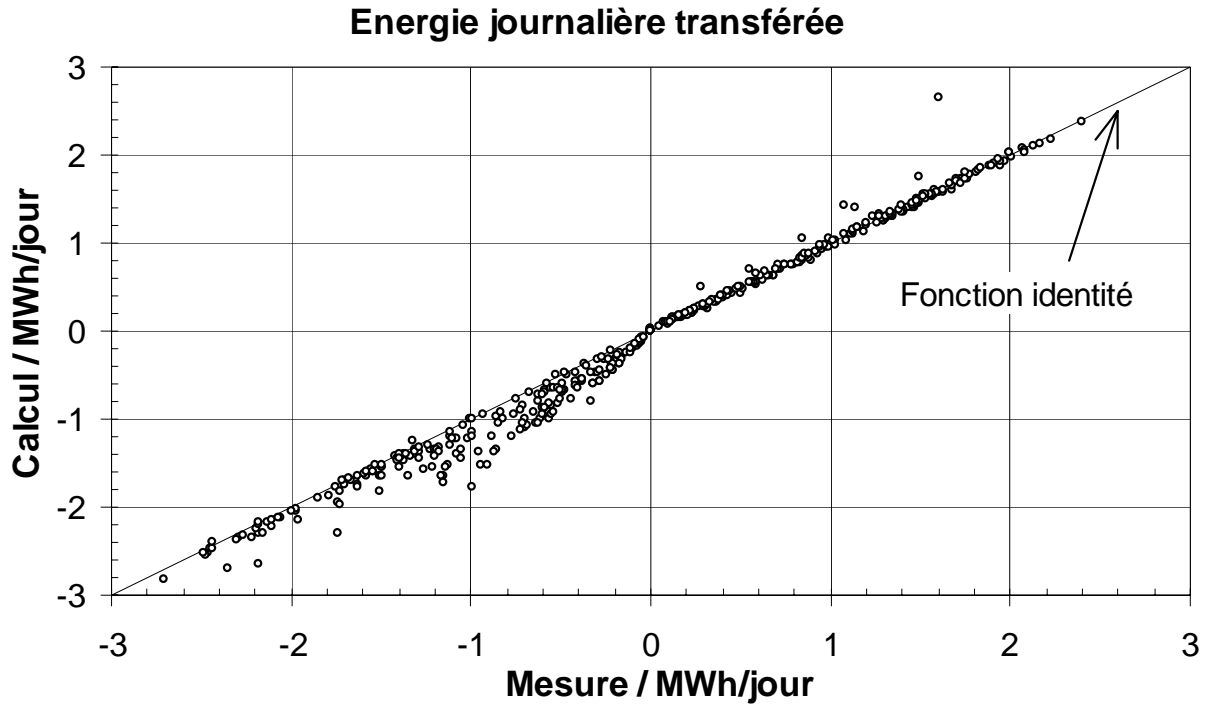


Fig. A1.4 Comparaison calcul – mesure des énergies journalières transférées par l'échangeur souterrain pour les deux années de mesures.

Le nombre de sondes utilisées est fonction du nombre de branches en fonction. Chacune des 4 branches du stockage a sa propre pompe, dont l'état de marche est mesuré. En conséquence la fraction de sondes utilisées est connue au cours du temps. La figure A1.5 permet de visualiser des périodes de 2 jours où parfois seule une fraction des sondes est utilisée. Les graphes des figures A1.5 et A1.6 permettent de confirmer la surestimation de la puissance transférée lorsque seule une fraction des sondes est utilisée.

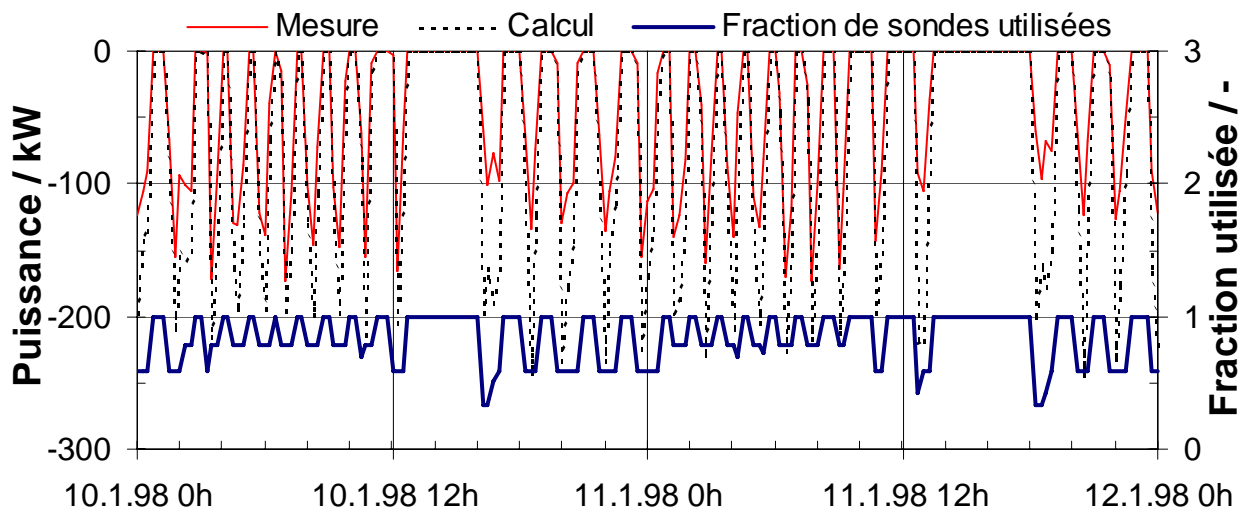


Fig. A1.5 Puissance thermique calculée et mesurée en extraction de chaleur au cours d'une période avec une utilisation partielle des sondes du stockage.

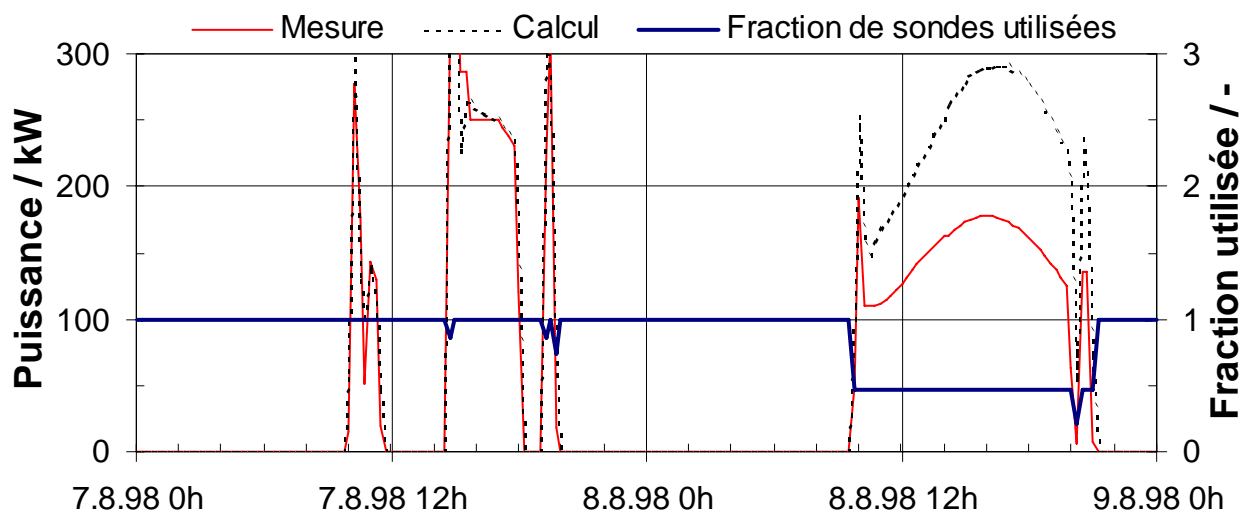


Fig. A1.6 Puissance thermique calculée et mesurée en injection de chaleur. On observe une utilisation partielle des sondes le 8 août 1998.

Lorsque la totalité des sondes sont utilisées, la correspondance calcul – mesure est tout à fait satisfaisante, et montre que les effets dynamiques à court terme sont bien reproduits par le modèle. Les graphes des figures A1.7 et A1.8 permettent de le confirmer pour différents jours au cours des deux ans de mesure.

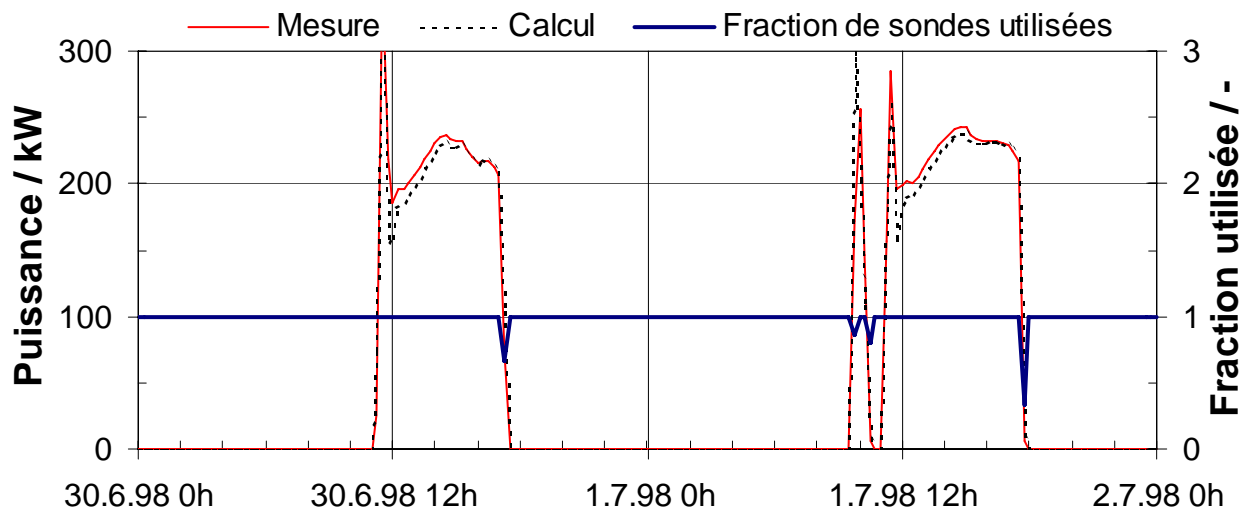


Fig. A1.7 Puissance thermique calculée et mesurée en injection de chaleur durant l'été 1998.

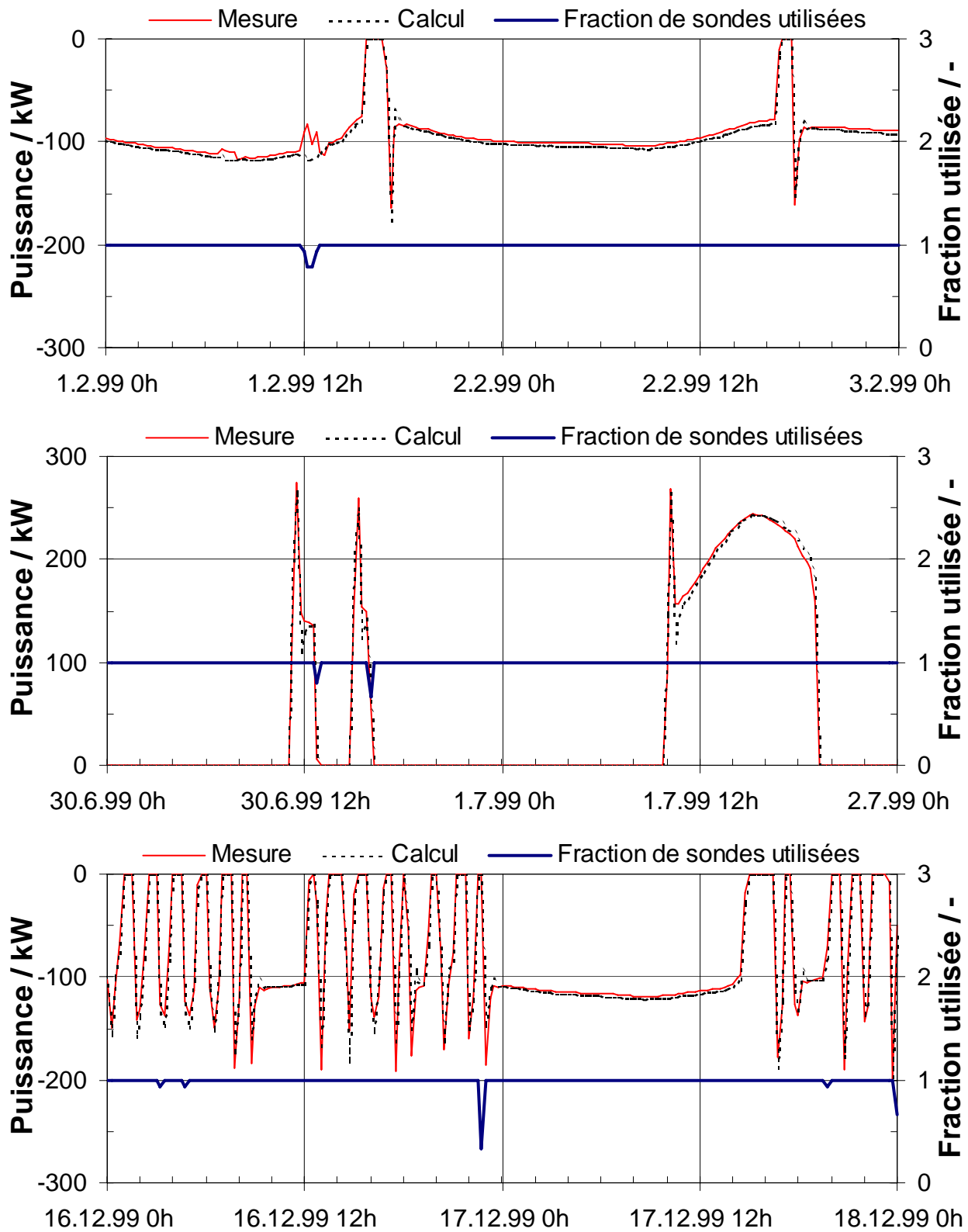


Fig. A1.8 Puissance thermique calculée et mesurée en 1999.

## A1.5 Conclusion

Comme attendu le modèle utilisé permet de simuler de façon satisfaisante le stockage diffusif de Serso. Le modèle de simulation utilisé combine ensemble plusieurs composants TRNSYS, dont le composant non standard TRNVDSTP. L'outil de simulation TRNSYS résultant a été mis au point dans une étude visant à simuler un système avec pieux échangeurs sur la base de mesures d'installations existantes. Il s'avère tout à fait satisfaisant pour la simulation d'un stockage du type de Serso. Il permet de reproduire aussi bien les effets à long terme qu'à court terme. Tous les paramètres utilisés reposent sur des grandeurs géométriques ou des propriétés physiques.

Contrairement au concept du stockage de Serso, le modèle de calcul ne permet pas de n'utiliser qu'une seule partie des sondes du stockage. Néanmoins cette propriété n'apparaît pas indispensable à la simulation de ce type de système, car il en résulte une puissance de transfert réduite qui peut également être obtenue avec par exemple un débit plus faible. D'autre part, l'utilisation d'une partie des sondes plutôt que la totalité permet, en période d'extraction, d'extraire la chaleur dans la zone périphérique du stockage et de conserver la zone centrale du stockage plus chaude. La comparaison mesure – calcul ne permet pas de mettre en évidence un avantage à procéder de la sorte, et la complexité supplémentaire engendrée au niveau du concept, du schéma de principe et de la régulation du stockage ne sont pas, dans ce cas, justifiés.

## Références

- 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.
- Hellström G. (1989) Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code. Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- Hellström G. and Nordell B. (1988) A Posteriori Study and Redesign of Large-Scale Borehole Heat Store in Luleå, Sweden. Proceedings of JIGASTOCK'88, Versailles, France.
- Hellström G., Sanner B. (2000): Earth Energy Designer, User's Manual, version 2.0 (<http://www.blocon.se/earth.htm>).
- Hopkirk R., Hess K. und Eugster W. (1995) Erdwärmesonden-Speicher zur Strassenheizung bei Därlingen, Schweiz, Polydynamics Ltd., Zürich, Schweiz.
- Klein S. A. et al. (2000) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 15. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.
- Mazzarella L. (1993) Duct Thermal Storage Model. Lund-DST. TRNSYS 13.1 Version 1993. ITW, Universität Stuttgart, Germany, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, Italy.
- Pahud D. (1993) Etude du Centre Industriel et Artisanal Marcinhès à Meyrin (GE). Rapport final. GAP et CUEPE, Univ. de Genève.

- Pahud D. (1999) PILESIM - LASEN. Simulation Tool for Heating/Cooling Systems with Heat Exchanger Piles or Borehole Heat Exchangers. User Manual. Swiss Federal Office of Energy, Switzerland.
- Pahud D. and Hellström G. (1996) The New Duct Ground Heat Model for TRNSYS. EURO THERM, Physical Models for Thermal Energy Stores. A.A. van Steenhoven and W.G.L van Helden (eds), March 25-27, pp. 127 – 136, Eindhoven, The Netherlands.
- 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, December 1996 Version. Internal Report. LASEN - DGC- EPFL, Switzerland.