

Heat Exchanger Pile Systems

Examples, design and thermal calculations

Table of content

1.	Heat exchanger piles.....	3
1.1	Types of heat exchanger piles	3
1.2	Connection and integration in a system	6
1.3	Effet sur la statique des pieux	10
1.4	Autorisations	10
1.5	Examples of some heat exchanger pile systems	10
1.5.1	Anlage "FINKERNWEG", Kreuzlingen TG	12
1.5.2	Anlage "LIDWIL GEWERBE AG", Altendorf SZ.....	14
1.5.3	Anlage "PAGO AG", Grabs SG	16
1.5.4	Anlage "PHOTOCOLOR", Kreuzlingen TG	18
2.	Caractérisation thermique d'un ensemble de pieux échangeurs.....	20
2.1	Principaux paramètres géologiques et hydrogéologiques du terrain.....	20
2.2	Caractérisation thermique d'un pieu échangeur.....	21
2.2.1	Pieu creux préfabriqué	22
2.2.2	Pieu massif	23
2.2.3	Valeurs de résistances thermiques typiques de pieux échangeurs.....	26
2.3	Capacité de transfert thermique	27
2.4	Capacité de stockage.....	30
2.5	Effets à long terme	31
3.	Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs.....	32
4.	L'outil de simulation PILESIM.....	36
5.	Dock Midfield of the Zurich airport.....	38
5.1	The Dock Midfield	38
5.2	The pile system layout.....	38
5.3	Main parameters for system simulation.....	42
5.3.1	Ground properties	42
5.3.2	Piles properties	43
5.3.3	System parameters	44
5.4	Thermal performances of the system.....	44
6.	Références.....	46

1. HEAT EXCHANGER PILES

A heat exchanger pile is a pile foundation equipped with a channel system, where a heat carrier fluid is circulated in order to exchange heat with the surrounding ground. Its two main functions are therefore to transfer in depth the construction load and to exchange heat with the surrounding ground. A set of foundation piles is used when surface soil does not have sufficient resistance to support loads of a superstructure through the intermediary of superficial foundations. Having an unit length that normally varies between a few meters to several tens of meters, a part or the totality of the piles can be transformed into “heat exchanger piles”. A set of heat exchanger piles, usually coupled to a heat pump and/or a cooling machine, can be used for heating and/or cooling purposes.

In 1998, the SSG (Société Suisse pour la Géothermie) made an inquiry and counted in Switzerland about 25 installations with heat exchanger piles. The annual heat extracted from the ground totalises about 5 GWh, which is less than 1% of the geothermal energy production. This technology is also used in Germany and Austria. In Austria, hundreds of installations with heat exchanger piles have already been built.

1.1 Types of heat exchanger piles

With the exception of wood piles, all kind of piles can be in practice equipped with a heat exchanger. A hammered precast pile and a cast-in-place pile are shown in figure 1.1.

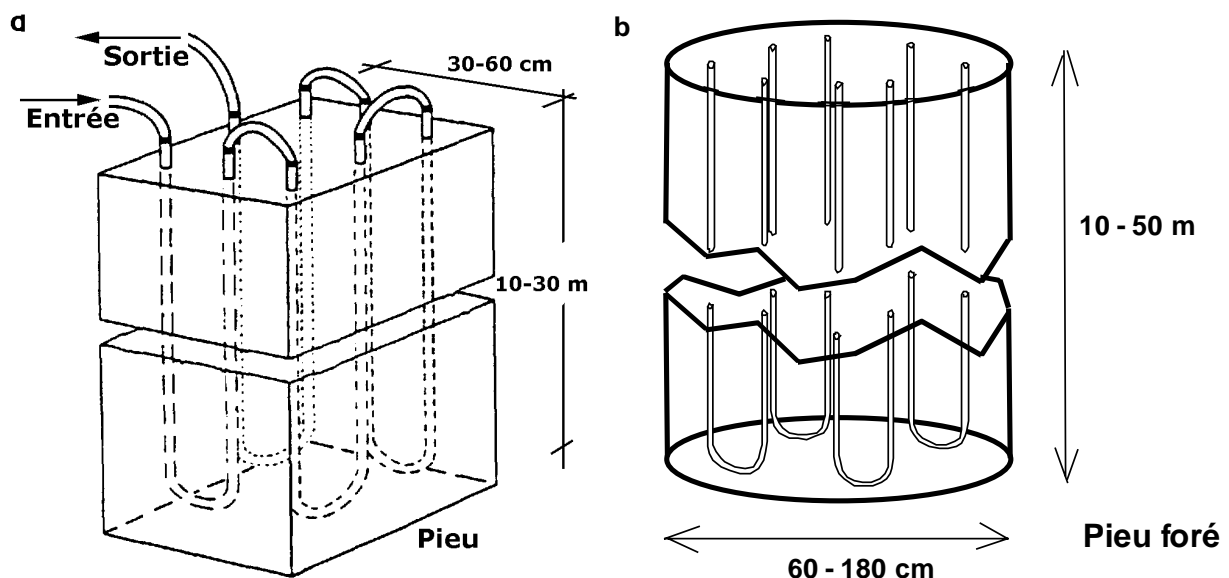


Fig. 1.1 Heat exchanger pile examples ; a) hammered precast pile, b) cast-in-place pile.

In figure 1.2 a hollow precast pile is shown with a heat exchanger ready to be put in place (2 U-pipes in polyethylene). The inside volume of the pile is then filled with saturated gravel. In order to optimise the heat transfer with the ground, the pipes should, if possible, be in contact with the inner wall of the concrete pile and regularly spaced along the circumference.

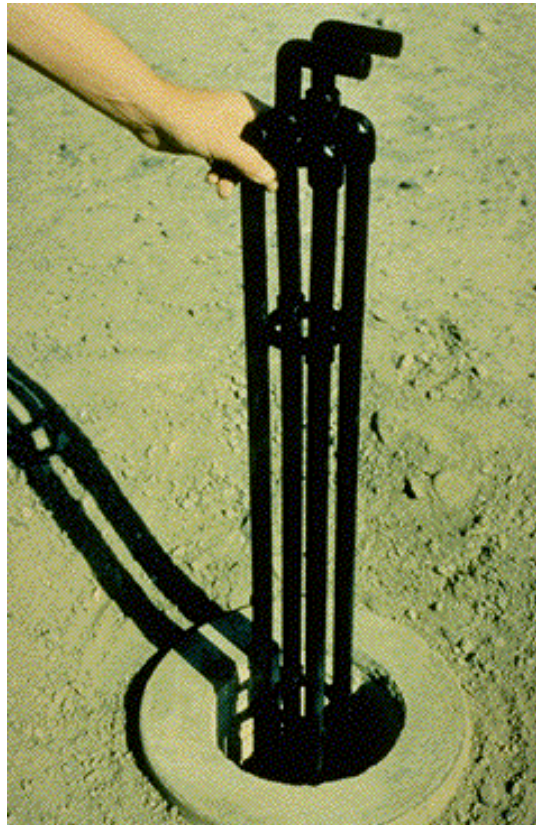


Fig. 1.2 Hollow precast pile with a 2 U-pipes heat exchanger in polyethylene (source: Sacac Schleuderbetonwerk AG, Lenzburg).

In cast-in-place piles, the plastic pipes of the heat exchanger are fixed on the inner side of the pile metallic reinforcement. In figure 1.3, a 4 U-pipe heat exchanger is shown. The left picture shows the top part of the pile. In this case, the four U-pipes are connected in parallel with a plastic manifold. An other manifold is used for the returning pipes. The right picture shows the bottom part of the pile, where the pipes are bent to form a U. In practice, small pipe diameters are used (typically pipes with a diameter of 20 mm are used). Along the pile, it is important to space the pipes with a regular distance along the circumference of the metallic reinforcement in order to optimise the heat exchange with the ground.

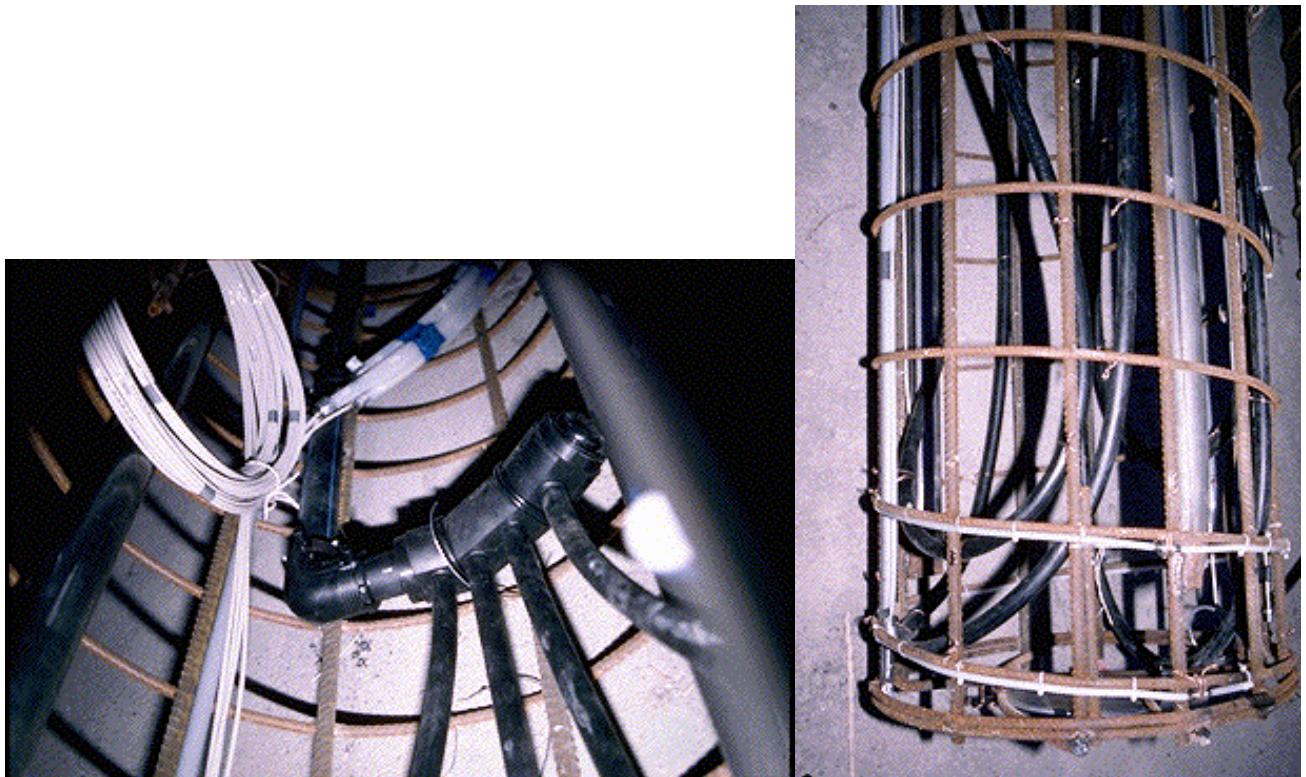


Fig. 1.3 Cast-in-place pile. The 4 U-pipes heat exchanger in polyethylene is fixed on the inner side of the metallic reinforcement (source: EPFL, Lausanne).

It is also possible to equip walls imbedded in the ground or concrete plates with a heat exchanger to transfer thermal energy with the ground. This solution is less common than heat exchanger piles. Walls imbedded in the ground can be achieved by a series of piles, prefabricated or cast-in-place walls. In figure 1.4 the heat exchanger pipes are fixed in the metallic reinforcement of a cast-in-place imbedded wall.



Fig. 1.4 Metallic reinforcement of a cast-in-place wall imbedded in the ground. The pipes for the heat transfer with the ground are fixed in the reinforcement (source: photo Nägelebau, A-Röthis).

1.2 Connection and integration in a system

The heat exchanger piles (or wall imbedded in the ground, etc.) are normally coupled to a heat pump for heat production. Horizontal pipes connect the piles (or walls) to a manifold at the ground surface. These pipes are normally placed below the concrete plate of the building. They may cross it at the place of the manifold. If the concrete plate is below the water table, care has to be taken to make the crossing of the pipes watertight. Illustrations are given in figure 1.5 and 1.6. The piles may also be coupled in series. It will depend on the total flow rate through the piles, which is normally fixed by the technical characteristic of the heat pump, the number of piles, pipes per piles, pipe length and diameter, etc. The pumping energy for the circulation of the heat carrier fluid has to be as small as possible. In any case, the electric power of the circulation pump should never exceed 10% of the nominal electric power of the heat pump.

Skizze horizontale Verteilleitungen

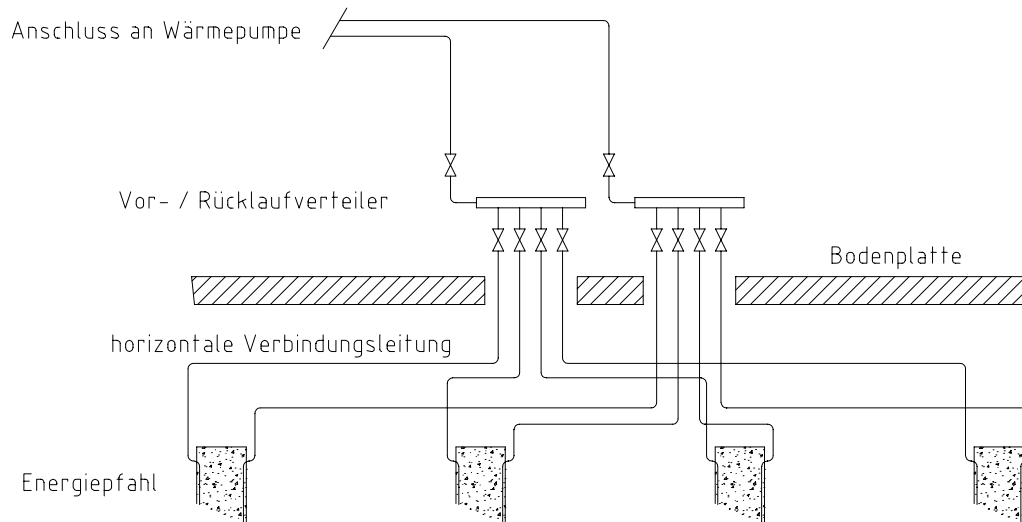


Fig. 1.5 Illustration of horizontal connections between the piles and a heat pump.

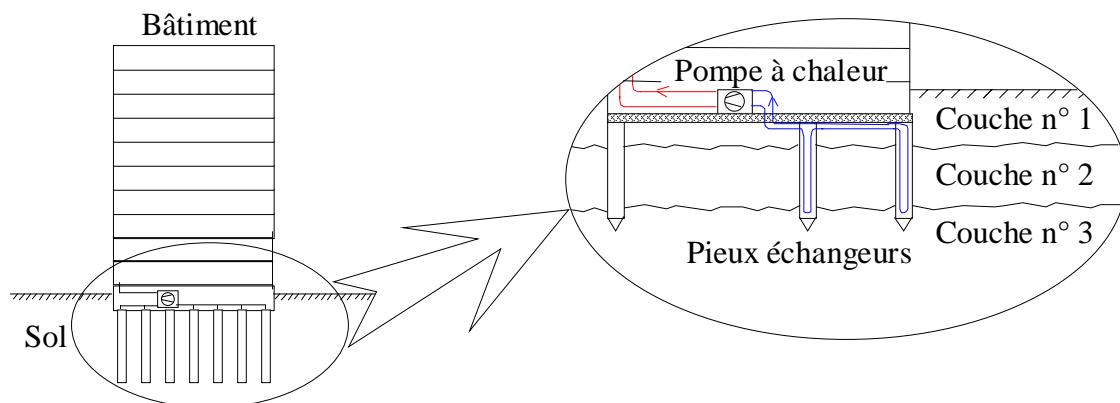


Fig. 1.6 Illustration of a heat exchanger pile system for heating purposes.

As illustrated in figure 1.6, the heat exchanger piles are normally coupled to a heat pump. During the winter, the heat pump extracts thermal energy from the ground and provides heat to the building. It may cover the totality or part of the heat demand. In this latter case, the system is called “bivalent”. It has the advantage to use the piles for the “base load”. Heat is extracted with a relatively low heat power, resulting in a lower temperature loss (i. e. a smaller temperature difference between the heat carrier fluid that circulates through the piles

and the ground). However the pile system operates during a longer period of time, thus maximising the energy output and the use of the piles.

Cooling of the ground will take place, and the long term influence of the pile system may lead to an unacceptable situation. A thermal recharge of the ground is necessary. In some cases, it may be realised naturally if a ground water flow is present all the time and sufficiently important through the ground volume crossed by the piles. As long as heat conduction remains the dominating mode of heat transfer in the ground, the natural recharge of the ground volume is most of the time too weak for the long-term operation of the system. This is why heat exchanger piles are most suitable for systems that combine heating and cooling. The thermal recharge of the ground can be ensured by the cooling requirements. In this case, the ground volume crossed by the piles acts like a seasonal heat storage.

Cooling with heat exchanger piles is realised in two different ways: direct cooling or with a cooling machine. Direct cooling is realised by connecting the pile flow circuit to the cold distribution with a conventional heat exchanger. No cooling machine is used in between. It requires that cooling needs can be satisfied with a “high” temperature, typically of 16 – 20°C. If humidity of the air has to be removed by the cooling requirements, a separate cooling device will have to be used as a lower temperature level is necessary for this process. Here again, a “bivalent” cooling system might be the best compromise. In figure 1.7 and 1.8, the two basic concepts of heat exchanger pile systems are shown.

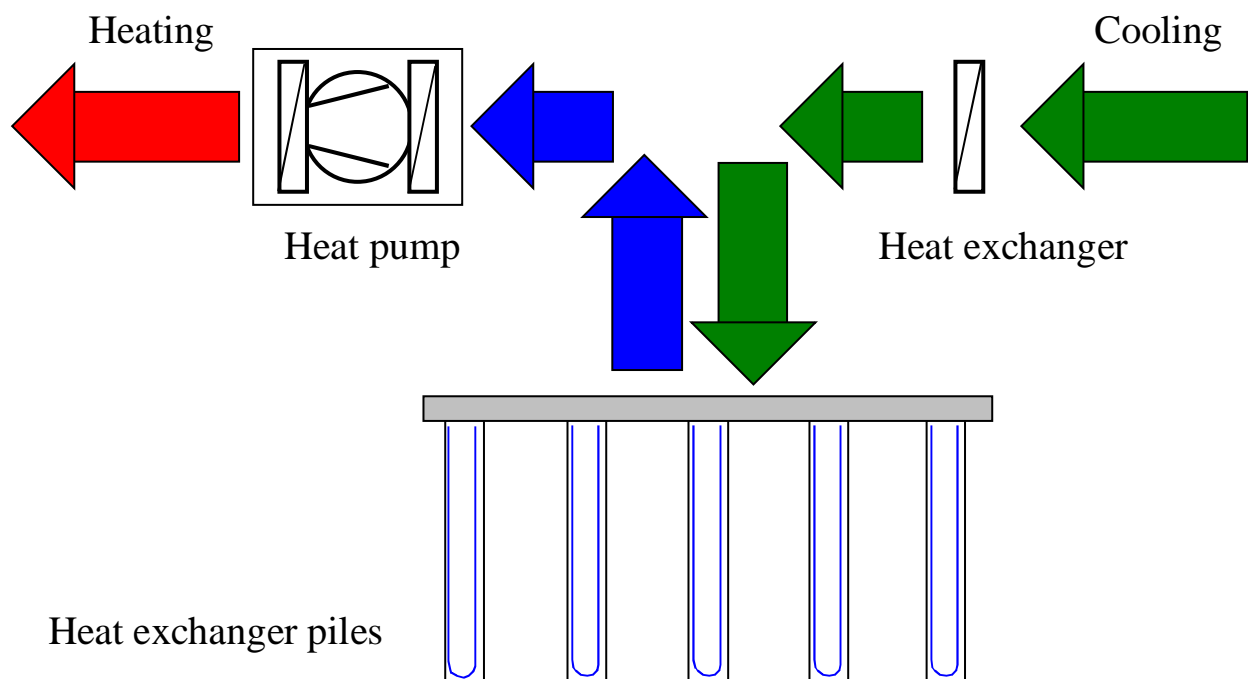


Fig. 1.7 Schematic view of a heat exchanger pile system concept with direct cooling.

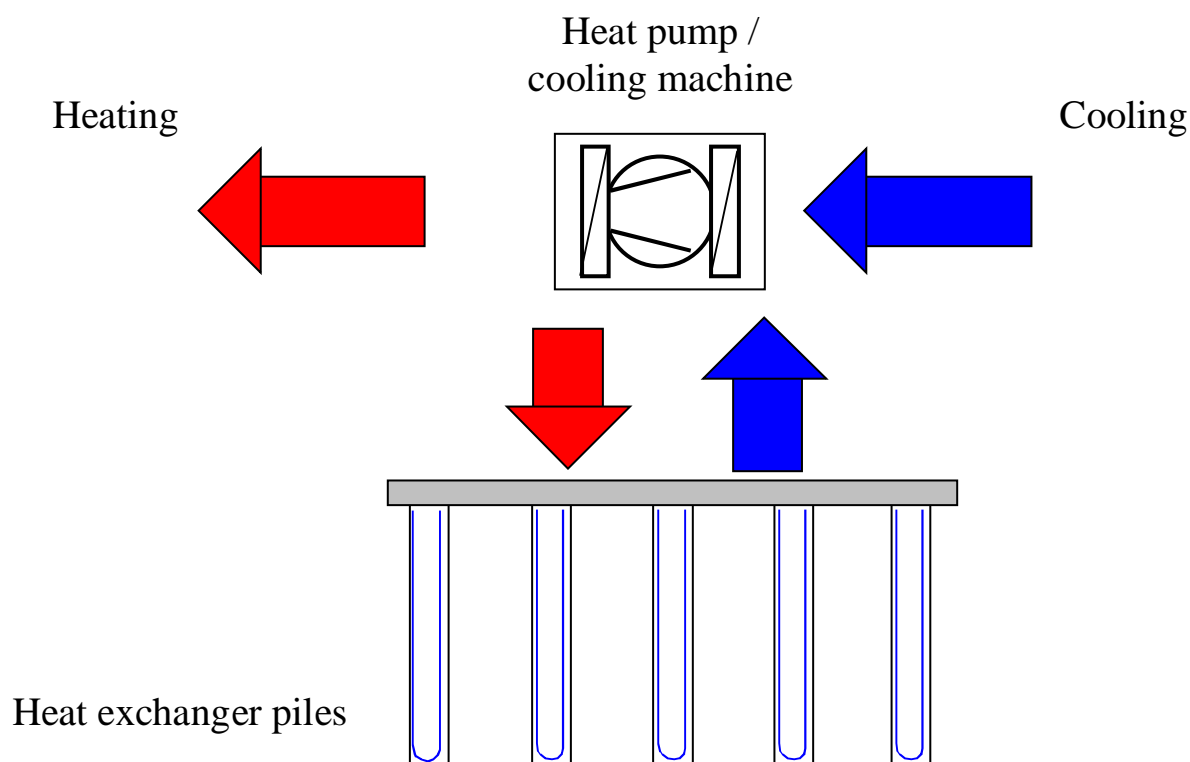


Fig. 1.8 Schematic view of a heat exchanger pile system concept with active cooling.

It is also possible to combine the two cooling modes, and perform direct cooling in priority to active cooling with the cooling machine. However this solution is not recommended. The system layout and system control are more complicated and the increase of the system thermal performance is often marginal. When a cooling machine coupled to the piles is used, the fluid temperature in the pile circuit increases to a level that is not compatible with the direct cooling mode.

Furthermore, it is not recommended to use part of the heat exchanger piles for the cooling machine and the other part for direct cooling. The temperature loss between the heat carrier fluid and the ground is too large for such a solution. The totality of the heat exchanger pile length is coupled to either the evaporator of the heat pump (heating mode), the condenser of the cooling machine¹ (active cooling mode) or the heat exchanger of the cooling distribution (direct cooling mode).

If a ground water flow is present in the pile region and is sufficiently important, a natural thermal regeneration of the ground is realised. As a consequence, heat extraction during Winter (for heating) does not depend of heat injection during Summer (for cooling). Seasonal heat storage is not anymore required for a satisfactory long-term operation of the system. In this case, the heat exchanger pile system can be designed for either heating or cooling.

¹ A heat exchanger normally separates the pile flow circuit from the condenser flow circuit, if this latter is also used for heating.

1.3 Effet sur la statique des pieux

Les sollicitations thermiques que les pieux subiront ne doivent en aucun cas conduire à une détérioration inacceptable de leurs propriétés mécaniques. En d'autres termes, les pieux doivent conserver leur capacité de supporter les charges du bâtiment en permanence. En particulier, le gel des pieux doit être évité. Pour un système correctement dimensionné et contrôlé, la température du fluide circulant dans les pieux ne tombera jamais sous 0 °C pendant une période significative de temps.

Lorsque des charges thermiques sont injectées dans les pieux, la température de ces derniers augmente, ce qui génère des déformations. Si le pieu n'est pas libre de se déplacer, les déformations se transforment en contraintes. Une étude expérimentale de Laloui et al. (1999) a montré que pour une augmentation de température du pieu de 15 K, la contrainte supplémentaire engendrée dans le pieu n'est pas négligeable. Elle devrait être prise en compte lors du dimensionnement statique du pieu. Toutefois une telle augmentation de la température du pieu implique de pouvoir chauffer le fluide caloporteur circulant dans les pieux à 40 – 50 °C, ce qui est déjà une situation extrême. Si du refroidissement direct est réalisé (température du fluide de 16 – 20 °C), l'effet est beaucoup plus faible.

Le fluide circulant dans les pieux doit ainsi satisfaire des contraintes de température pour ne pas affecter de manière inacceptable leurs propriétés mécaniques. Ces contraintes influencent la taille de la pompe à chaleur / machine frigorifique, et ainsi le potentiel de chauffage et de refroidissement offert par les pieux échangeurs. Si le mode refroidissement direct est préféré à l'utilisation d'une machine frigorifique, le potentiel de refroidissement dépend du niveau de température maximum possible pour satisfaire les besoins de refroidissement.

1.4 Autorisations

Comme pour les sondes géothermiques, une autorisation est généralement nécessaire pour la réalisation de pieux échangeurs. Comme ce sont les autorités cantonales qui légifèrent en la matière, s'adresser directement à elles.

1.5 Examples of some heat exchanger pile systems

Measurements of 4 heat exchanger pile systems were used for the study "Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs" (Fromentin et al., 1997). In this section, the main characteristics of these installations are taken from this report and given to provide some existing and measured examples. More details can be found in Fromentin et al., 1997. Note that the characteristics do not necessarily correspond to an optimal system. In table 1.1 a summary of the main characteristics of the four pile system is given.

Forschungsprojekt "Energiepfähle / Schlitzwände"
 Zusammenfassungstabelle

Nutzung	Anlage		Finkernweg Wohn-, Büro- und Gewerbehäuser	Lidwil Industriegebäude	Pago AG Produktions- und Verwaltungsgebäude	Photocolor Gewerbegebäude
Geologie			A Deckschicht B Bachschutt C Seebodenlehm D Moräne	A Aufschüttung B Deckschicht C Verlandungssedimente D Kiessande E Moräne F Molasse	A Deckschicht B Ton/Silt/Torf-Gemisch C Kiessande	A Deckschicht B Seebodenlehm C Fluvio-glaziale Ablagerungen D Grundmoräne
Grundwasser- spiegel	Lage		1.6 - 2.2 m u.T. sehr gering	ca. 3.0 m u.T. 2.5 - 3.0%	=< 1.0 m u.T. sehr gering	2.0 - 2.5 m u.T. ca. 1%
Anzahl Pfähle	Gefälle		87 / 75	155 / 120	573 / 570	98 / 93
	Total / Energiepfahl Durchmesser		30 x 30 40 x 40		40 x 40	
Wärmetauscher- rohrführung			8-fach 1 VI + 1RI	Doppel-U	8-fach 1 VI + 1RI	8-fach 1 VI + 1RI
Aktive Länge			ca. 10 - 12 m	ca. 26 m	14.0 m	10.0 m
Wärmeträger			Antifrogen N	Antifrogen N	Wasser	Wasser
Anlagentyp			monovalent 3 WP	monovalent 3 WP	bivalent 1 KM/WP 1 Heizkessel	bivalent 1 KM/WP 1 Heizkessel

Table 1.1 Main characteristics of the 4 heat exchanger pile systems used for the study "Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs" (Fromentin et al., 1997).

1.5.1 Anlage "FINKERNWEG", Kreuzlingen TG

Die von der Firma Logis Suisse SA realisierte Wohnüberbauung "Finkernweg" in Kreuzlingen besteht aus 4 Gebäuden mit integrierten Tiefgaragen und Zivilschutzräumen. Neben dem Erdgeschoss (EG) gelangten 1 Untergeschoss (UG), 3 Obergeschosse (OG) und 1 Dachgeschoss (DG) zur Ausführung. Die Autoeinstellhalle liegt flächendeckend unter den 3 Blöcken A - C. Die überbaute Fläche weist die Grundrissmasse ca. 70 x 120 m auf. Die Gebäude werden als Wohn-, Büro- und Gewerberaum genutzt. Mit den nachfolgend beschriebenen Messungen wird nur das Haus A erfasst, welches auf 87 Pfähle fundiert ist. 75 dieser Pfähle wurden als Energiepfähle (EPF) ausgerüstet, welche eine energetisch nutzbare Gesamtlänge von ca. 800 m' aufweisen.

Untergrund

Die massgeblichen Kennziffern wurden als geschätzte Richtwerte in folgendem Rahmen angenommen:

Schicht	Mächtigkeit [m]	Porosität n [m ³ Wasser/m ³ Boden]	Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	GW-Fließgeschw. [m/Tag]
A	0.3 - 3.5	ca. 0.35	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	Niederschlagsabh.
B	0.0 - 2.5	ca. 0.30	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	sehr gering
C	12.0 - 19.0	0.50 - 0.60	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	sehr gering
D	unbekannt	0.30 - 0.40	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	Kein GW

Neigung des GW-Spiegels i: ca. 0.02 m/m Richtung NNE

Geschätzte Durchschnittswerte

Durchschnittliche Jahrestemperatur im Boden T₀: 10° C

Wärmeleitfähigkeit λ: ca. 2.2 W/mK

Vol. Wärmekapazität c_v: ca. 2.3 MJ/m³K

Leistungs-, Energie- und Kostentabelle
Anlage: Finkernweg, Kreuzlingen TG (Haus A)

Heizleistung (gesamt):	85 kW
Heizleistung (nicht konventionell):	85 kW
Pfahllänge total:	825 m
Jahresarbeitszahl (JAZ):	ca. 2.6
Durchschnittlicher Wärmeentzug:	150 – 190 kWh/m/a
Durchschnittliche Pfahlbelastung:	60 – 70 W/m
Produzierte Wärmeenergie (Heizung + Warmwasser):	200'000 – 250'000 kWh/a
Verdampferenergie aus EPF:	123'000 – 154'000 kWh/a
Kälteleistung (gesamt):	-
Kälteleistung (nicht konventionell):	-
produzierte Kälteenergie (gesamt):	-
Genutzte Kälteenergie (aus erneuerbaren E.träger):	-
Elektrische Leistung (nicht konventionell):	ca. 45 kW
Elektrische Energie (nicht konventionell):	ca. 70'000 kWh/a
Investionskosten des Projektes:	581'000.- Fr.
Lebensdauer der Anlage:	20 Jahre
Annuität (6% Zins):	8.72
Strompreis:	17.6 Rp/kWh
Öl-, resp. Gaspreis:	-
Energiekosten Strom:	ca. 12'300.- Fr./a
Energiekosten Öl resp. Gas:	-
Kapitaldienst:	50'663.- Fr./a
Wartungskosten:	ca. 6'900.- Fr/a
Jahreskosten:	ca. 69'863.- Fr./a
Wärme - Kälte Gestehungspreis (nur Alternativenergie):	28 - 35 Rp./kWh

1.5.2 Anlage "LIDWIL GEWERBE AG", Altendorf SZ

Das von der Firma Mächler AG realisierte Industriegebäude liegt in Altendorf SZ in unmittelbarer Nähe des Zürichsees, zwischen der Kantonstrasse und der SBB-Trasse und südlich des Talbaches. Die gesamte Baufläche mit einem Grundriss von ca. 40 x 50 m verteilt sich auf 6 Geschosse und wird als Gewerbefläche genutzt.

Untergrund

Die massgeblichen Kennziffern sind als geschätzte Richtwerte im folgenden Rahmen anzunehmen:

Schicht	Mächtigkeit [m]	Porosität n [m ³ Wasser/m ³ Boden]	Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	GW-Fließgeschw. [m/Tag]
A	0.0 - 1.5	0.30 - 0.40	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	kein GW
B	1.0 - 4.0	0.35 - 0.45	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	kein GW
C	0.0 - ?	0.35 - 0.55	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁶	kein GW
D	20.0 - 25.0	ca. 0.30	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	100 - 150
E	0.0 - 1.0	0.35 - 0.45	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	kein GW

Neigung des Grundwasserspiegels i: 2.5 - 3 % Richtung ENE

Geschätzte Durchschnittswerte

Durchschnittliche Jahrestemperatur im Boden T₀: (kann nur abgeschätzt werden!)

Wärmeleitfähigkeit λ: ca. 1.8 W/mK

Vol. Wärmekapazität c_v: ca. 2.4 - 2.5 MJ/m³K

Leistungs-, Energie- und Kostentabelle
Anlage: Lidwil Gewerbe AG, Altendorf

Heizleistung (gesamt):	160 kW
Heizleistung (nicht konventionell):	160 kW
Pfahllänge total:	2'057 m
Jahresarbeitszahl (JAZ):	ca. 3.0
Durchschnittlicher Wärmeentzug:	80 – 100 kWh/m/a
Durchschnittliche Pfahlbelastung:	40 – 60 W/m
Produzierte Wärmeenergie (Heizung):	258'000 – 325'000 kWh/a
Verdampferenergie aus EPF:	171'000 – 215'000 kWh/a
Kälteleistung (gesamt):	-
Kälteleistung (nicht konventionell):	-
produzierte Kälteenergie (gesamt):	-
Genutzte Kälteenergie (aus erneuerbaren E.träger):	-
Elektrische Leistung (nicht konventionell):	53.5 kW
Elektrische Energie (nicht konventionell):	86'000 – 108'000 kWh/a
Investitionskosten des Projektes:	574'490.- Fr.
Lebensdauer der Anlage:	20 Jahre
Annuität (5% Zins):	8.02
Strompreis:	15 Rp/kWh
Energiekosten Strom:	13'089.- Fr./a
Kapitaldienst:	46'099.- Fr./a
Wartungskosten:	-
Jahreskosten:	59'187.- Fr./a
Wärme - Kälte Gestehungspreis (nur Alternativenergie):	18 - 23 Rp./kWh

1.5.3 Anlage "PAGO AG", Grabs SG

In den Jahren 1994 und 1995 errichtete die Firma Pago AG (Etiketten und Etikettiersysteme) ihren Geschäftsneubau in Grabs SG, der sich in zwei Hauptteile gliedert: Produktion und Verwaltung im sogenannten Hauptbau und Hochregallager. Der Neubau wurde gesamthaft einfach unterkellert. Im Untergeschoss wurden die Lasten z.T. über Einzelstützen (Tiefgarage) und über die Kellerwände, im Palettenlager jedoch flächenhaft über die Bodenkonstruktion abgetragen.

Untergrund

Die massgeblichen Kennziffern sind als geschätzte Richtwerte in folgendem Rahmen anzunehmen:

Schicht	Mächtigkeit [m]	Porosität n [m ³ Wasser/m ³ Boden]	Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	GW-Fliessgeschw. [m/Tag]
A	ca. 0.5	0.50 - 0.60	$10^{-2} - 10^{-4}$	kein GW
B	20 - 30	0.40 - 0.60	$10^{-5} - 10^{-7}$	kein GW
C	?	0.30 - 0.40	$10^{-1} - 10^{-4}$	sehr gering
Neigung des Grundwasserspiegels i:			sehr gering	

Geschätzte Durchschnittswerte

Durchschnittliche Jahrestemperatur im Boden T_0 : 10 °C
 Wärmeleitfähigkeit λ : 1.8 - 2.0 W/mK
 Vol. Wärmekapazität c_v : ca. 2.4 MJ/m³K

Leistungs-, Energie- und Kostentabelle
Anlage: Pago AG, Grabs

Heizleistung (gesamt):	1'000 kW
Heizleistung (nicht konventionell):	750 kW
Pfahllänge total:	7'980 m
Jahresarbeitszahl (JAZ):	3.6
Durchschnittlicher Wärmeentzug:	18 kWh/m/a
Durchschnittliche Pfahlbelastung:	50 – 80 W/m
Produzierte Wärmeenergie:	1'000'000 kWh
Verdampferenergie aus EPF:	145'000 kWh
Kälteleistung (gesamt):	1'400 kW
Kälteleistung (direkt Kühlung mit Energiepfähle):	320 - 380 kW
produzierte Kälteenergie (gesamt):	1'200'000 kWh/a
Genutzte Kälteenergie (aus erneuerbaren E.träger):	270'000 - 300'000 kWh/a
Elektrische Leistung (nicht konventionell):	250 kW
Elektrische Energie (nicht konventionell):	577'000 kWh/a
Investitionskosten des Projektes:	19'320'000.- Fr.
Lebensdauer der Anlage:	20 Jahre
Annuität (5% Zins):	8.02
Strompreis:	19.8 Rp/kWh
Öl-, resp. Gaspreis:	3.2 Rp./kWh
Energiekosten Strom:	16'400.- Fr./a
Energiekosten Öl resp. Gas:	105'800.- Fr./a
Kapitaldienst:	155'029.- Fr./a
Wartungskosten:	42'620.- Fr./a
Jahreskosten:	319'849.- Fr./a
Wärme - Kälte Gestehungspreis:	14.5 Rp./kWh

1.5.4 Anlage "PHOTOCOLOR", Kreuzlingen TG

Der im Jahre 1992 realisierte Neubau der Firma Photocolor Kreuzlingen AG bedingte aufgrund der geologischen Verhältnisse eine Pfahlfundation. Das Gebäude mit 1 UG, EG + 1 OG in den Abmessungen ca. 28.5 x 52.0 m grenzt im Norden unmittelbar an eine damals bereits bestehende Halle; in den ersten ~ 4 m entlang der Halle wurde auf eine Unterkellerung verzichtet. Die Gebäudelasten werden im Untergeschoss grossenteils über Einzelstützen mit relativ grossen Rasterabständen von 9.25 x 12.75 m abgetragen.

Untergrund

Die massgeblichen Kennziffern sind als geschätzte Richtwerte in folgendem Rahmen anzunehmen:

Schicht	Mächtigkeit [m]	Porosität n [m ³ Wasser/m ³ Boden]	Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	GW-Fliessgeschw. [m/Tag]
A	2.0 ± 0.5	0.30 - 0.35	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	kein GW
B	10.0 ± 1.0	0.35 - 0.55	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁶	sehr gering
C	6.0 ± 1.0	ca. 0.30	10 ⁻¹ - 10 ⁻⁴	ca. 10.0
D	unbekannt	0.30 - 0.40	10 ⁻³ - 10 ⁻⁶	kein GW
Neigung des GW-Spiegels i:			ca. 0.02 m/m Richtung NNE	

Geschätzte Durchschnittswerte

Durchschnittliche Jahrestemperatur im Boden T₀ : 10° C

Wärmeleitfähigkeit λ: ca. 2.2 W/mK

Vol. Wärmekapazität c_v : ca. 2.3 MJ/m³K

Leistungs-, Energie- und Kostentabelle
Anlage: Photocolor AG, Kreuzlingen

Heizleistung (gesamt):	390 kW
Heizleistung (nicht konventionell):	102 kW
Pfahllänge total:	1'023 m
Jahresarbeitszahl (JAZ):	2.9
Durchschnittlicher Wärmeentzug:	140 - 200 kWh/a
Durchschnittliche Pfahlbelastung:	40 – 80 W/m
Produzierte Wärmeenergie (alternativ):	215'000 – 307'000 kWh/a
Verdampferenergie aus EPF:	140'000 – 200'000 kWh/a
Kälteleistung (gesamt):	90 kW
Kälteleistung (nicht konventionell):	90 kW
produzierte Kälteenergie (gesamt):	58'000 kWh/a
Genutzte Kälteenergie (aus erneuerbaren E.träger):	48'000 kWh/a
Elektrische Leistung (nicht konventionell):	36 kW
Elektrische Energie (nicht konventionell):	49'000 kWh/a
Investitionskosten des Projektes:	272'000.- Fr.
Lebensdauer der Anlage:	20 Jahre
Annuität (5% Zins):	8.02
Strompreis:	12.3 Rp/kWh
Energiekosten Strom:	6'027.- Fr./a
Kapitaldienst:	21'826.- Fr./a
Wartungskosten:	3'260.- Fr./a
Jahreskosten:	31'113.- Fr./a
Wärme - Kälte Gestehungspreis (nur Alternativenergie):	8 - 11 Rp./kWh

2. CARACTERISATION THERMIQUE D'UN ENSEMBLE DE PIEUX ECHANGEURS

2.1 Principaux paramètres géologiques et hydrogéologiques du terrain

Les valeurs des paramètres suivants doivent être connues afin de pouvoir définir au mieux le potentiel d'utilisation thermique du terrain:

- la **capacité thermique volumétrique C_v** , en J/m^3K , correspond à la quantité de chaleur nécessaire (J) à l'élévation en température de 1 K d'un volume de $1 m^3$ de terrain.
- la **conductibilité thermique λ** , en W/mK , correspond au flux de chaleur (W/m^2) transmis par conduction au travers d'un corps soumis à un gradient de température de 1 K/m.
- la **perméabilité k** , en m/s, permet de déterminer la **vitesse d'écoulement de l'eau souterraine v** (ou vitesse de Darcy) en m/s, par le biais de la pente i ou du gradient de pression horizontal de la nappe souterraine (par exemple : $v = k i$)

Les domaines de variation des paramètres cités ci-dessus au sein des formations géologiques meubles concernées par la mise en place de pieux de fondation sont donnés dans la table 2.1.

Type de sol	Perméabilité k [m/s]	Conductibilité thermique λ [W/m·K]		Capacité thermique volumique C_v [MJ/m ³ ·K]	
		sec	saturé	sec	saturé
Argile	$10^{-8} - 10^{-10}$	0.2 - 0.3	1.1 - 1.6	0.3 - 0.6	2.1 - 3.2
Limon	$10^{-5} - 10^{-8}$	0.2 - 0.3	1.2 - 2.5	0.6 - 1.0	2.1 - 2.4
Sable	$10^{-3} - 10^{-4}$	0.3 - 0.4	1.7 - 3.2	1.0 - 1.3	2.2 - 2.4
Gravier	$10^{-1} - 10^{-3}$	0.3 - 0.4	1.8 - 3.3	1.2 - 1.6	2.2 - 2.4

Table 2.1 Domaine de variation des principales caractéristiques de terrains couramment rencontrés lors de la mise en oeuvre de pieux de fondation.

Il ressort de la table 2.1 que les valeurs des propriétés thermiques λ et C_v sont très nettement plus élevées en présence d'eau dans le terrain. La capacité de stocker de l'énergie thermique à long terme (saison) d'un ensemble de pieux échangeurs est également une fonction directement dépendante de la vitesse d'écoulement de la nappe phréatique. Il suffit d'une vitesse de Darcy de l'ordre de 0.5 à 1.0 m/jour dans une couche perméable traversée par les pieux échangeurs pour disperser l'énergie transférée par ces derniers et

empêcher le stockage saisonnier de l'énergie thermique. Pour plus de détails sur les définitions, la législation, les propriétés thermiques du sous-sol, etc., il est recommandé de consulter la littérature disponible (p. ex. SIA D0136, chapitre 2: "Das Erdreich als Wärmequelle").

2.2 Caractérisation thermique d'un pieu échangeur

Le paramètre le plus important d'un pieu échangeur est certainement sa résistance thermique, dénotée **R_b** , qui permet de quantifier l'écart de température entre le fluide circulant dans le pieu et le terrain sur son pourtour, en régime stationnaire, et pour une puissance transférée connue. En d'autres termes, l'extraction d'une puissance thermique crée une différence de température entre le fluide et le terrain, indépendamment du fait d'avoir des conditions géologiques et une hydrogéologie locale favorables ou non. Cette différence de température atteint facilement plusieurs degrés, voir une dizaine de degrés pour un cas défavorable. Par exemple, un pieu de résistance thermique 0.2 K/(W/m), sous l'effet d'une puissance d'extraction de 50 W/m, créera, une fois un régime stationnaire établi dans le pieu, une différence de température de 10 K entre la température moyenne du fluide et du terrain sur son pourtour.

D'autres paramètres sont la capacité thermique du pieu, qui augmente avec son diamètre, et la résistance thermique interne R_a , qui permet d'évaluer les effets défavorables des transferts de chaleur internes dans le pieu: pour une extraction de chaleur donnée, le fluide caloporteur qui ressort du pieu a été refroidi par le fluide qui retourne dans le pieu. Néanmoins, l'influence de ces deux paramètres n'est pas aussi grande que celle de R_b . Seule la résistance thermique d'un pieu R_b est considérée dans cette section.

La résistance thermique d'un pieu échangeur dépend du type de pieu utilisé, de son diamètre, du nombre et de l'arrangement spatial des tubes dans le pieu, du régime d'écoulement du fluide dans les tubes, de la conductibilité thermique des matériaux utilisés, etc. Dans cette section, elle est calculée pour un pieu creux préfabriqué de 0.45 m de diamètre, et des pieux massifs de diamètres 0.34, 0.45, 0.6, 1.0 et 1.4 m. Pour les pieux massifs, le nombre de tubes, fixés verticalement à l'intérieur de l'armature métallique, est varié de 4 à 8 (2, 3 et 4 tubes en forme de U). La conductibilité thermique du béton et le régime d'écoulement du fluide caloporteur (laminaire ou non laminaire) sont variés. Un pieu circulaire de 0.34 m de diamètre, respectivement 0.45 m, est équivalent à un pieu carré de 0.3 m de côté, respectivement 0.4 m. Le pieu creux préfabriqué, de 0.45 m de diamètre, laisse un espace vide de 0.25 m de diamètre au centre, dans lequel 4 tubes formant 2 U sont insérés. Ces pieux sont généralement coupés à ras le sol. Il faut veiller à ne pas laisser tomber des matériaux dans le pieu avant d'insérer les tubes, afin de ne pas raccourcir la longueur d'échange du pieu échangeur. L'espace vide est ensuite rempli avec un matériau de remplissage. Le pieu creux préfabriqué correspond au pieu PILOTHERM de SACAC utilisé à Lidwil, tandis que les pieux massifs de 0.34 et 0.45 m de diamètre, équipés avec 8 tubes, correspondent aux pieux NÄGELE utilisés à Finkernweg, Photocolor et Pago (cf. section 1.5 du chapitre 1).

2.2.1 Pieu creux préfabriqué

Les valeurs de la résistance thermique du pieu creux préfabriqué sont calculées pour différentes valeurs de la conductibilité thermique du matériau de remplissage (bentonite: 0.7 W/mK et sable de quartz: 1.5 W/mK), de l'écartement des tubes dans le pieu (8 et 21cm) et du régime d'écoulement du fluide dans les tubes (laminaire et non laminaire). La résistance thermique du pieu sera toujours supérieure à celle de sa paroi annulaire en béton, calculée à 0.05 K/(W/m) pour une conductibilité thermique de 1.8 W/mK du béton. (La résistance thermique de la paroi annulaire est calculée à 0.07 K/(W/m) pour un béton à 1.3 W/mK). Les valeurs calculées sont comprises entre 0.12 et 0.37 K/(W/m). La valeur la plus élevée (situation la plus mauvaise), est obtenue avec un matériau de remplissage peu conducteur comme la bentonite (0.7 W/mK), un faible écartement entre les tubes (8 cm) et un régime d'écoulement laminaire. Une valeur de 0.15 K/(W/m) devrait facilement être réalisée en pratique avec un bon écartement des tubes (21 cm) et un matériau de remplissage plus conducteur (gravier ou sable de quartz saturé en eau). Les caractéristiques du pieu creux préfabriqué ainsi que sa résistance thermique sont données dans la table 2.2.

Type de pieu	pieu creux préfabriqué
Diamètre extérieur du pieu	45 cm
Diamètre de l'espace creux intérieur	25 cm
Diamètre extérieur/intérieur des tubes en plastique	25 / 20.4 mm (MDPE)
Conductibilité thermique du plastique	0.4 W/mK
Régime d'écoulement du fluide dans les tubes	laminaire
Ecartement ente 2 tubes opposés	21 cm
Conductibilité thermique du matériau de remplissage	1.5 W/mK (gravier ou sable saturé)
Conductibilité thermique du béton formant le pieu	1.8 W/mK
Résistance thermique calculée du pieu:	0.15 K/(W/m)
Variation d'un paramètre relativement aux valeurs ci-dessus:	Résistance thermique (K/(W/m):
Ecartement ente 2 tubes opposés réduit à 8 cm	0.23 (+0.08 ou +50%)
Conduct. du mat. de rempl. réduite à 0.7 W/mK	0.19 (+0.04 ou +25%)
Régime d'écoulement du fluide non laminaire	0.12 (-0.03 ou - 20%)

Table 2.2 Caractéristiques et résistance thermique d'un pieu creux préfabriqué de 45 cm de diamètre.

2.2.2 Pieu massif

Les pieux massifs de 34 et 45 cm de diamètre étudiés sont équipés avec des tubes en plastique de diamètre extérieur / intérieur de 20 / 16 mm, fixés sur l'intérieur de l'armature métallique du pieu, soit à 5 cm du bord. Les autres pieux, de diamètre 60, 100 et 140 cm, sont équipés avec des tubes de diamètres 32 / 26 mm, fixés à 10 cm du bord du pieu. Les résistances thermiques des pieux sont montrées dans la figure 2.1 pour une conductivité thermique du béton de 1.8 W/mK et un régime laminaire dans les tubes.

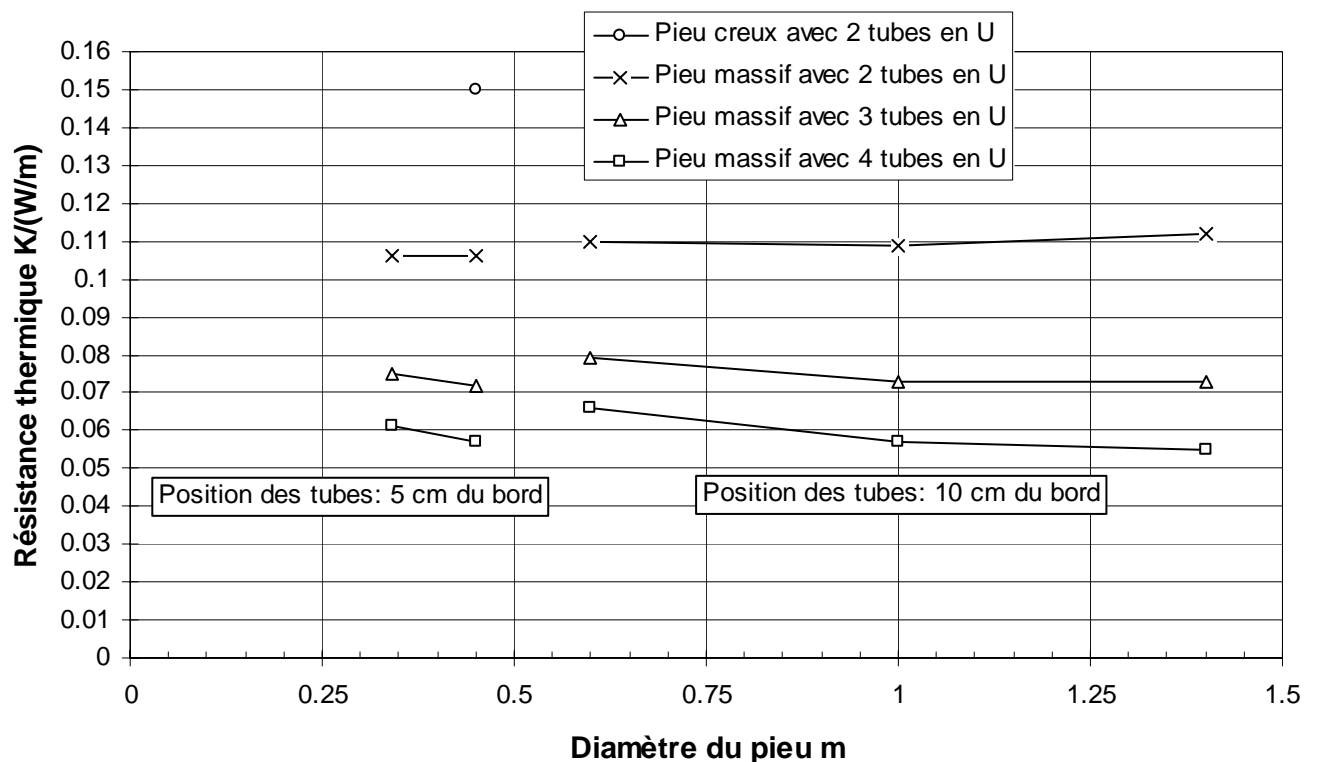


Fig. 2.1 Résistances thermiques de pieux massifs de diamètre 34 (30 x 30 cm), 45 (40 x 40 cm), 60, 100 et 140 cm. Les tubes sont placés à 5 cm du bord pour les pieux de 34 et 45 et à 10 cm pour les autres. Pour chaque pieu, un double - U, un triple - U et un quadruple - U est calculé. (Conductivité thermique du béton: 1.8 W/mK, régime d'écoulement dans les tubes laminaire). La résistance thermique du pieu creux calculée plus haut est également indiquée.

Un régime non laminaire dans les tubes livre une figure similaire, avec des résistances thermiques légèrement meilleures. Toutefois, l'amélioration devient plus faible avec un nombre de tubes plus important. Elle est d'environ 0.02 K/(W/m) pour un double - U, mais n'est plus que de 0.01 K/(W/m) avec un quadruple - U. Une conductivité thermique du béton plus faible (1.3 W/mK au lieu de 1.8 W/mK) conduit à une résistance thermique plus haute. L'effet est d'environ 0.02 K/(W/m) pour un double - U, et devient également plus faible avec

un nombre de tube plus grand. L'amélioration de la résistance thermique d'un pieu diminue chaque fois qu'un tube en U est rajouté. En passant de deux U à trois U, le gain est d'environ 0.030 K/(W/m), et de trois U à quatre U, il n'est plus que de 0.015 K/(W/m); en revanche, l'influence des deux paramètres étudiés (régime d'écoulement, conductibilité thermique du béton) devient plus faible avec un nombre plus grand de tubes.

Pour un nombre de tubes donnés placés le plus près possible du bord du pieu, la résistance thermique du pieu est relativement la même quel que soit son diamètre. Toutefois, elle a tendance à augmenter avec l'augmentation du diamètre pour un double - U, et à diminuer avec un quadruple - U. Il est donc bénéfique d'insérer davantage de tube en U pour un pieu plus épais, mais l'effet sur la résistance thermique reste à peu près le même pour des diamètres de pieu compris entre 30 et 140 cm.

La figure 2.1 montre les résistances thermiques de pieux de diamètres différents, mais elle ne permet pas de les comparer. La résistance thermique d'un pieu est définie relativement à son rayon. Pour pouvoir comparer plusieurs valeurs entre elles, il faut adopter un rayon commun, choisi comme le rayon du pieu le plus épais. En d'autres termes, à la résistance thermique du pieu, il faut ajouter la résistance thermique de la couronne de terrain entre le bord du pieu et le rayon commun. Pour un transport de chaleur par conduction pure dans le terrain, elle est donnée par la relation (2.1):

$$R_{\text{anneau}} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \quad (2.1)$$

R_{anneau} : résistance thermique de l'anneau de terrain compris entre r_i et r_o (K/(W/m));
 λ : conductibilité thermique du terrain (W/mK);
 r_o : rayon extérieur (rayon commun) (m);
 r_i : rayon intérieur (rayon du pieu) (m).

La figure 2.2 permet une comparaison des résistances thermiques des pieux en choisissant pour le rayon de référence celui du plus gros pieu (70cm). La conductibilité thermique du terrain est supposée être à 1.8 W/mK. Cette comparaison n'est valide que si l'effet d'un mouvement d'eau souterrain est négligeable.

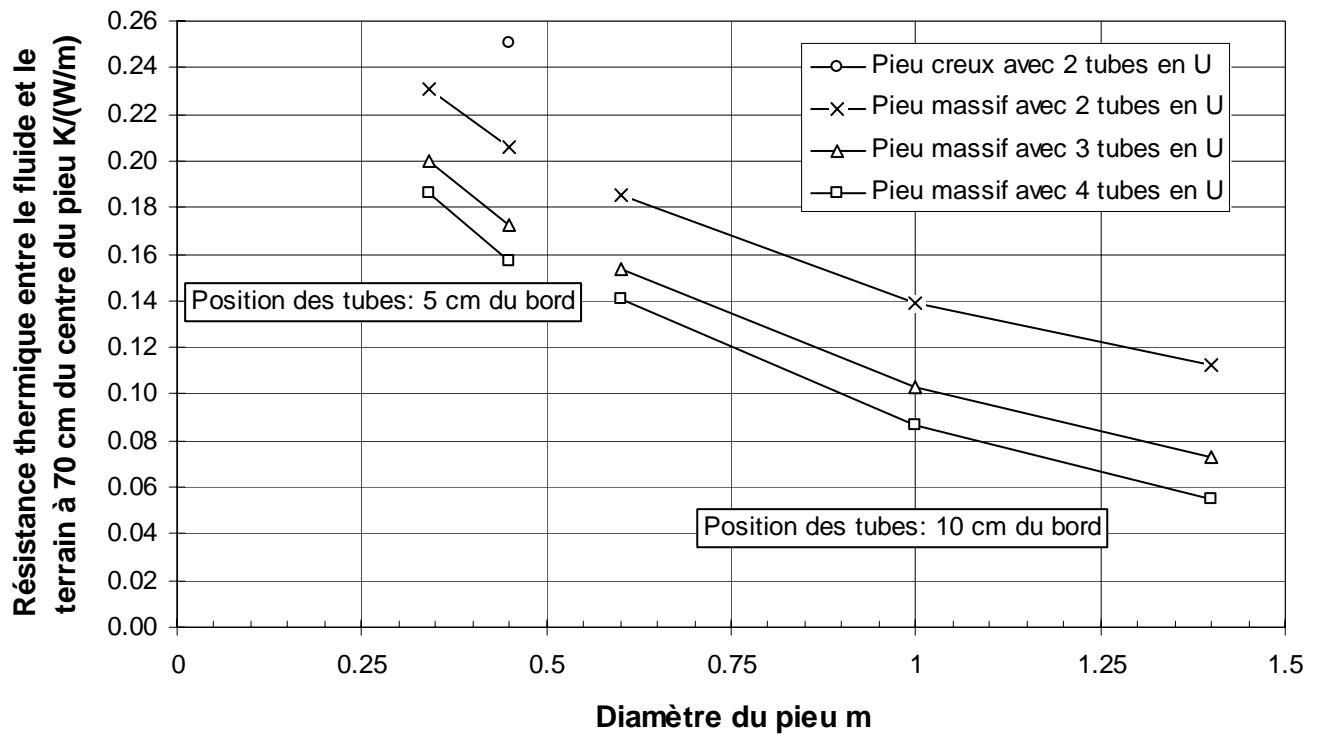


Fig. 2.2 Résistances thermiques de pieux massifs de diamètre 34 (30 x 30 cm), 45 (40 x 40 cm), 60, 100 et 140 cm. Les résistances thermiques sont calculées relativement à un rayon commun de 70 cm, et incluent la contribution du terrain pour des pieux de rayon inférieur. Elle est calculée pour un mode de transfert de chaleur par conduction uniquement avec la relation (2.1). (Terrain: conductivité thermique de 1.8 W/mK. Pieux: conductivité thermique du béton de 1.8 W/mK, régime d'écoulement dans les tubes laminaire). La résistance thermique du pieu creux est également indiquée.

L'avantage d'avoir des pieux de grands diamètres est évident. Néanmoins, le positionnement des tubes dans le pieu est un paramètre important, surtout si les tubes ne sont pas soigneusement écartés les uns des autres et s'ils sont placés vers le centre du pieu. Dans la figure 2.3, la résistance thermique d'un pieu de 140 cm de diamètre, équipé de 4 tubes en U, est montrée en fonction de la position des tubes, mesurée par la distance radiale entre le centre du pieu et le centre des tubes.

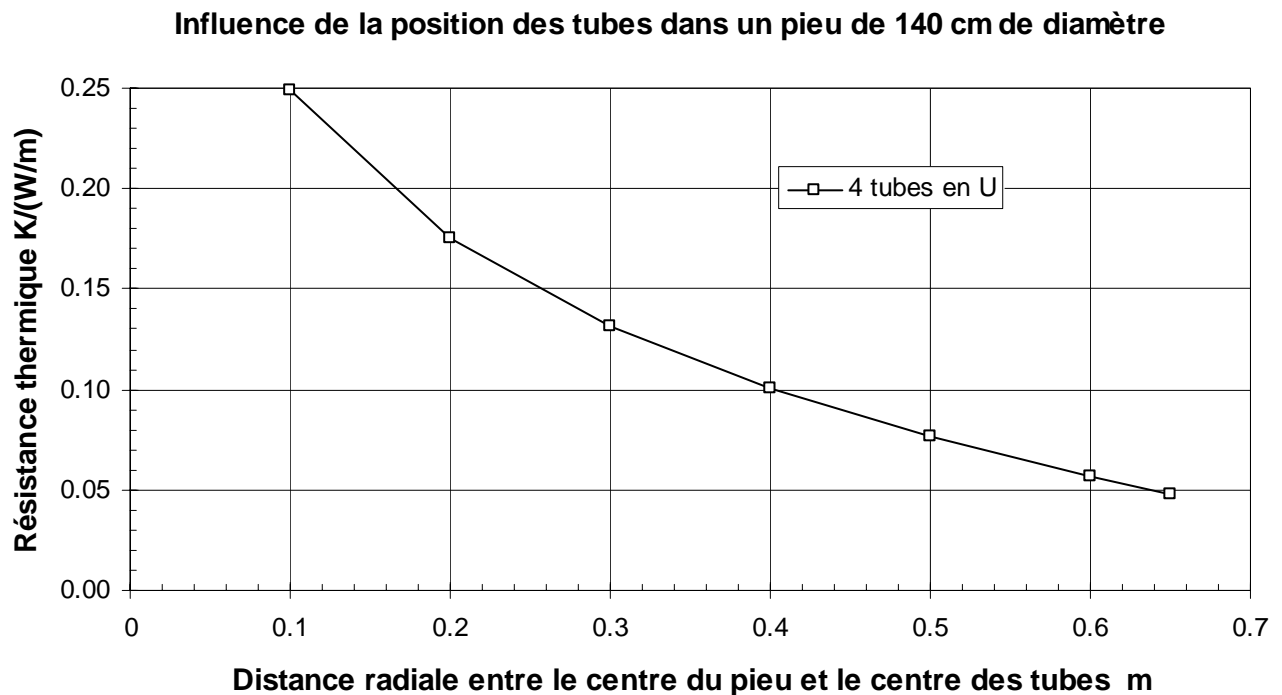


Fig. 2.3 Résistances thermiques d'un pieu massif de 140 cm de diamètre. La résistance thermique est calculée relativement à la position des 8 tubes, mesurée par la distance radiale entre le centre du pieu et le centre des tubes. (Conductivité thermique du béton: 1.3 W/mK, régime d'écoulement dans les tubes non laminaire).

2.2.3 Valeurs de résistances thermiques typiques de pieux échangeurs

En ce qui concerne les pieux massifs, les tubes sont fixés sur la face intérieure de leur armature métallique. Les calculs des résistances thermiques ont montré que la résistance thermique d'un pieu dépend essentiellement du nombre de tubes en U. Le diamètre, varié de 30 à 140 cm, a une influence négligeable si les tubes sont écartés le plus possible les uns des autres et sont le plus loin possible de l'axe du pieu. En ce qui concerne les pieux creux les calculs ont été effectués pour un seul diamètre (45 cm). Avec cette catégorie de pieu, il est très important de pouvoir écarter au maximum les tubes. Les valeurs de résistance thermique données ci-dessous peuvent être considérées comme typiques et peuvent être adoptées à défaut de calcul plus précis.

Type de pieu :	R_b (K/(W/m))
pieu creux équipé avec un double – U :	0.15
pieu massif équipé avec un double – U :	0.10 - 0.11
pieu massif équipé avec un triple – U :	0.07 - 0.08
pieu massif équipé avec un quadruple – U :	0.06

Ajouter des tubes en U à un pieu équipé avec 4–U ne permet pas de sensiblement abaisser sa résistance thermique.

2.3 Capacité de transfert thermique

La capacité de transfert thermique est un des paramètres fondamentaux qui permet de caractériser un ensemble de pieux échangeurs du point de vue thermique. Un autre paramètre important, abordé plus loin, est la capacité de stockage. La capacité de transfert thermique, notée **UA**, équivaut à la puissance thermique que l'on peut transférer dans le terrain, une fois un régime stationnaire établi, pour une différence de température de 1 K entre la température moyenne du fluide caloporteur et la température moyenne du terrain.

La capacité de transfert thermique dépend de la résistance thermique entre la température moyenne du fluide et la température moyenne du terrain, dont la résistance thermique d'un pieu n'est qu'une composante. Une estimation de la contribution du terrain peut être effectuée dans le cas où seul le mode de transfert de chaleur par conduction domine. Cette estimation est valide une fois qu'un régime en flux stationnaire est établi, ou, en d'autres termes, quand la différence entre la température moyenne du fluide et la température moyenne du terrain devient constante dans le temps, suite à l'injection ou l'extraction d'une puissance thermique constante. La durée de cette période transitoire est estimée par la relation (2.2) (Hellström, 1991):

$$t_{fs} = 0.065 \frac{A_p}{a} \quad (2.2)$$

t_{fs} : durée de la période transitoire (s);

A_p : section du volume de terrain associé à 1 pieu (pour un espacement quadratique B, $A_p = B \times B$) (m^2);

a : diffusivité thermique du terrain (m^2/s); a est le quotient entre la conductibilité thermique du terrain (W/mK) et sa capacité thermique volumétrique (J/m^3K).

Pour des valeurs typiques ($a = 0.8 \cdot 10^{-6} m^2/s$ et $B = 4 m$), la période transitoire dure une quinzaine de jours.

La résistance thermique du terrain R_g en flux stationnaire se calcule par la relation (2.3) (Hellström, 1991):

$$R_g = \frac{1}{2 \pi \lambda} \left\{ \left[\frac{r_1^2}{r_1^2 - r_b^2} \right]^2 \ln \left(\frac{r_1}{r_b} \right) - \frac{3}{4} - \frac{r_b^2}{2(r_1^2 - r_b^2)} \right\} \quad (2.3)$$

R_g : résistance thermique du terrain en flux stationnaire (K/(W/m));
 λ : conductibilité thermique du terrain (W/mK);
 r_b : rayon des pieux (m);
 r_1 : rayon du volume de terrain associé à un pieu (m);
 $r_1 = B / \sqrt{\pi}$; et B est l'espacement moyen entre les pieux (m);

La capacité de transfert thermique UA d'un ensemble de pieux échangeurs, définie par la puissance que l'on peut transférer par degré d'écart entre la température du fluide caloporteur et la température moyenne de terrain, est connue via la résistance thermique en flux stationnaire (cf. relation (2.4)):

$$UA = \frac{n \cdot H}{R_b + R_g} \quad (2.4)$$

UA : capacité de transfert thermique (W/K);
n : nombre de pieux échangeurs (-);
H : longueur active d'un pieu échangeur (m);
 R_g : résistance thermique du terrain en flux stationnaire (K/(W/m));
 R_b : résistance thermique des pieux échangeurs (K/(W/m)).

La capacité de transfert thermique d'un ensemble de pieux est donc connue si l'on connaît la résistance thermique des pieux, leurs dimensions (diamètre, longueur active et nombre), l'espacement moyen entre les pieux et la conductibilité thermique moyenne du terrain. Elle traduit une relation linéaire entre la puissance transférée par les pieux et la différence de température entre le fluide et le terrain en situation de flux stationnaire (cf. relation 2.5):

$$P = UA (T_f - T_m) \quad (2.5)$$

P : puissance thermique injectée ou extraite par les pieux échangeurs (W);
UA : capacité de transfert thermique (W/K);
 T_f : température moyenne du fluide (°C);
 $T_f = (T_i + T_o)/2$; T_i et T_o : température d'entrée et de sortie du fluide dans les pieux (°C);
 T_m : température moyenne du terrain dans la zone perturbée par les pieux échangeurs (°C).

La figure 2.4 permet d'obtenir graphiquement la résistance thermique du terrain R_g . Elle a été calculée pour une conductibilité thermique du terrain de 1.8 W/mK. Comme R_g est inversement proportionnel à λ , il est facile de corriger les valeurs pour d'autres valeurs de conductibilité thermique, en les multipliant par le rapport $1.8/\lambda$, où λ est la conductibilité

thermique du terrain considéré. Le graphique permet d'obtenir R_g en fonction du diamètre du pieu et de l'espacement moyen de ces derniers. R_g a été calculé avec la formule 2.3.

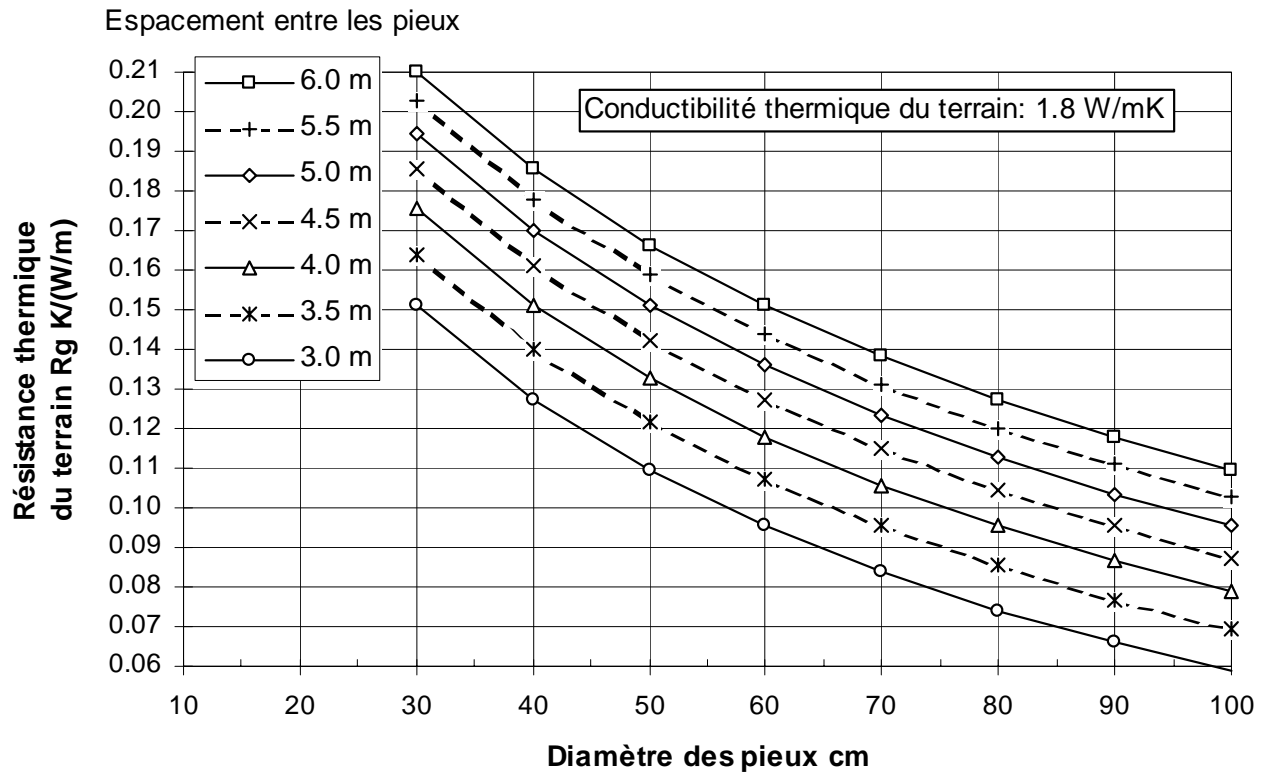


Fig. 2.4 Résistance thermique du terrain R_g d'un ensemble de pieux échangeurs dans un terrain de conductivité thermique 1.8 W/mK. Elle est montrée en fonction du diamètre et de l'espacement moyen des pieux.

Afin d'illustrer l'utilité de la figure 2.4, on se donne un pieu carré de 40 cm de côté et de résistance thermique 0.06 W/(m/K). Les pieux sont espacés de 4 m dans un terrain de conductivité thermique de 1.8 W/mK. Quelle puissance thermique peut-on extraire sous une différence de température de 5 K entre le fluide et le terrain?

Un pieu carré de 40 cm de côté est équivalent à un pieu circulaire de 45 cm de diamètre. Avec un espacement de 4 m, la figure permet de déterminer la résistance thermique du terrain R_g à 0.14 K/(W/m). L'inverse de $(R_b + R_g)$ équivaut à la puissance thermique que l'on peut transférer par degré d'écart en situation de flux stationnaire et par mètre linéaire de pieu. Avec 5 degrés d'écart, on peut extraire 25 W par mètre de pieu. Si la température moyenne du terrain est à 6 °C à la fin de l'hiver, l'extraction de 25 W/m conduira à une température moyenne du fluide de +1 °C dans les pieux. En admettant que la puissance thermique est extraite avec un écart de température de 4 K entre l'entrée et la sortie de l'évaporateur de la PAC, le fluide caloporteur retournera dans les pieux avec une température d'environ -1 °C.

Un flux d'extraction relativement faible (25 W/m) crée dans ce cas une différence de température significative (5K). Ce flux d'extraction est obtenu après environ 2 semaines

durant lesquelles la différence de température est maintenue à 5 K (durée de l'effet transitoire avant d'obtenir un flux stationnaire dans le terrain). Le flux d'extraction peut être plus intense s'il est entrecoupé de périodes de repos. A l'extrême, dans le cas où un écoulement d'eau souterrain permet de régénérer "instantanément" l'énergie prélevée dans le terrain, la résistance thermique du terrain devient négligeable. Il reste néanmoins celle des pieux (0.06 K/(W/m)), ce qui limite la puissance d'extraction à 80 W/m pour un écart de température de 5 K comme dans l'exemple ci-dessus.

2.4 Capacité de stockage

La capacité de stockage équivaut à la quantité d'énergie nécessaire à l'élévation de température de 1 K du volume de terrain touché par les pieux échangeurs. Un faible espacement entre les pieux permet d'obtenir une meilleure capacité de transfert de l'ensemble des pieux (cf. section précédente). Néanmoins la capacité de stockage de la zone des pieux est réduite relativement à un espacement plus grand. Il en résultera une variation plus rapide de la température moyenne du terrain dans le temps, et donc d'un épuisement plus rapide de l'énergie thermique stockée dans la zone des pieux en période d'extraction de chaleur.

La capacité de stockage C d'un ensemble de pieux échangeurs, définie par l'énergie que l'on peut extraire par degré d'abaissement de la température moyenne de terrain dans la zone des pieux, est connue par la capacité thermique volumétrique et le volume de terrain touché par les pieux échangeurs (2.6):

$$C = C_v H S \quad (2.6)$$

C : capacité de stockage (J/K);

C_v : capacité thermique volumétrique moyenne du terrain (J/m³K);

H : longueur active moyenne des pieux échangeurs (m);

S : surface horizontale de terrain touchée par les pieux échangeurs (K/(W/m)).

La surface S est estimée comme la surface délimitée par un périmètre dessiné autour de tous les pieux échangeurs, passant à environ un demi - espacement moyen des pieux extérieurs. Cette surface, multipliée par la longueur active moyenne des pieux échangeurs, définit le volume de terrain touché par ces derniers. Si les pieux sont suffisamment bien uniformément placés, cette estimation est satisfaisante. Il faut être plus prudent avec des espacements entre les pieux très variables. Dans ce cas, le volume de terrain ainsi défini est trop optimiste, car les espacements les plus grands laisseront apparaître des portions de volume de terrain plus inertes que d'autres. L'installation PAGO est un bon exemple qui montre que le volume de terrain effectivement touché par les pieux est presque trois fois plus petit que le volume de terrain dans lequel les pieux sont insérés, estimé par la méthode ci-dessus (Fromentin et al., 1997).

Sans tenir compte des apports ou des pertes de chaleur dans le volume touché par les pieux échangeurs, l'énergie thermique que l'on aimerait extraire du terrain crée un abaissement de température ΔT_m de la température moyenne du terrain dans la zone des pieux (2.7):

$$Q = C \Delta T_m \quad (2.7)$$

Q : énergie thermique extraite par les pieux échangeurs (J);

C : capacité de stockage (J/K);

ΔT_m : abaissement de la température moyenne du terrain dans la zone des pieux (K).

2.5 Effets à long terme

Les effets à long terme se traduisent par un nouvel équilibre vers lequel la température moyenne annuelle du terrain dans la zone des pieux tend. Ils dépendent du bilan annuel des énergies extraites et injectées par le biais des pieux échangeurs, des transferts de chaleur avec le terrain environnant et des transferts de chaleur au travers de la base du bâtiment.

En outre, l'importance d'un écoulement régional de l'eau souterraine est une question primordiale pour le comportement à long terme du système. S'il est suffisamment important, l'extraction de chaleur hivernale sera découplée de l'injection de chaleur estivale. Dans le cas d'un système sans refroidissement, une recharge thermique du terrain ne sera pas nécessaire.

Sans écoulement de l'eau souterraine, une utilisation en refroidissement direct des pieux échangeurs implique que la température moyenne annuelle du terrain n'augmente pas sensiblement au cours des années. Il en résulte que l'énergie annuelle extraite par les pieux doit être plus élevée que celle qui est réinjectée en refroidissement direct, de manière à compenser les pertes thermiques du bâtiment par sa base.

3. RECOMMANDATIONS POUR LA REALISATION D'INSTALLATIONS AVEC PIEUX ECHANGEURS

En raison de son caractère multidisciplinaire, la conception d'une installation avec pieux échangeurs doit intervenir très tôt dans un projet. Un dimensionnement correct demande de définir avec le plus grand soin le contexte géologique, géotechnique et hydrogéologique local. D'autre part, les besoins en énergie, aussi bien en chaleur qu'en refroidissement, doivent être connus à l'avance et le plus précisément possible ; (idéalement, on devrait connaître l'évolution temporelle des puissances demandées et de leurs niveaux de température associés pendant une année type). A partir de là, différentes variantes de systèmes peuvent être évaluées, dimensionnées et comparées, sur la base du nombre de pieux de fondation à disposition, de leur emplacement et de leurs caractéristiques physiques et thermiques.

Cette démarche peut être effectuée plusieurs fois dans un projet, en fonction de l'état de connaissance des données et de leur évolution entre la phase initiale et la phase finale du projet, de manière à affiner chaque fois le concept et le dimensionnement du système. Si le concept final doit être établi avec l'aide d'un outil de simulation dynamique, ce n'est pas forcément le cas pour un avant-projet, lorsque des choix technologiques sont effectués. Dans le but de pouvoir dimensionner un avant-projet sans forcément recourir à un outil de simulation dynamique, une série de recommandations ont été établies sur la base de simulations numériques appliquées à un système typique. Elles ont été obtenus par les outils de simulation développés et validés sur les mesures des quatre installations présentées dans le chapitre 1 (Fromentin et al., 1997).

Le diagramme de la figure 3.2 synthétise les principaux résultats relatifs au dimensionnement d'un système avec pieux échangeurs. Il est valable pour un système dit de "référence" dont les principales caractéristiques sont :

- système monovalent (pas d'énergie auxiliaire comme appoint) ;
- pas de demande d'eau chaude sanitaire à satisfaire ;
- demande d'énergie de chauffage de 200 MWh/an (climat : Zurich ; surface de référence énergétique de 3'600 m², soit une demande d'énergie de chauffage de 55 kWh/m²an) ;
- trois PAC sont connectées en parallèle sur les pieux échangeurs (33 kW thermique chacune aux conditions suivantes : 5 / 0 °C entrée / sortie évaporateur et 40 / 50°C entrée / sortie condenseur ; coefficient de performance (COP) de 3.3) ;
- température dans la distribution de chauffage pour une température de l'air extérieur de -10°C : 50°C aller / 40°C) ;
- température minimum du fluide caloporteur tolérée dans le circuit des pieux : 0°C ;
- une centaine de pieux de 20 m de longueur ; petits diamètres (35 cm) ; équipés avec un quadruple-U ; espacés d'environ 4 mètres ;
- cave non chauffée entre les locaux chauffés et les pieux échangeurs (isolation de la dalle de fondation du bâtiment avec une couche d'isolation de 10 cm d'épaisseur) ;
- terrain : conductibilité thermique de 1.8 W/mK ; capacité thermique volumique de 2.4 MJ/m³K ; température initiale du terrain de 10 °C ;
- pas d'écoulement de l'eau souterraine.

Le schéma de principe du système de référence est montré dans la figure 3.1.

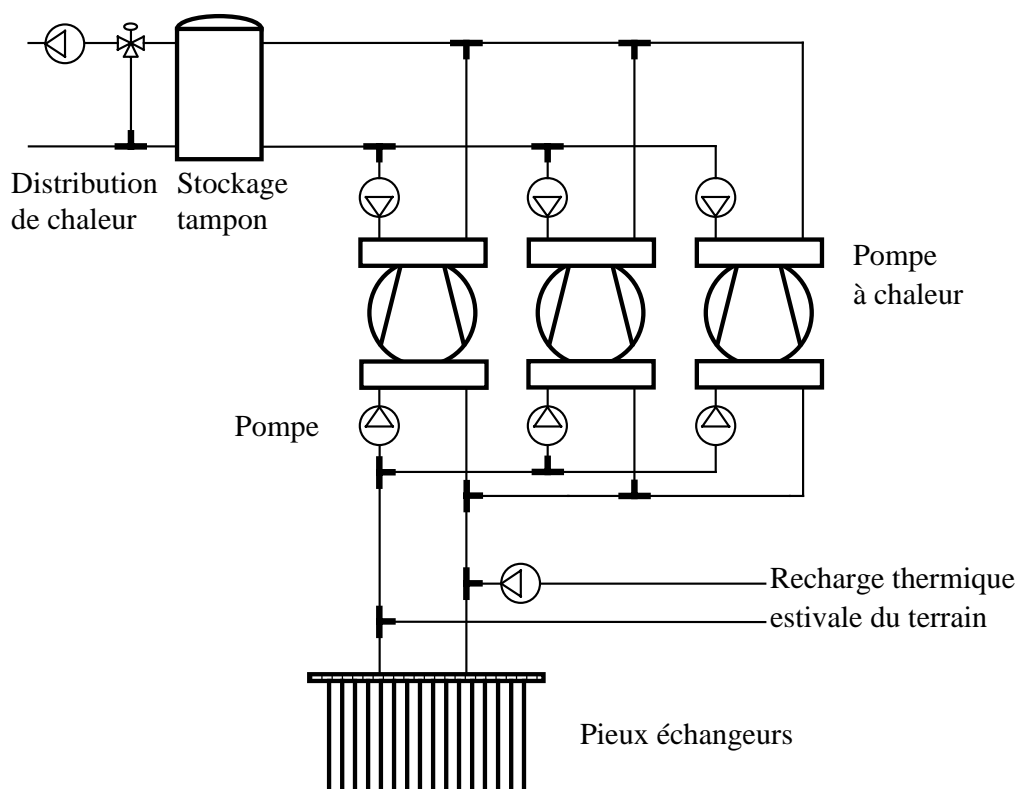
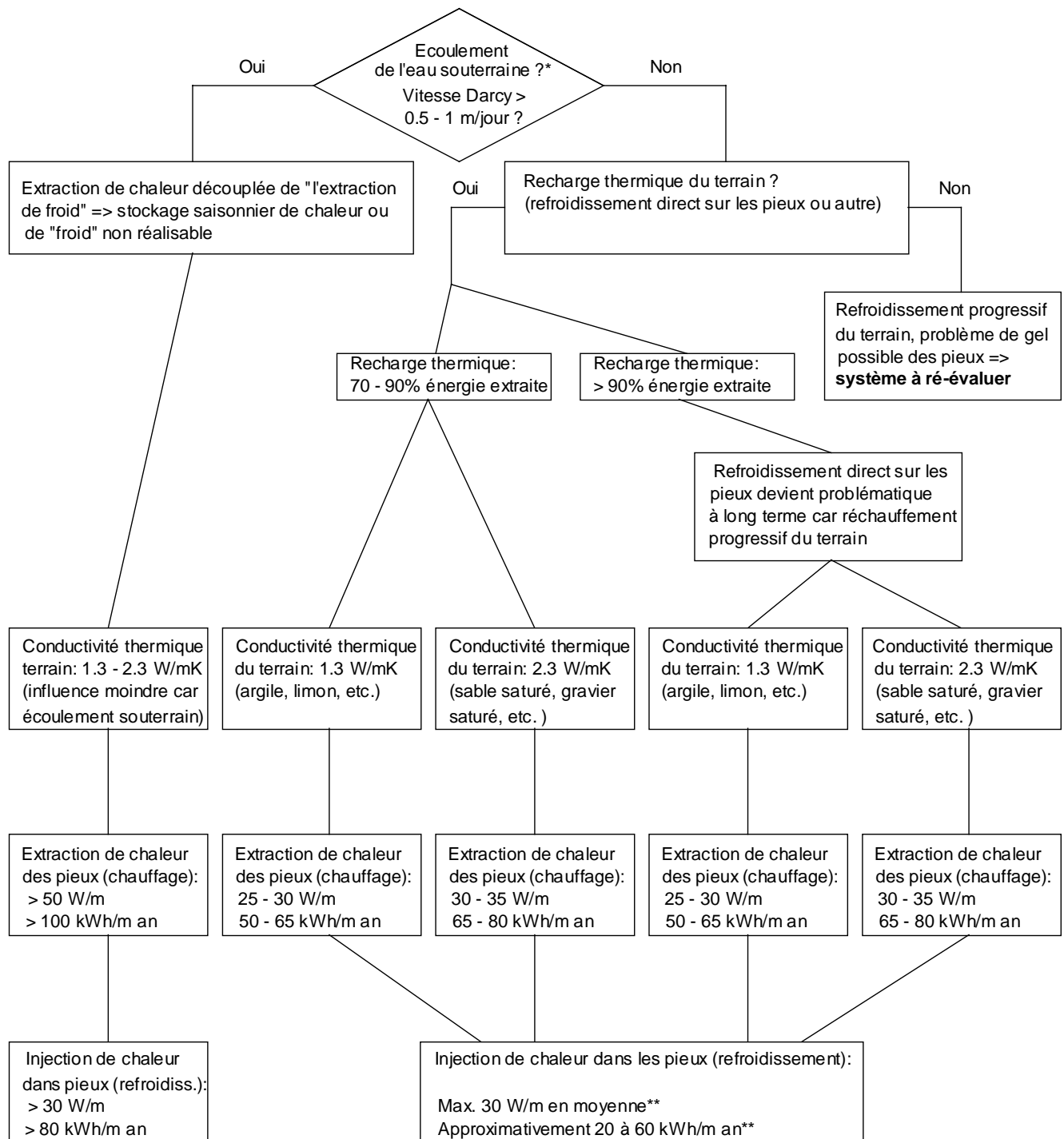


Fig. 3.1 Schéma de principe du système de référence utilisé pour établir les recommandations.

Si l'écoulement de l'eau souterraine est nul, il n'est pas possible de satisfaire la contrainte en température sans devoir effectuer une recharge thermique du terrain. Elle doit être d'au moins 100 à 125 MWh/an, soit 70 à 85% de l'énergie extraite par les pieux. La longueur active des pieux ne doit pas être inférieure à 20 m. Les tubes des connexions horizontales entre les pieux contribuent également à l'extraction de chaleur. Les simulations ont montré que 20% de l'énergie extraite provient des connexions horizontales. Ceci montre l'importance de poser la question sur la nécessité d'isoler ou non la base du bâtiment.

Un sur-dimensionnement thermique de la longueur des pieux échangeurs permet d'augmenter la température du fluide caloporteur dans les pieux. Toutefois, l'amélioration du coefficient de performance annuel de la pompe à chaleur ne permet pas de justifier l'augmentation de l'investissement relatif aux pieux échangeurs. Inversement, un sous-dimensionnement thermique conduit à des températures plus basses dans les pieux, ce qui peut entraîner un risque de gel. Dans la figure 3.2, les valeurs indiquées correspondent à un dimensionnement "optimal", dans le sens où la température du fluide dans les pieux peut descendre parfois à 0 °C, mais sans courir le risque de geler les pieux. Ces résultats sont à considérer avec prudence pour toute extrapolation à un autre type de système, mais servent déjà les besoins de pré-dimensionnement d'un avant-projet.



* il suffit que l'eau souterraine s'écoule dans une couche traversée par les pieux échangeurs, même mince relativement à la profondeur de ces derniers, pour que l'effet soit significatif.

** si la recharge thermique du terrain excède 90% de l'énergie prélevée, la température du terrain aura tendance à augmenter à long terme, ce qui limitera la recharge thermique si elle est réalisée par du refroidissement direct sur les pieux.

- avec des pieux de diamètre plus grand (> 40 cm), l'espacement est généralement plus grand, et les performances indiquées ci-dessus peuvent être revues à la hausse (jusqu'à 50% pour des pieux de 1 m de diamètre).

- les valeurs données ci-dessus correspondent à un système monovalent. Pour un fonctionnement en ruban des pieux, la puissance par mètre de pieu sera plus basse, et la quantité d'énergie par mètre de pieu plus grande.

Figure 3.2 Synthèse des principaux résultats numériques relatifs à un pré - dimensionnement d'un avant projet similaire au système de référence. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu échangeur.

D'autres recommandations et des considérations d'ordre plus général sont résumées ci-dessous :

- la planification d'un système avec pieux échangeurs doit intervenir très tôt dans le projet d'un bâtiment.
- un écoulement turbulent du fluide dans les pieux n'est pas recommandé si le pieu est équipé avec au moins 4 tubes en U (un quadruple – U).
- le problème de l'isolation ou non de la base du bâtiment doit être posé, particulièrement si les zones chauffées du bâtiment sont en contact direct avec le terrain.
- une recharge thermique du terrain est indispensable si l'eau souterraine ne s'écoule pas. Elle peut être réalisée de façon avantageuse avec une production de froid en été.
- 1 m de pieu échangeur permet de chauffer environ 2 m² de surface de plancher.
- la température du fluide circulant dans les pieux ne doit pas descendre en dessous de 0°C. Dans la pratique, elle n'excède pas 40 °C. Dans tous les cas, les variations de température du fluide doivent être compatibles avec le dimensionnement statique des pieux.
- le potentiel des pieux échangeurs est pleinement utilisé si la température du fluide circulant dans les pieux varie dans tout l'intervalle de température permis.
- les performances thermiques d'un système de pieux échangeurs sont pénalisées si les pieux ne sont pas régulièrement espacés. La pénalité devient significative si les espacements entre les pieux peuvent différer d'un facteur supérieur à environ 5.

Pour terminer, il apparaît souvent des problèmes de compatibilité lors du fonctionnement des différents composants d'un système de chauffage ou de refroidissement. Une compréhension du système dans sa globalité est nécessaire pour une intégration et une gestion optimum des différentes parties impliquées, et en particulier des pieux échangeurs dans le concept énergétique du bâtiment, compte tenu des besoins de l'utilisateur.

Enfin, il est difficile de généraliser les règles énoncées ci-dessus. Un outil de simulation dynamique d'un système avec pieux échangeurs restera très précieux pour répondre aux questions que l'on peut se poser lors du concept d'une telle installation.

4. L'OUTIL DE SIMULATION PILESIM

Dans le cadre du projet relatif aux pieux échangeurs du Dock Midfield de l'aéroport de Zürich (Pahud et al., 1999), les outils de simulation de systèmes avec pieux échangeurs développés au LASEN (Fromentin et al., 1997) ont servis de base pour le développement de PILESIM (Pahud, 1999). Bien que construit avec TRNSYS (Klein et al., 1998), PILESIM ne requiert pas de connaissance préalable de ce programme. Les performances thermiques du système, le potentiel thermique des pieux échangeurs et différents concepts de système peuvent être rapidement évalués.

La figure 4.1 permet de montrer la frontière du système simulé. Une grande flexibilité a été donnée à PILESIM de manière à pouvoir simuler une grande variété de systèmes.

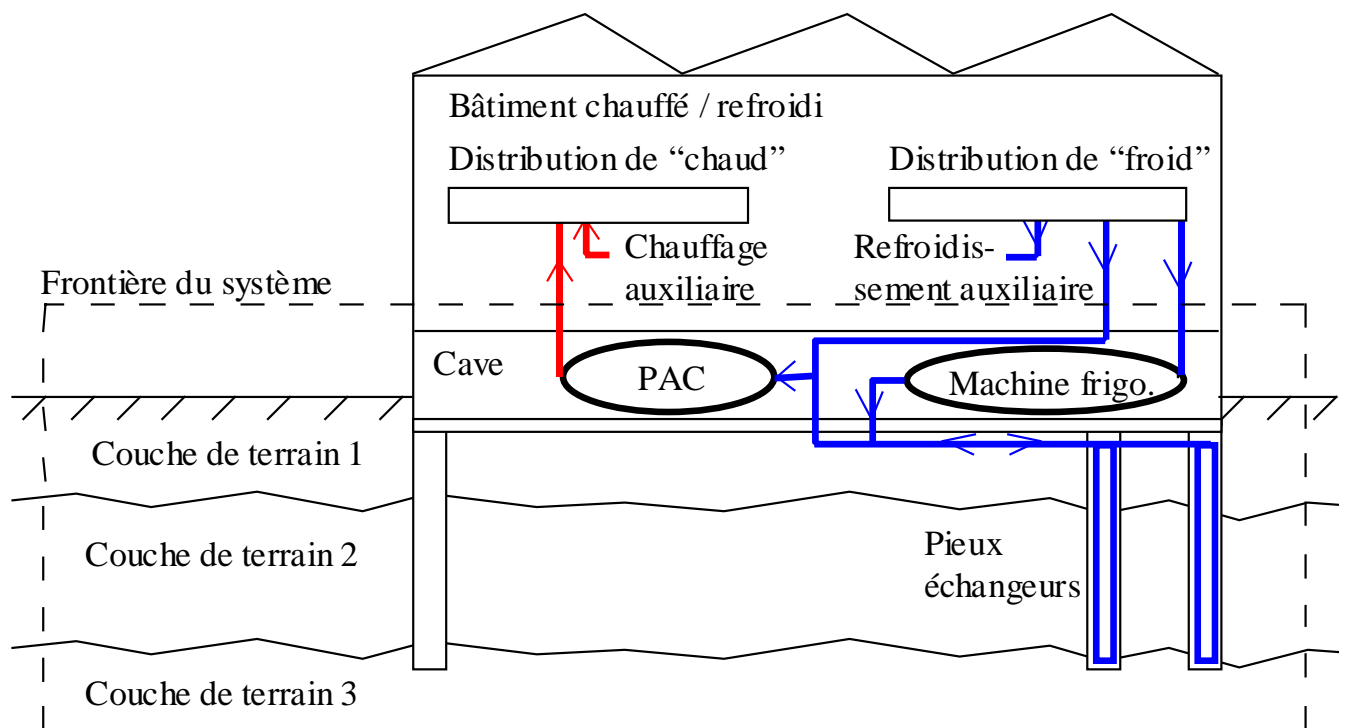


Figure 4.1 Vue schématique d'un système avec pieux échangeurs. PILESIM effectue les simulations de l'ensemble du système délimité par la frontière indiquée en traitillé.

Quatre types de systèmes peuvent être simulés. Ils ont tous en commun le chauffage d'un bâtiment par le biais d'une pompe à chaleur (PAC) couplée aux pieux échangeurs. L'extraction de chaleur hivernale peut être combinée avec une recharge thermique du terrain en été, ou une production de froid estivale qui peut être réalisée de trois manières différentes : une machine frigorifique couplée sur les pieux, en refroidissement direct sur les pieux ou une combinaison des deux avec priorité au refroidissement direct.

Les demandes de chauffage et de refroidissement du bâtiment sont données en entrée au programme, de même que le type de système, les contraintes de température que doit satisfaire le fluide circulant dans les pieux, les caractéristiques de la pompe à chaleur, de la machine frigorifique si utilisée, de l'interface terrain - bâtiment, des pieux échangeurs, de leurs connections horizontales et du terrain.

Les transferts d'énergie thermique sont calculés de manière dynamique avec une base de temps horaire et peuvent être effectués sur une période de 25 ans si nécessaire. PILESIM permet d'établir un bilan d'énergie de l'installation en valeurs mensuelles ou annuelles (cf. figure 4.2). Les évolutions temporelles des températures d'entrée et de sortie du fluide circulant dans les pieux peuvent être visualisées graphiquement de même que les puissances thermiques transférées dans les pieux.

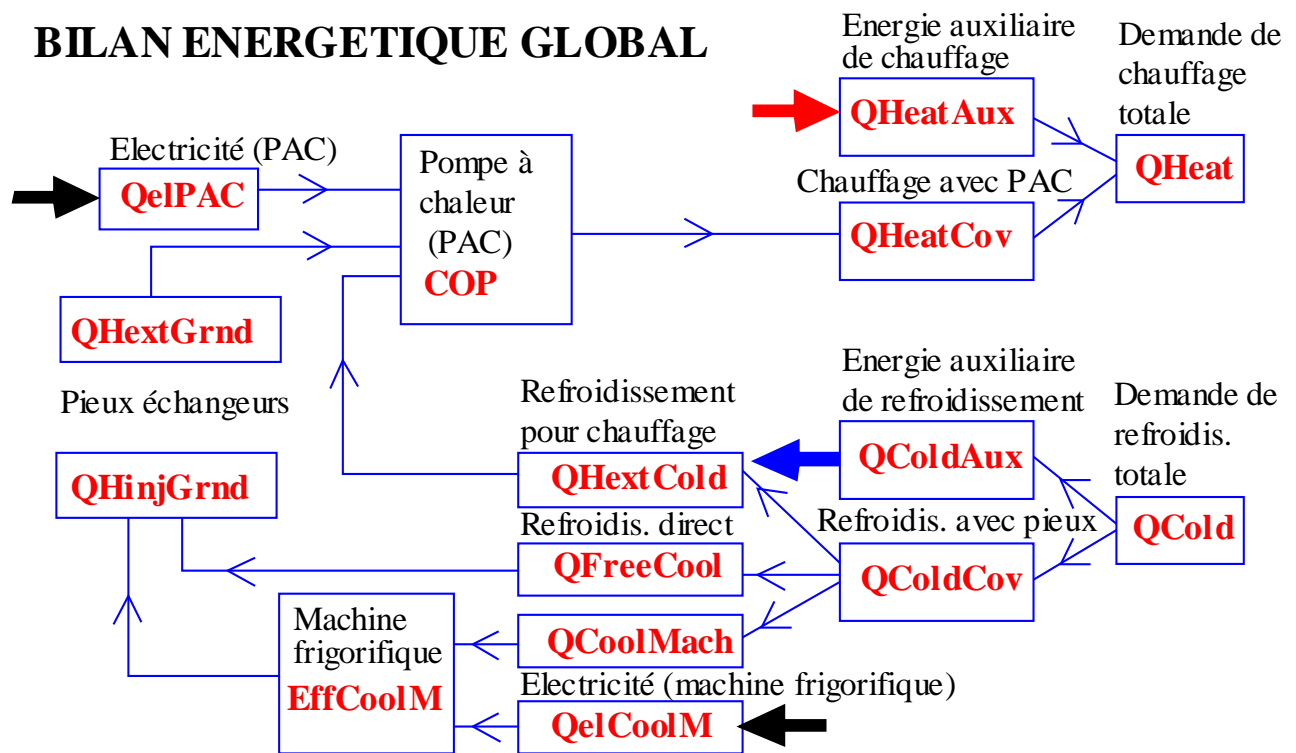


Figure 4.2 PILESIM permet d'établir un bilan énergétique global du système.

Une version de démonstration de PILESIM peut être demandée gratuitement à l'auteur par e-mail : daniel.pahud@dct.supsi.ch.

5. DOCK MIDFIELD OF THE ZURICH AIRPORT

The Dock Midfield project is briefly presented in order to provide an example that differs from the recommendations given in chapter 3 regarding a system sizing. It also shows an interesting use of the piles for a combined heating and cooling system. Direct cooling on the pile is performed. No cooling machine coupled to the pile is used.

5.1 The Dock Midfield

In the framework of the 5th building step of the Zürich airport, a new terminal, the Dock Midfield, is planned. This building, 500 m long and 30 m wide, will be constructed on foundation piles, as the upper layer of the ground is too soft to support the loads of the building. The piles, having a diameter comprised between 1 and 1.5 m, will stand on the moraine, which lies at a depth of about 30m. Among the 350 piles, about 300 will be used as heat exchanger piles. In other words, plastic tubes will be fixed on the metallic reinforcement for the circulation of a heat carrier fluid. Thermal energy can be injected or extracted from the ground. In that way the piles form a heat exchanger with the ground, so called ground heat exchanger. Connected to a heat pump, thermal energy will be extracted from the ground for heating purpose during the winter. During the summer, a thermal recharge is necessary. It is achieved by injecting in the ground part of the thermal loads of the building. The ground volume in the pile region acts as a seasonal storage of thermal energy.

Early versions of PILESIM were used to assess the thermal potential offered by the piles and to optimise the size of the heat pump. With the evolution of the Dock Midfield project, the input data to PILESIM became more precise, and several calculations were performed to adapt the pile system to the last knowledge of the project. The heating and cooling requirements were assessed at different stage of the project. A first and rough estimate was based on the programme DIAS (1996) for the heating demand and the recommendation SIA 382/2 (1992) for the cooling demand. The final estimation of the heating and cooling requirement is the result of a TRNSYS simulation of the building (Koschenz and Weber, 1998) which gives the evolution for a typical year in hourly value. The thermal properties of the ground were determined in situ with a “response test” performed on two boreholes drilled in the zone that is crossed by the piles.

5.2 The pile system layout

The pile system is bivalent. In figure 5.1, a schematic layout of the system is shown. Note that in the real system, the position of the 3-way valves would be either at a different place or replaced with two 2-way valves, depending on technical and practical reasons. However, the system concept and operation remain unchanged.

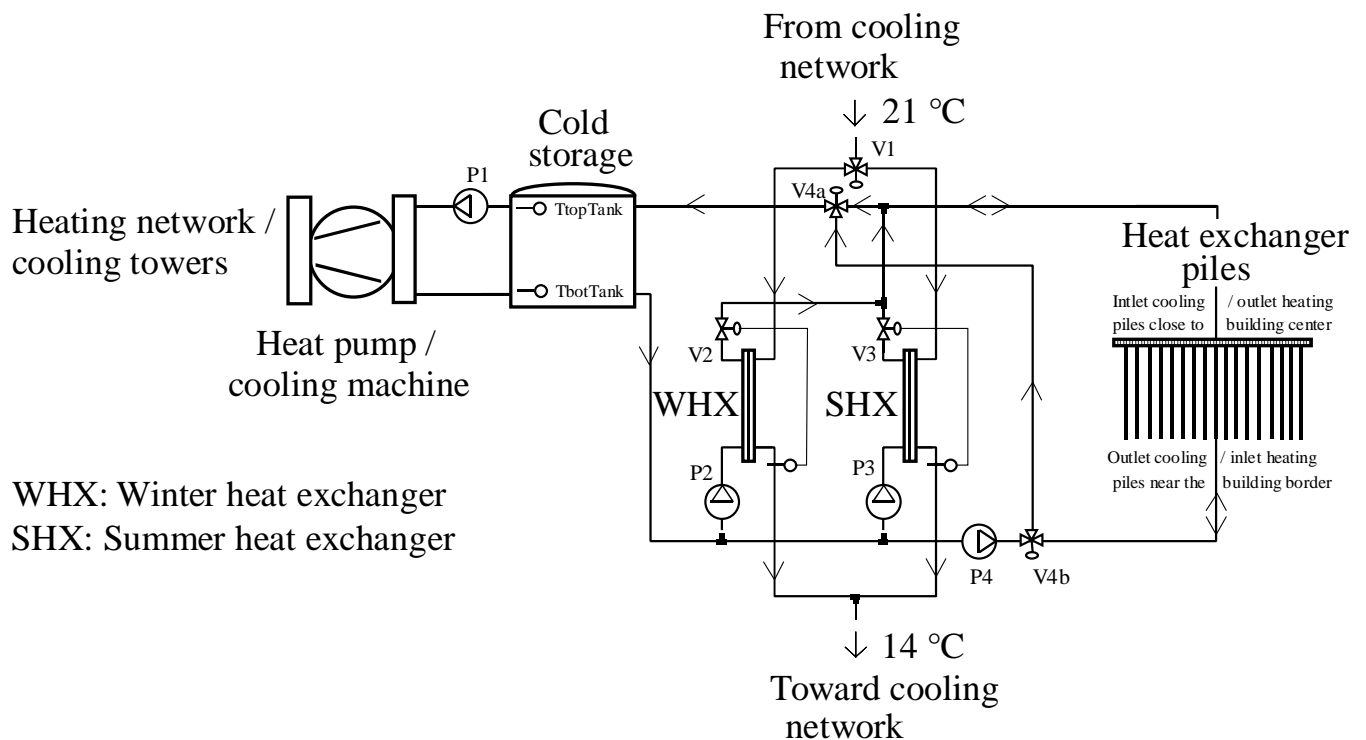


Fig. 5.1 Schematic layout of the Dock Midfield heat exchanger pile system.

The cooling demand that has to be satisfied by the heat exchanger pile system may range from 90 kW to 700 kW. On the side of the cooling distribution, the return fluid temperature is supposed to be 21 °C and the forward one has to be 14 °C. This temperature is controlled by the two-way valve on the primary side of the heat exchanger, which adjusts the flow rate in the primary side to the right value (V2 or V3). The heat exchanger is sized for an inlet fluid temperature of 12 °C in the primary side and the maximum heat rate to be transferred. As the inlet fluid temperature and the heat rate can be much lower than the design values, the flow rate has to be reduced to a very low value. For practical and technical reasons, two heat exchangers are used. One for low heat rates and fluid temperatures, the WHX (Winter Heat Exchanger), and one for large heat rates and greater fluid temperature, the SHX (Summer Heat Exchanger). Either the WHX or the SHX is used at a time. It should be noted that the WHX may also be used during the Summer. The idea is to prevent the flow rate in the heat exchanger primary side from being too small.

Three different operational modes are defined. They are independent from the use of the WHX or the SHX. They are:

- pile cooling mode;
- pile resting mode;
- pile heating mode.

For each of these modes, the pile system can supply energy to both the heating and the cooling distributions. One exception is the use of the cooling machine, which may occur in the “pile cooling mode” only. In this case the heat from the machine condenser is dumped outside by the means of cooling towers, and can not be delivered to the heating network. However, the needs for heating are likely to be small when the cooling machine is used. When the “pile cooling mode” is active, direct cooling is performed. In figure 5.2, the drawing shows the setting of the pumps and valves for this mode. The cooling demand is arbitrary met through the winter heat exchanger (WHX). The heat pump is used as a cooling machine only if the piles can not meet the totality of the cooling demand.

Pile cooling mode

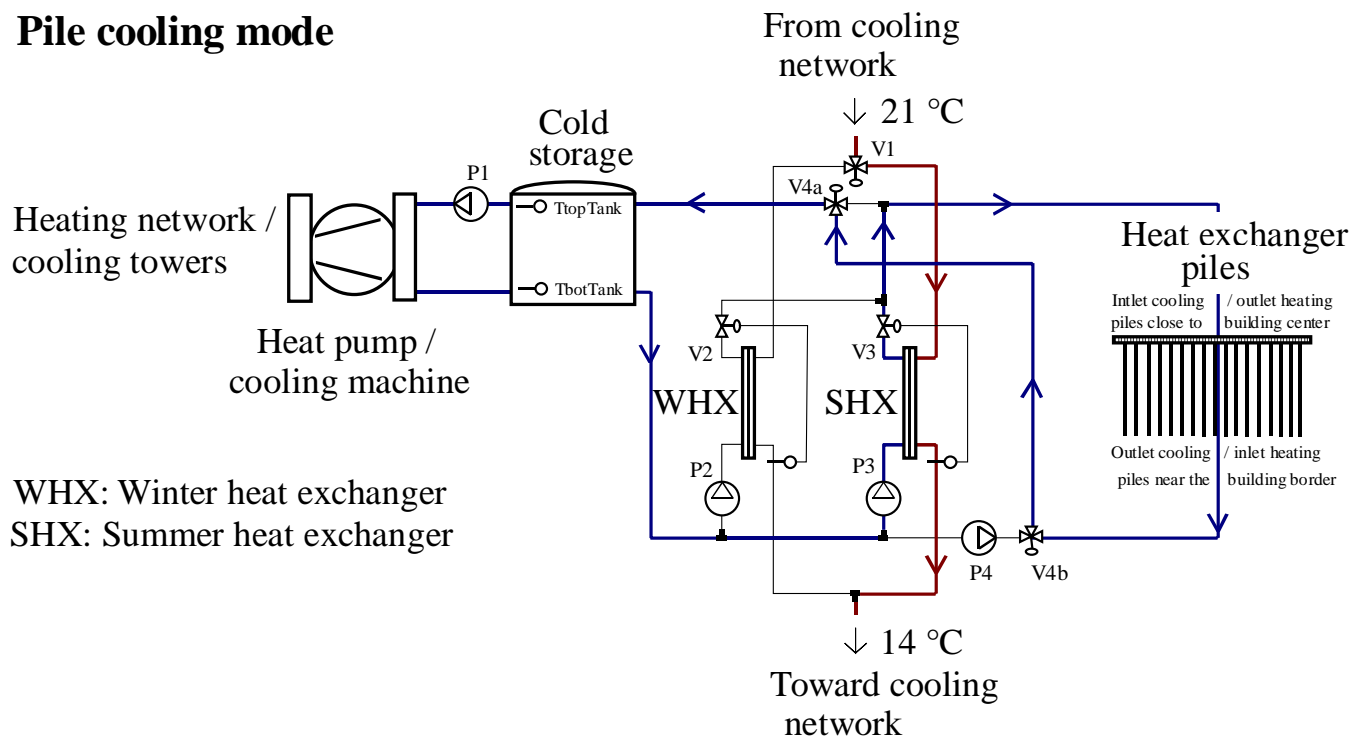


Fig. 5.2 Pile cooling mode: the pile pump P4 is stopped and the fluid flows through the piles thank to the three-way valves V4a and V4b. The fluid is heated by the cooling demand and then cooled by the heat exchanger piles.

The maximum fluid temperature at the bottom of the cold storage is 12 °C in order to ensure a normal operation of the summer heat exchanger. If the fluid temperature rises above this limit, the cooling machine is used and stops a possible operation of the heat pump. If the fluid temperature decreases below a given threshold, the heat exchanger piles do not need to be used. In this case the operational mode switches from the “pile cooling mode” to the “pile resting mode”. The “pile resting mode” is shown in figure 5.3.

Pile resting mode

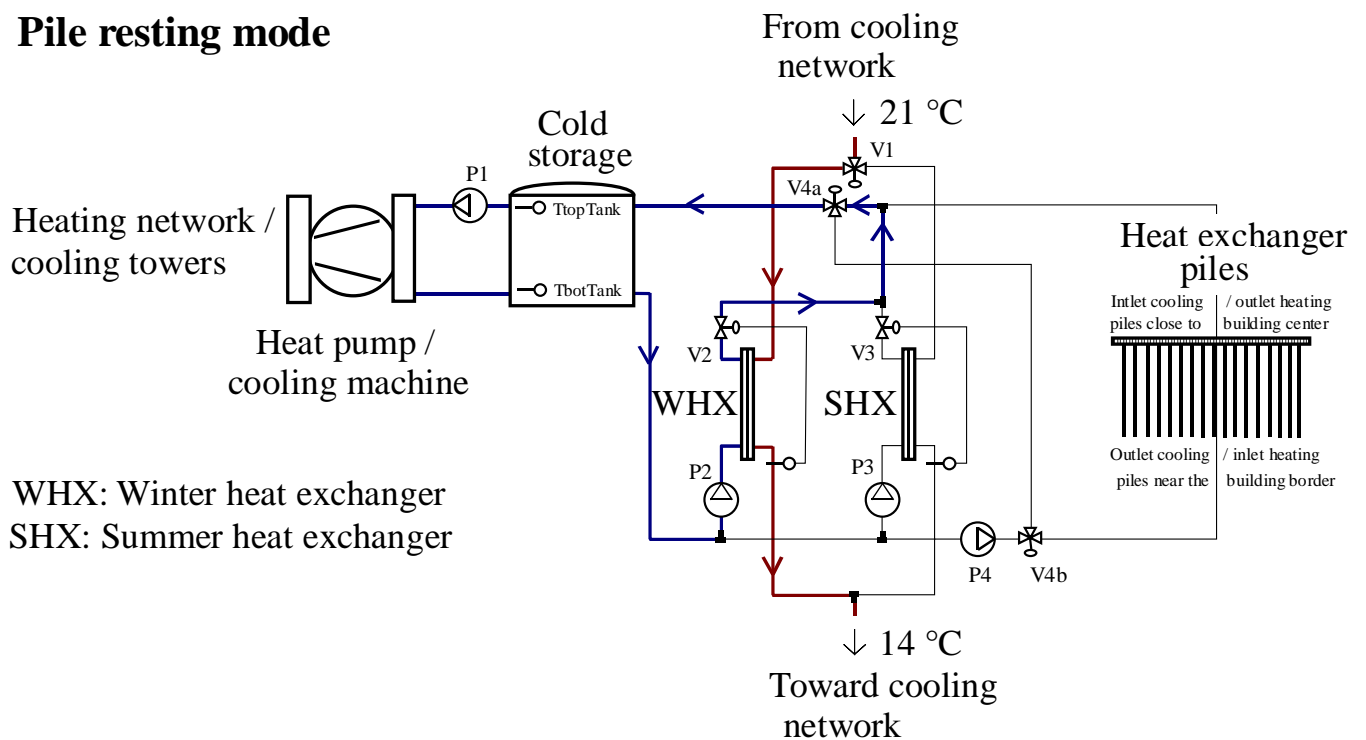


Fig. 5.3 Pile resting mode: the pile pump P4 is stopped and the three-way valves V4a and V4b prevent the fluid from flowing through the piles. The heat pump may operate if there is a heating demand.

During the “pile resting mode”, the cooling machine is not used. If the fluid temperature at the bottom of the cold storage rises, direct cooling with the piles is tried first (the operational mode switches back to the “pile cooling mode”). If there is a heating demand, the heat pump is switched on and the fluid temperature is likely to decrease. Below a given threshold, the “pile heating mode” is switched on. The “pile heating mode” is shown in figure 5.4

Pile heating mode

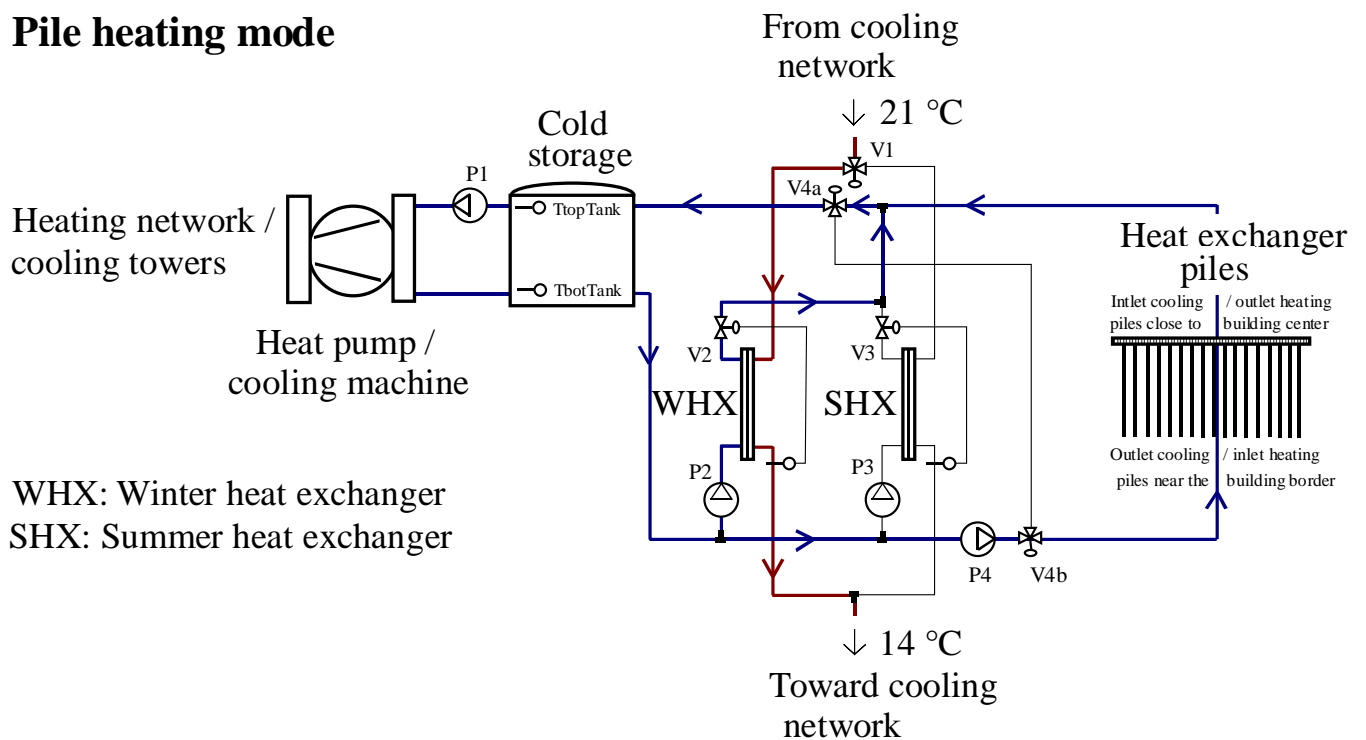


Fig. 5.4 Pile heating mode: the pile pump P4 is switched on and the three-way valve V4a and V4b prevent the fluid from flowing between them.

During the “pile heating mode”, the cooling distribution and the heat exchanger piles are coupled in parallel. They both supply heat to the heat pump evaporator. The power of the heat pump has to be decreased if the fluid temperature drops below 0 °C.

5.3 Main parameters for system simulation

5.3.1 Ground properties

Geological and hydro geological investigation showed that no significant ground water flow is expected. The ground is mainly composed by clay and lake deposit (Jäckli, 1996). The mean effective thermal conductivity of the ground is the most important parameter to be known. It has been determined in situ with two borehole heat exchangers drilled to a depth of 33 m, corresponding to the bottom of the piles. A response test has been performed on each of these boreholes. A conservative value of the ground thermal conductivity has been estimated, based on the uncertainties related to the main factors which determine its value (see Pahud et al., 1998). The main parameters related to the ground are shown in table 5.1.

Parameter	Input value for simulation
Initial ground temperature	10.3 °C
Thermal conductivity of ground	1.8 W/mK
Volumetric thermal capacity of ground	2200 MJ/m ³ K
Darcy velocity of ground water	no regional ground water flow

Table 5.1 Main parameters related to the ground.

5.3.2 Piles properties

The heat exchanger piles have four different diameters. The final number used in the simulation is reduced by 3% to take into account the number of heat exchanger piles that were damaged when they were built. Input parameters for PILESIM can take into account up to 6 different types of heat exchanger piles. For Dock Midfiel they are:

Diameter of pile type 1:	0.9	m
Number of piles for type 1:	60	-
Average active length of piles type 1:	26.2	m
Thermal resistance of pile type 1:	0.06	K/(W/m)
Diameter of pile type 2:	1.2	m
Number of piles for type 2:	18	-
Average active length of piles type 2:	27.2	m
Thermal resistance of pile type 2:	0.06	K/(W/m)
Diameter of pile type 3:	1.3	m
Number of piles for type 3:	49	-
Average active length of piles type 3:	25.8	m
Thermal resistance of pile type 3:	0.06	K/(W/m)
Diameter of pile type 4:	1.5	m
Number of piles for type 4:	179	-
Average active length of piles type 4:	27.2	m
Thermal resistance of pile type 4:	0.06	K/(W/m)

An average spacing between the piles of 9 m is estimated. Average pile properties are calculated with PILESIM. They are shown in table 5.2.

Parameter	Input value for simulation
Total number of heat exchanger piles	306 -
Average active length of the piles	26.8 m
Average pile diameter	1.36 m
Average pile thermal resistance	0.06 K/(W/m)
Ground volume ascribed to the piles	660'000 m ³

Table 5.2 Main parameters related to the heat exchanger piles.

5.3.3 System parameters

System parameters regard the heat pump / cooling machine, system design, building, etc. Some important system characteristics are given in table 5.3.

System characteristic	Value
Annual heating demand	2'720 MWh
Annual cooling demand	1'240 MWh
Design electric power of the heat pump	140 kW
Average performance coefficient (COP)	4.5

Table 5.3 Some characteristics related to the system.

5.4 Thermal performances of the system

A simulation with PILESIM is performed for 10 years in order to take into account long term effects (annual heat extraction not equal to the annual heat injection through the piles, thermal influence of the building). The maximum heating power of the heat pump, assuming a constant performance coefficient of 4.5, is fixed to 630 kW. The power never needs to be reduced to prevent the fluid temperature in the piles from being too low, as the cooling demand is never zero all over the year (input data of the energy demand). As a result, the maximum heat rate extracted on the piles is always decreased by the minimum cooling rate. The annual heat energy extracted from the piles is 1'110 MWh/year, whereas only 400 MWh/year are injected back in the ground through direct cooling. However, the average ground temperature in the pile region is not significantly varying after 10 years of operations, due to the heat losses of the building in the ground, which are estimated to 760 MWh/year when the average temperature of the rooms in contact with the ground is assumed to be 20 °C. In figure 5.5, the diagram shows the annual energy fluxes through the pile system.

GLOBAL SYSTEM HEAT BALANCE

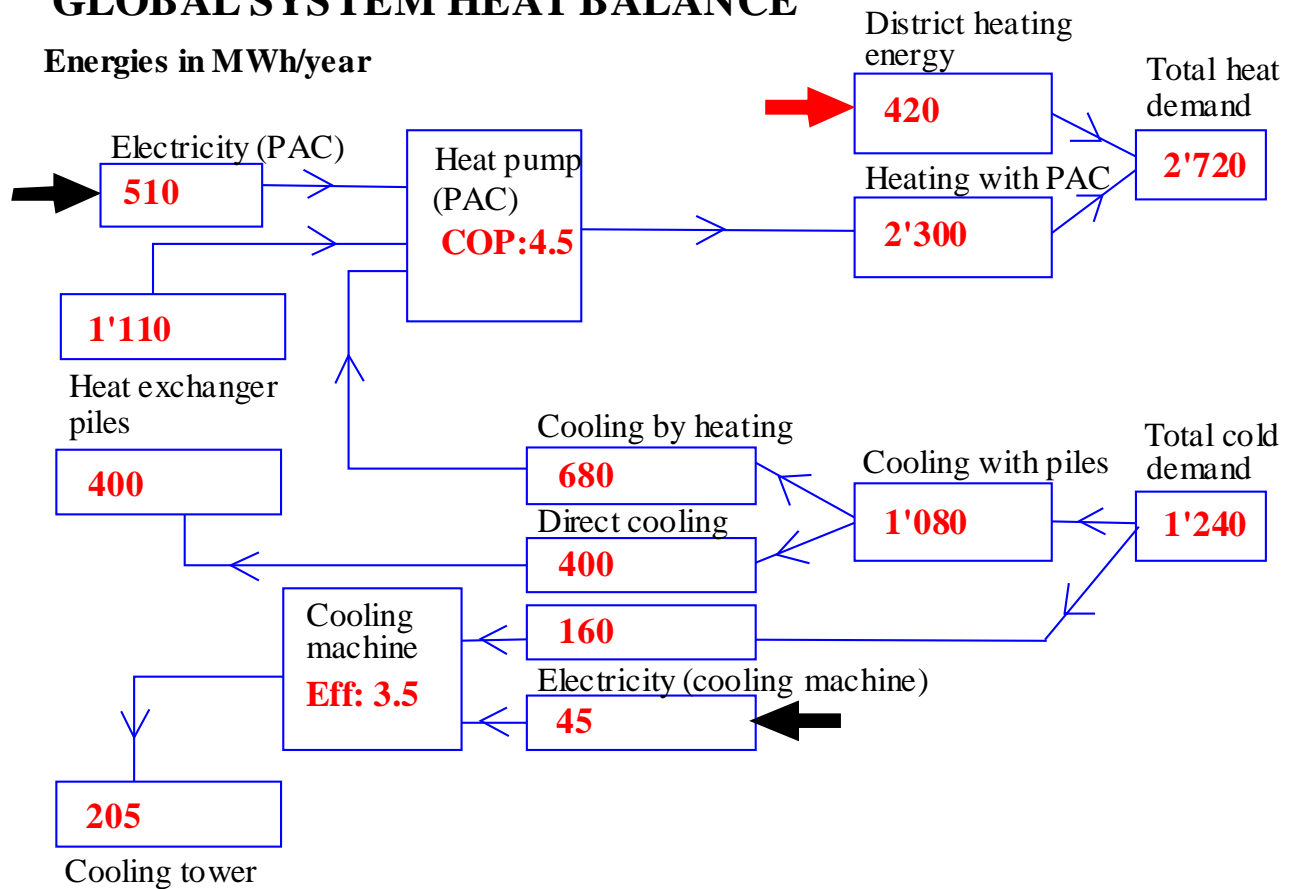


Fig. 5.5 Annual energy fluxes through the pile system, average values for the first 10 years of operation (simulated with PILESIM).

The heat pump connected to the piles covers 85% of the total heat demand. The fraction of the cooling energy demand covered by direct cooling and the cooling energy used for heating purpose represent 87%. The remaining cooling demand has to be covered by the heat pump used as a cooling machine, with a maximum requirement of 330 kW of cooling power for the 10th year of operation.

The total active length of heat exchanger piles is about 8'200 m. The heat rate and annual energies extracted and injected through the piles are, per unit length of heat exchanger piles:

PILESIM simulation:

Heating:	49	W/m	135	kWh/m year
Cooling:	49	W/m	48	kWh/m year

6. RÉFÉRENCES

DIAS (1996) CUEPE IAUG, Université de Genève, Suisse.

DOKUMENTATION D 0136 (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. Serie "Planung, Energie und Gebäude". - Dokumentation D 0136. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Bundesamt für Energiewirtschaft.

FROMENTIN A., PAHUD D., JAQUIER C. & MORATH M. (1997) Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs. Empfehlungen für Energiepfahlsysteme, Rapport final, Office fédéral de l'énergie, Bern, Switzerland.

HELLSTRÖM G. (1991) Ground Heat Storage. Thermal Analyses of Duct Storage Systems. Theory. Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.

JÄCKLI H. (1996) Airport 2000, 5. Baustappe Zurich Flughafen, Dock Midfield, Hydrogeologische Grundlagen für geothermische Nutzung, Dr. Heinrich Jäckli AG, Zürich.

KLEIN S. A. et al. (1998) TRNSYS. A Transient System Simulation Program. Version 14.2. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA.

KOSCHENZ M. and WEBER R. (1998) Thermische Simulationsberechnungen Teil2. EMPA, Abt. Haustechnik, Dübendorf, Switzerland.

LALOU L., MORENI M., STEINMANN G., VULLIET L., FROMENTIN A. and PAHUD D. (1999) Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques. Rapport final de décembre 1999. Office fédéral de l'énergie, Bern, Switzerland.

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 in Lausanne, Switzerland.

PAHUD D., FROMENTIN A. et HUBBUCH M. (1998) Response - Test für die Energiepfahlanlage Dock Midfield, Zürich Flughafen. Messung der Bodenleitfähigkeit in situ. Bundesamt für Energie, Bern, Switzerland.

PAHUD D., FROMENTIN A. et HUBBUCH M. (1999) Heat Exchanger Pile System of the Dock Midfield at the Zürich Airport. Detailed Simulation and Optimisation of the Installation. Final report. Swiss Federal Office of Energy, Switzerland.

RECOMMANDATION SIA V382/2 (1992) Puissance de réfrigération à installer dans le bâtiment. Société suisse des ingénieurs et des architectes. Suisse.

Des rapports de recherche sur des installations avec pieux échangeurs peuvent être consultés et rapatriés depuis le site du LEEE sur internet :

<http://www.lee.dct.supsi.ch/urec.htm>