

COOLTEL'PREP : étude préliminaire du potentiel de rafraîchissement géothermique pour les relais de téléphonie mobile.

Elaboré par

**Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie – CUEPE
Université de Genève**

**Laboratorio Energia Ecologia ed Economia – LEEE
Dipartimento Costruzioni e Territorio – DCT
Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana – SUPSI**

ENERGECO, ingénieur électricien, 1219 Le Lignon – Genève

Sur mandat de

Office fédéral de l'énergie

Septembre 2003, rapport final

Auftraggeber:

Forschungsprogramm Geothermie
Bundesamtes für Energie

Auftragnehmer:

Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie, Université de Genève
Laboratorio Energia Ecologia ed Economia, DCT, SUPSI
Energeco, Le Lignon - Genève

Autoren:

Bernard Lachal, CUEPE –Université de Genève, Carouge
Pierre Hollmuller, CUEPE –Université de Genève, Carouge
Daniel Pahud, SUPSI-DCT / LEEE-UREC, Trevano-Canobbio
Alain Gauman, Energeco, Le Lignon - Genève

Begleitgruppe:

- M. Bernard Matthey, de MASAI-Conseils, Montezillon
- M. Jules Wilhelm, de la SSG (Société Suisse pour la Géothermie)

2003

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes „Geothermie“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • office@bfe.admin.ch • www.admin.ch/bfe

Résumé

Installés par milliers à travers le pays, les relais de téléphonie mobile possèdent une forte densité électronique, pouvant rendre nécessaire un rafraîchissement actif de la cabine qui les abrite. Une série de solutions alternatives, par rafraîchissement géothermique, devrait pouvoir permettre de réduire considérablement cette dépense électrique, sinon de l'éviter.

Conçu comme une étude préliminaire, ce projet vise à délimiter le potentiel de rafraîchissement géothermique pour ces relais de téléphonie mobile, principalement le réseau UMTS, qui est supposé remplacer le réseau GSM actuel. En particulier, il s'agit de :

- Rassembler l'information existante
- Correctement poser le problème dans son contexte
- Esquisser les solutions de rafraîchissement géothermique à explorer
- Evaluer l'opportunité de mener à bien une étude plus approfondie.

Deux points importants ont été relevés par tous les opérateurs contactés:

- Standardisation (pas besoin de réfléchir à chaque nouvelle antenne),
- Flexibilité, du fait de la durée de vie supposée courte des investissements.

Même si ces caractéristiques ne sont *à priori* pas favorables à la géothermie, nous avons étudié les 2 possibilités suivantes:

- Les sondes géothermiques verticales de forte profondeur, utilisées depuis de longues années en Suède pour les "telephone switching exchange",
- Les sondes horizontales disposées dans les fouilles existantes.

On peut tirer de cette étude les conclusions suivantes :

- Malgré l'explosion attendue du nombre de relais antennes pour le nouveau réseau UMTS de la téléphonie mobile, les enjeux énergétiques pour le refroidissement de ces installations sont relativement faibles. Les cabines équipées de climatisation fonctionnent uniquement en conditions extrêmes et sur une courte période. Toutes les informations fournies par les différentes personnes contactées corroborent ce constat.
- Les systèmes à collecteurs horizontaux posés dans les fouilles sont bien adaptés pour maintenir les futures relais antennes UMTS dans des conditions de températures requises (pas plus de 35 °C) : ils devraient se révéler économiquement proches de la solution climatisation, assez flexibles car facilement démontables et propres à une standardisation.
- Les systèmes "suédois" de sondes géothermiques verticales de grande profondeur (150m) sont bien adaptés pour le refroidissement des relais téléphoniques de puissance plus élevée (typiquement 40 kW) et exigeant une température intérieure de 25 °C. Si les conditions du sous-sol sont favorables, ces systèmes devraient se révéler économiquement proches de la solution climatisation et propres à une standardisation.

L'enjeu énergétique de la climatisation des cabines UMTS est modeste et ne justifie pas d'entreprendre une étude approfondie accompagnée d'essais in situ, de mesures et de simulations.

En revanche, les auteurs du rapport et le groupe d'accompagnement proposent que l'on s'approche d'une compagnie téléphonique pour réaliser un ou deux pilotes qui pourraient être instrumentés sommairement.

Abstract

Thousands of mobile telephone relays have been installed throughout Switzerland. Since these relays have a high electronic density, it may become necessary to actively cool the cabins in which they are hosted. A series of alternative solutions based on geothermal cooling could help to avoid, or at least considerably reduce this electricity demand.

Conceived as a preliminary study, this project aims at delimiting the potential of geothermal cooling for mobile telephone relays, in particular for the UMTS technology, which is supposed to replace the actual GSM technology. We will, in particular:

- Gather existing information on the topic.
- Correctly state the problem in its context.
- Outline solutions with geothermal cooling to be further explored.
- Evaluate the opportunity to bring about a more detailed study on the subject.

On the demand side (contacted operators), two main necessities are underlined:

- Standardisation (no necessity to reconsider each antenna/site again).
- Flexibility, because of the assumed short duration of the investments.

Although these characteristics do, à priori, not stand in favour of geothermal cooling, we explored following two solutions :

- Vertical heat exchangers ("boreholes") of important depth, which have been used for several years in Sweden, for "telephone switching exchange".
- Horizontal heat exchangers to be installed in existing trenches.

The following conclusions can be drawn from this study:

- Despite the foreseen explosion of relays to be built within the UMTS network, electric demand for cooling should remain relatively weak. Air conditioning installed in the cabins is turned on only in extreme weather conditions, thus only for a short period. All contacted persons agreed on this point.
- Horizontal heat exchangers to be installed in existing trenches should be well adapted so as to keep future UMTS relays within the required conditions (below 35°C). This solution, which might be economically close to air conditioning, should be flexible because easily disassembled, and proper for standardisation.
- With a depth of 150 m, the "Sweedish" borehole system is well adapted to centres with high cooling demands (typically 40 kW) and submitted to stronger norms (temperature below 25°C). In case of proper soil conditions, this solution should be economically close to air conditioning and be proper for standardisation.

The energetic issue linked to air conditioning of UMTS relays is modest and doesn't justify a large study with in-situ tests, monitoring and simulation.

The authors however propose to enter in contact with a telephone company, so as to realise one or two pilot installations to be monitored summarily.

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Objectifs.....	6
3. Enjeux énergétiques	6
3.1. Introduction.....	6
3.2. Informations fournies par la société Siemens SA	7
3.3. Informations fournies par la société Gram SA.....	7
3.4. Informations fournies par la société Swisscom SA	7
3.5. Informations fournies par Swisscom au Tessin.....	8
3.6. Synthèse	8
4. Refroidissement par sondes géothermiques : l'expérience suédoise et les applications pour la Suisse.....	9
4.1. Etat de la situation.....	9
4.2. Application possible en Suisse d'un système de refroidissement avec sondes.....	9
5. Refroidissement par collecteurs horizontaux disposés dans les fouilles existantes.	13
5.1. Etat de la situation.....	13
5.2. Description du système envisagés et dimensionnement	14
5.3 Résultats et commentaires	24
5.4. Estimation des coûts	24
5.5. Cas de petites unités tolérant 35°C	24
6. Comparaison des différentes solutions	24
7. Conclusions.....	25
8. Bibliographie.....	25
9. Annexe	25

1. Introduction

Les relais de téléphonie mobile, qui s'installent par milliers à travers le pays, possèdent une forte densité électronique et pourraient engendrer de grosses dépenses électriques pour le rafraîchissement. Une série de solutions alternatives, par rafraîchissement géothermique, devrait pouvoir permettre de réduire considérablement cette dépense électrique, sinon de l'éviter.

Ce projet vise à explorer ce potentiel de rafraîchissement géothermique. Conçu comme une étude préliminaire, il vise avant tout à rassembler l'information existante et à correctement poser le problème dans son contexte, afin d'évaluer l'opportunité de mener à bien une étude plus approfondie, qui serait conduite par un groupe interdisciplinaire de chercheurs et ingénieurs spécialisés à la fois dans le rafraîchissement géothermique et dans la maîtrise de l'énergie.

2. Objectifs

Conçu comme une étude préliminaire, ce projet vise à délimiter le potentiel de rafraîchissement géothermique pour relais de téléphonie mobile. En particulier il s'est agi de :

- rassembler l'information existante
- correctement poser le problème dans son contexte
- esquisser les solutions de rafraîchissement géothermique à explorer
- évaluer l'opportunité de mener à bien une étude plus approfondie.

3. Enjeux énergétiques

3.1. Introduction

Actuellement, pour son réseau GSM (Global System Mobile Communication), Swisscom utilise plus de 2'500 relais. Les deux autres opérateurs, DiAx et Orange, ont aussi étoffé leurs infrastructures, de telle sorte que l'on compte sur le territoire suisse plus de 6'000 émetteurs pour la téléphonie mobile dite traditionnelle.

Les promesses des réseaux UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) font rêver: avec une vitesse de transmission de 2 Mbps sur un appareil portable – soit plus de 35 fois la vitesse d'un modem d'ordinateur de bureau et plus de 200 fois celle d'un téléphone mobile, l'UMTS ouvrira la voie à de nouveaux services interactifs comme le visiophone et le Net à haut débit « dans la main ». Prévu pour 2002, le développement de ce réseau révolutionnaire a été reporté de plusieurs années à la suite du ralentissement général observé dans ce secteur.

Pour son développement, il est prévu l'installation d'un réseau similaire à celui du GSM, soit environ 6'000 antennes-relais sur le territoire (soit un total de 12'000 avec le GSM et la densité la plus élevée du monde). (Ref. : www.largeur.com, www.ericsson.fr)

Le développement attendu de ce réseau d'antennes UMTS, qui possèdent une forte densité électronique, pourraient engendrer de grosses dépenses électriques pour le rafraîchissement.

Afin d'obtenir des informations nécessaires à évaluer l'enjeu énergétique représenté par le refroidissement de ces antennes, les sociétés suivantes ont été contactées :

- | | | |
|---------------------------------------|-------------|--------------|
| • Fournisseur de matériel UMTS : | Siemens SA | M. M. Devaud |
| • Constructeur de cabines : | Gram SA | M. Ghiraldi |
| • Opérateur Télécom : | Swisscom SA | M. S. Borsa |
| • Opérateur Swisscom Mobile au Tessin | | M. Regusci |

3.2. Informations fournies par la société Siemens SA

Puissance des stations

Une station de base UMTS ou GMS comprend les équipements suivants :

- émetteurs et équipements de ventilation
- équipement de transmission pour la connexion au réseau fixe
- batteries de secours
- chauffage pour le grand froid
- convertisseurs AC/DC

La puissance installée d'une telle station équipée de 24 émetteurs (7 armoires) est de 11,5 kW, soit :

- 7 armoires à 1 kW = 7 kW, inclus les ventilateurs de 150 W et 190W/armoire
- 7 corps de chauffe (pour l'hiver) d'une puissance de 500 W/armoire (max. 3,5 kW)
- 1 kW, appareils divers

La puissance moyenne d'une station de base est de l'ordre de 4 kW. Il n'est pas nécessaire d'avoir un système de refroidissement par climatisation, les ventilateurs des armoires suffisent.

Développement du réseau UMTS en Suisse

Dans un premier temps, pour une couverture de 20% du réseau il faudra installer environ 1000 stations de base; pour une couverture de 50 %, ce nombre monte à environ 3000 stations de base. Pour une couverture plus élevée, la progression est non linéaire mais plutôt de type exponentiel. Le degré de couverture pour la mise en place du réseau UMTS est déterminé par le DETEC (Département des Transports et des Communications)

Il est invraisemblable à l'heure actuelle que la couverture du réseau UMTS atteigne celle du GSM (investissements très élevés, marché atone, restreint pour les régions rurales, difficultés du relief, etc.).

En Suisse, le marché GSM est détenu à 100% par Ericsson qui est le fournisseur unique de Swisscom.

Historiquement Ascom vendait à Swisscom des centraux Ericsson qui étaient adaptés par ces derniers. Depuis 3 ans Ascom a cédé à Ericsson la vente des centraux et émetteurs GSM à Swisscom.

3.3. Informations fournies par la société Gram SA

La société Gram S.A fabrique depuis plusieurs années des cabines pour les émetteurs de téléphonie mobile et exploite des brevets dans ce domaine. Selon cet interlocuteur, certains équipement seraient refroidis par de la climatisation et d'autres par des ventilateurs. Il n'a pas été possible d'obtenir des informations plus précises concernant les cabines d'équipements GSM et UMTS qui seraient climatisées.

3.4. Informations fournies par la société Swisscom SA

Les armoires UMTS ont une consommation énergétique correspondant à une puissance moyenne de 2 à 4 kW. Les armoires intérieures sont ventilées mécaniquement (puissance du ventilateur de 150 à 190 W). Les armoires extérieures sont ventilées mécaniquement et sont équipées d'une petite climatisation qui fonctionne uniquement en conditions extrêmes (35°C dans l'armoire) et un chauffage est intégré pour des températures hivernales très basses.

La climatisation fonctionne principalement en juillet-août, quelques heures par jour. Le ratio du nombre d'armoires extérieures/intérieures est d'environ 50/50 pour le réseau GSM. Le ratio futur des armoires extérieures/intérieures tendra vers 20/80 pour le réseau UMTS. La puissance installée des équipements des émetteurs UMTS est pratiquement identique à celle du réseau GSM.

3.5. Informations fournies par Swisscom au Tessin.

L'électronique (armoires) des antennes est refroidie par des ventilateurs. Ces gains de chaleurs sont ensuite évacués le plus souvent par un climatiseur. On doit distinguer entre :

- installation indoor (l'électronique associée à l'antenne est dans un bâtiment): le dimensionnement du climatiseur varie beaucoup d'un cas à l'autre.
- installation outdoor (antenne dans la nature) : dans ces installations le climatiseur est souvent intégré à l'électronique. Il est dimensionné pour des conditions extrêmes (standardisation, pas besoin de réfléchir à chaque nouvelle antenne). Un chauffage est également intégré pour des températures hivernales très basses (zones en altitude).

Ericsson fournit le matériel à Swisscom, qui dimensionne ensuite l'installation de refroidissement en fonction de divers paramètres, dont la puissance maximum à dissiper, le taux d'utilisation de l'électronique, l'inertie thermique du local à refroidir, etc.

En fonction de l'électronique utilisée, de sa durée de vie qui est de plus en plus courte, le facteur « flexibilité » est un facteur toujours plus important pour l'installation de refroidissement. Le dimensionnement doit permettre de satisfaire une demande de refroidissement dont la « durée de vie » tend à se raccourcir de plus en plus, d'où la tendance à investir « peu » quitte à payer « plus » durant le fonctionnement. Le temps de retour d'un investissement doit être très court, de l'ordre de quelques années, ce qui est évidemment un obstacle au développement des systèmes avec sondes géothermiques.

3.6. Synthèse

La puissance moyenne électrique par cabine est d'environ 3 kW (entre 2 à 4 kW selon les interlocuteurs) pour une puissance installée de 10 kW. Les 3'000 cabines de relais de téléphonie mobile UMTS nécessaires à la couverture de 50% du territoire représenteront donc une puissance totale de 10 MW environ pour 30 MW installés.

Les cabines équipées de climatisation fonctionnent uniquement en conditions extrêmes (lorsque la température des armoires dépassent 35°C) et sur une courte période (vraisemblablement quelques dizaines à quelques centaines d'heures par année. Les enjeux énergétiques pour le refroidissement de ces installations sont donc relativement faibles. Toutes les informations fournies par les différentes personnes contactées corroborent ce constat.

Enfin, deux points importants ont été relevés par les opérateurs:

- **standardisation** (pas besoin de réfléchir à chaque nouvelle antenne),
- **flexibilité**, du fait de la durée de vie supposée courte des investissements.

Même si ces caractéristiques ne sont *à priori* pas favorables à la géothermie, nous allons étudier 2 possibilités :

- les sondes géothermiques verticales de forte profondeur, utilisées depuis de longues années en Suède pour les "telephone switching exchange", où les puissances thermiques à évacuer sont de l'ordre de 30 à 200 kW et relativement constantes au cours de l'année car destinées à maintenir une température intérieure de 25 °C.
- les sondes horizontales disposées dans les fouilles existantes.

Dans un premier temps, cette pré étude se fera pour une température de local supposée de 25 °C. Suivra une estimation pour des contraintes plus lâches (température des armoires pouvant atteindre 35°C), conditions rencontrées dans les relais UMTS.

4. Refroidissement par sondes géothermiques : l'expérience suédoise et les applications pour la Suisse

4.1. Etat de la situation

En Suède plus d'une trentaine d'installations de refroidissement avec sondes géothermiques ont été réalisées pour refroidir des « telephone switching exchanges ». Les puissances thermiques à évacuer sont importantes (de 30 à plus de 200 kW) et relativement constantes au cours de l'année. Les rejets thermiques sont évacués directement dans l'air extérieur et/ou le terrain (typiquement 100% des charges thermiques dans l'air si la température de l'air extérieur < 12 °C ; 100% dans le terrain si température de l'air extérieur > 18°C et combinaison des deux entre 12 et 18 °C). La température de l'air dans le local est maintenue à 25 °C. Le rapport de Hellström et al. , « Direct Cooling of Telephone Switching Exchanges Using Borehole Heat Exchangers in Different Climates », donne des informations plus précises et permet également de se rendre compte de l'effet du lieu géographique (climat) sur le dimensionnement des sondes géothermiques (cf. annexe 1).

Des systèmes semblables pourraient être appliqués aux « radio stations », qui ont des besoins de refroidissement nettement plus faibles. Pour le moment cette voie n'est pas encore explorée.

4.2. Application possible en Suisse d'un système de refroidissement avec sondes géothermiques

La publication de Hellström (voir annexe) analyse une installation de 40 kW (qui est la puissance thermique moyenne, présente tout au long de l'année, qui doit être évacuée par le système de refroidissement). Cette puissance thermique est évacuée directement dans l'air et/ou dans le terrain, en fonction de la température de l'air extérieur (cf. paragraphe précédent). Il propose le dimensionnement d'un groupe de sondes géothermiques pour divers climats dans le monde. Dans cette section, les résultats de cette analyse sont utilisés pour estimer le coût annuel d'un tel système et le comparer à un système de refroidissement conventionnel.

Les deux climats qui s'approchent le plus de celui de Zurich sont ceux de Birmingham et d'Ankara. Les températures moyennes annuelles de l'air extérieur sont 9.5°C à Birmingham, 11.3°C à Ankara et 9.0 °C à Zurich (Meteonorm, 1999). La figure 4.1 permet de comparer les températures extérieures en valeurs mensuelles de ces trois endroits.

Température air extérieur, moyennes mensuelles

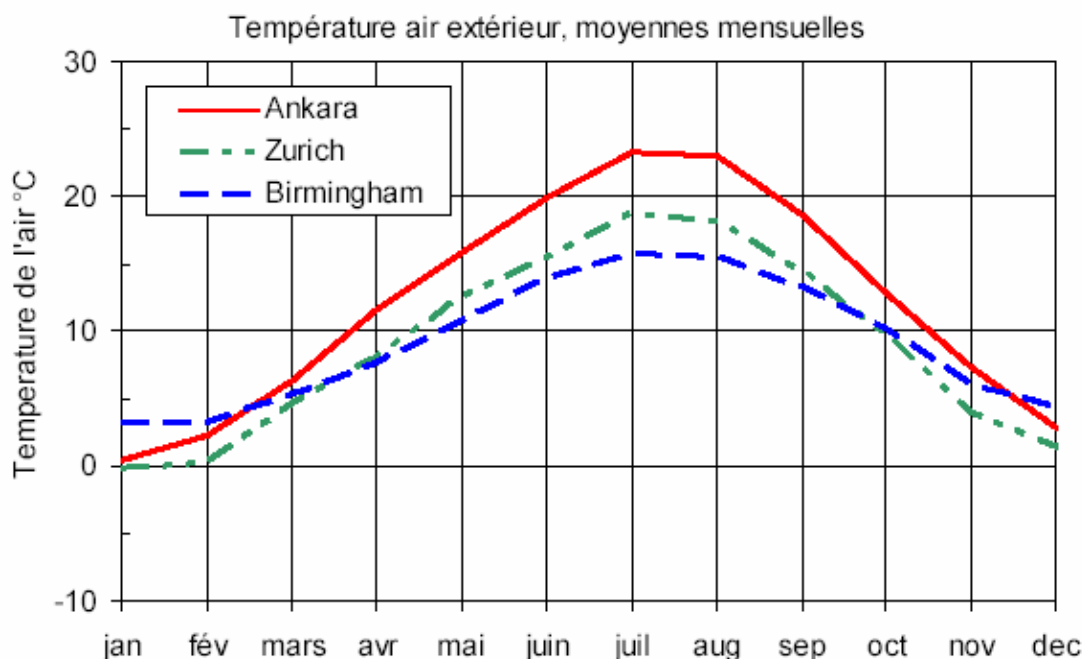


Fig. 4.1 Températures moyennes mensuelles de l'air extérieur à Birmingham, Ankara et Zurich.

La longueur totale des sondes géothermiques d'un système de refroidissement dépend des caractéristiques thermiques du terrain (principalement la conductibilité thermique), de la température naturelle du terrain, du potentiel de refroidissement sur l'air extérieur, de la disposition géométrique des sondes etc. Le système calculé par Hellström se base sur un espacement des sondes de 10 m et une profondeur unitaire des sondes de 150 m. Le nombre de sondes permet de satisfaire une demande de refroidissement constante de 40 kW pendant une dizaine d'année.

Les estimations qui suivent, réalisées à partir des calculs de Hellström, sont établies par kW de rejet thermique à évacuer et la durée d'utilisation du système, sur laquelle les investissements doivent être remboursés, est variée entre 1 et 15 ans¹. Dans le tableau 5.1, la longueur de sonde nécessaire par kW thermique à évacuer est donnée en fonction de la conductibilité thermique du terrain et des deux climats qui se rapprochent le plus à celui de Zurich.

¹ L'écartement entre sondes doit tenir compte de la durée de vie du sondage; les 10m considérés permettent le soutirage nominal la dixième année. Une durée de vie plus courte permet un espacement moindre des sondes, et inversement.

Conductibilité thermique du terrain	2.5 W/mK	3.5 W/mK
Longueur de sonde en double U par kW thermique à évacuer, m/kW		
Birmingham	41 m/(kW)	30 m/(kW)
Ankara	62 m/(kW)	45 m/(kW)

Tableau 4.1 Longueur de sonde nécessaire par kW thermique à évacuer.

On retiendra donc une variante minimum de 30 m/KW et une variante maximum de 60 m/kW. Pour ces deux variantes, l'annuité est calculée en en prenant compte :

- du coût annuel d'une partie de l'investissement du système (la partie sondes géothermiques pour le système couplé au terrain ou la machine frigorifique pour le système conventionnel);
- du coût annuel de l'énergie électrique ;
- et du coût annuel de maintenance.

Les paramètres de calcul sont énumérés dans le tableau 4.2 et sont utilisés pour établir des ordres de grandeurs.

Investissement	
Sondes géothermiques (raccordements horizontaux inclus)	100 Fr.-/m
Machine frigorifique	1'000 Fr.-/(kW)
Energie électrique annuelle	
Système avec sondes géothermiques	750 (kWh/a)/(kW) ^(*)
Système avec machine frigorifique	3'750 (kWh/a)/(kW) ^(*)
Entretien	
Système avec sondes géothermiques	40 (Fr.-/a)/(kW) ^(*)
Système avec machine frigorifique	150 (Fr.-/a)/(kW) ^(*)

^(*) Valeur tirée de la publication de Hellström

Tableau 4.2 Paramètres utilisés pour calculer les ordres de grandeur des coûts annuels.

Dans les graphiques 4.2 à 4.4, le coût annuel est présenté en fonction de la durée d'utilisation du système. Les investissements doivent être remboursés sur cette durée. Le coût annuel de l'investissement est calculé avec la méthode de l'annuité. Un taux d'intérêt de 5% est supposé, ce qui donne un facteur d'annuité de 10% pour un amortissement en 15 ans, et de 20% pour un amortissement en 6 ans. Les trois graphiques permettent de comparer un système avec sondes géothermiques relativement à un système conventionnel pour des coûts différents de l'énergie électrique (15, 20 et 25 ct./kWh). A noter que la puissance électrique de pointe du système avec sondes géothermiques est 5 fois plus faible que celle du système conventionnel.

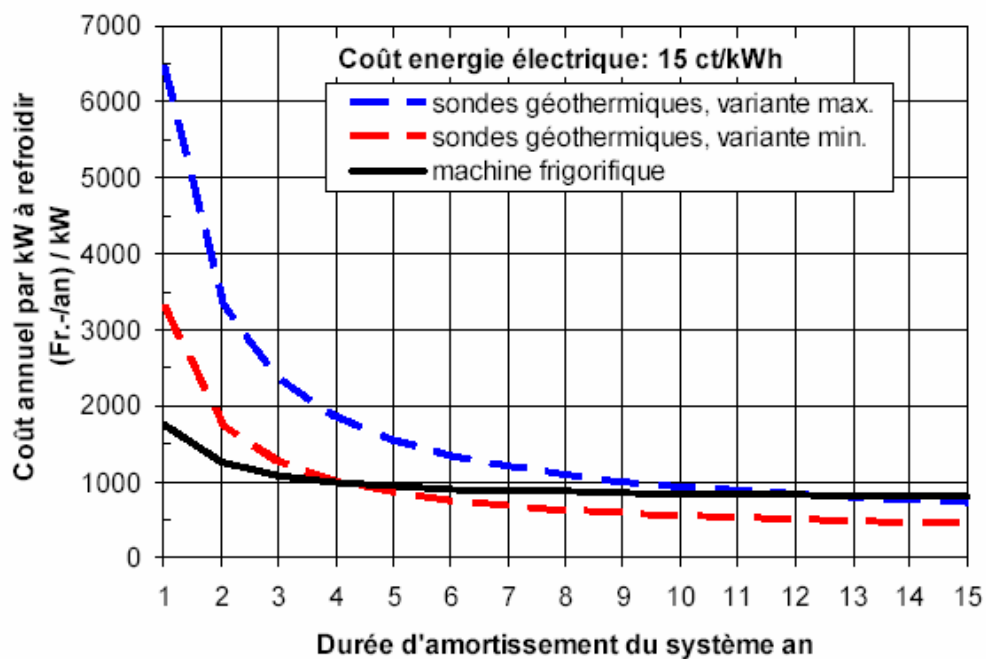


Fig. 4.2 Coût annuel par kW à refroidir en fonction de la durée d'amortissement du système. Le coût de l'énergie électrique est fixé à 15 ct./kWh et le taux d'intérêt à 5%.

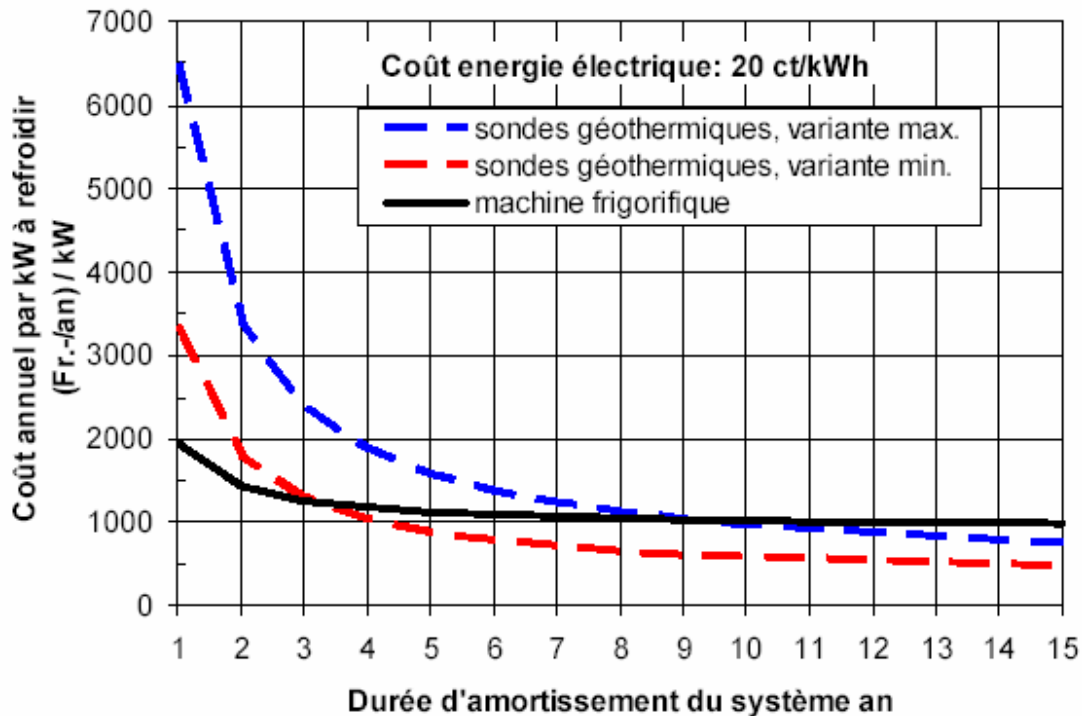


Fig. 4.3 Coût annuel par kW à refroidir en fonction de la durée d'amortissement du système. Le coût de l'énergie électrique est fixé à 20 ct./kWh et le taux d'intérêt à 5%.

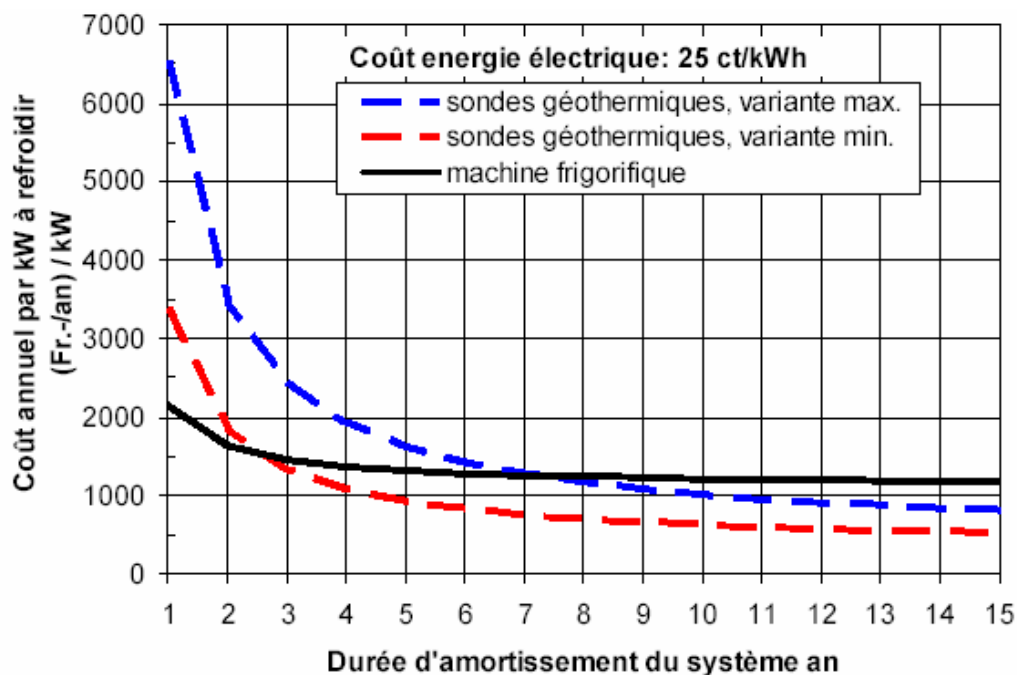


Fig. 4.4 Coût annuel par kW à refroidir en fonction de la durée d'amortissement du système. Le coût de l'énergie électrique est fixé à 25 ct./kWh et le taux d'intérêt à 5%.

Comme attendu et contrairement au système avec sondes géothermiques, le coût annuel d'un système conventionnel dépend principalement du prix de l'énergie électrique et de la maintenance, et relativement peu de l'investissement. Le coût annuel du système conventionnel est donc relativement peu sensible à la durée d'amortissement du système.

Les graphiques des figures 4.2 à 4.4 permettent d'estimer à partir de combien d'années d'utilisation un système avec sondes géothermiques devient économiquement plus avantageux qu'un système conventionnel. Ils indiquent que la plage de variation de la durée minimum d'utilisation du système géothermique est importante, et, dans nos estimations, varie entre 2 et 12 ans, en fonctions de la géologie locale, des conditions climatiques locales et du prix de l'énergie électrique pratiqué localement.

5. Refroidissement par collecteurs horizontaux disposés dans les fouilles existantes.

5.1. Etat de la situation

Il s'agit d'un concept non encore expérimenté pour ce type d'applications - à notre connaissance. Il consiste à utiliser les fouilles nécessaires à l'installation des relais (pose des divers câbles) pour placer des collecteurs à eau et utiliser la fraîcheur du sous-sol pour climatiser les relais. Des études aussi bien théoriques qu'expérimentales ont été développées sur ces systèmes au Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de l'Energie (Cuepe) pour le rafraîchissement des bâtiments. Si le principe est proche que celui utilisé dans les sondes géothermiques verticales de grande profondeur développé dans le chapitre précédent, 2 différences importantes existent :

- au niveau technique, la proximité de la surface du sol induit un faible amortissement des variations annuelles, donc des températures de travail plus élevées en été

- au niveau économique, l'utilisation de la fouille existante permet de baisser le coût spécifique (par mètre de collecteur) de telles installations.

Le problème est d'estimer si le dimensionnement plus généreux des collecteurs peut être compensé par le coût spécifique plus bas.

5.2. Description du système envisagés et dimensionnement

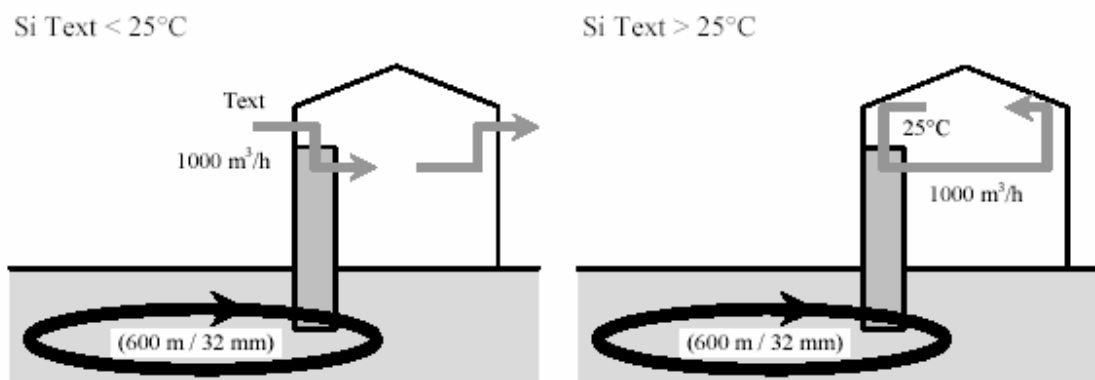
Il s'agit de placer dans la fouille effectuée pour les câbles une boucle de collecteur à eau. Dans la cabine, un échangeur de chaleur air/eau (type aéroconvecteur) permet le transfert de la chaleur depuis l'intérieur de la cabine à refroidir vers l'eau qui circule en faible profondeur.

Le dimensionnement est le suivant (voir P. Hollmuller et B. Lachal, 2003) :

- cabine maintenue à 25°C grâce au système,
- débit d'air : 1000 m³/h,
- échangeur de chaleur (aéroconvecteur) d'efficacité 80% ou 60%,
- débit d'eau : 600 l/h,
- tube en PE, 28/32 mm, longueur : 600m (2 fois 300m),
- profondeur des tubes : 50 ou 100 cm
- écartement : 40 cm,

contact thermique collecteur/terrain de qualité correcte ($h = 5 \text{ W/K mlin.}$),

- nature du sol, 3 types :
- ombragé, absorption solaire de 0%,
- ensoleillé mais humide (prairie), absorption solaire de 50%,
- ensoleillé mais sec (route, minéral,...), absorption solaire de 90%,
- propriété du sous-sol :
- capacité thermique : 2.2 MJ/K.m³,
- conductibilité : 1.8 W/K.m
- Le principe de régulation (cf. schéma) est le suivant : si la température de l'air extérieur est inférieure à 25°C (température supposée de la cabine), on prend l'air de l'extérieur pour l'entrée de l'échangeur (fonctionnement nocturne pour alimentation en frais du sous-sol); si la température de l'air extérieur est supérieure à 25°C, l'air est confiné dans la cabine.



Les conditions limites des 8 simulations ont été les suivantes :

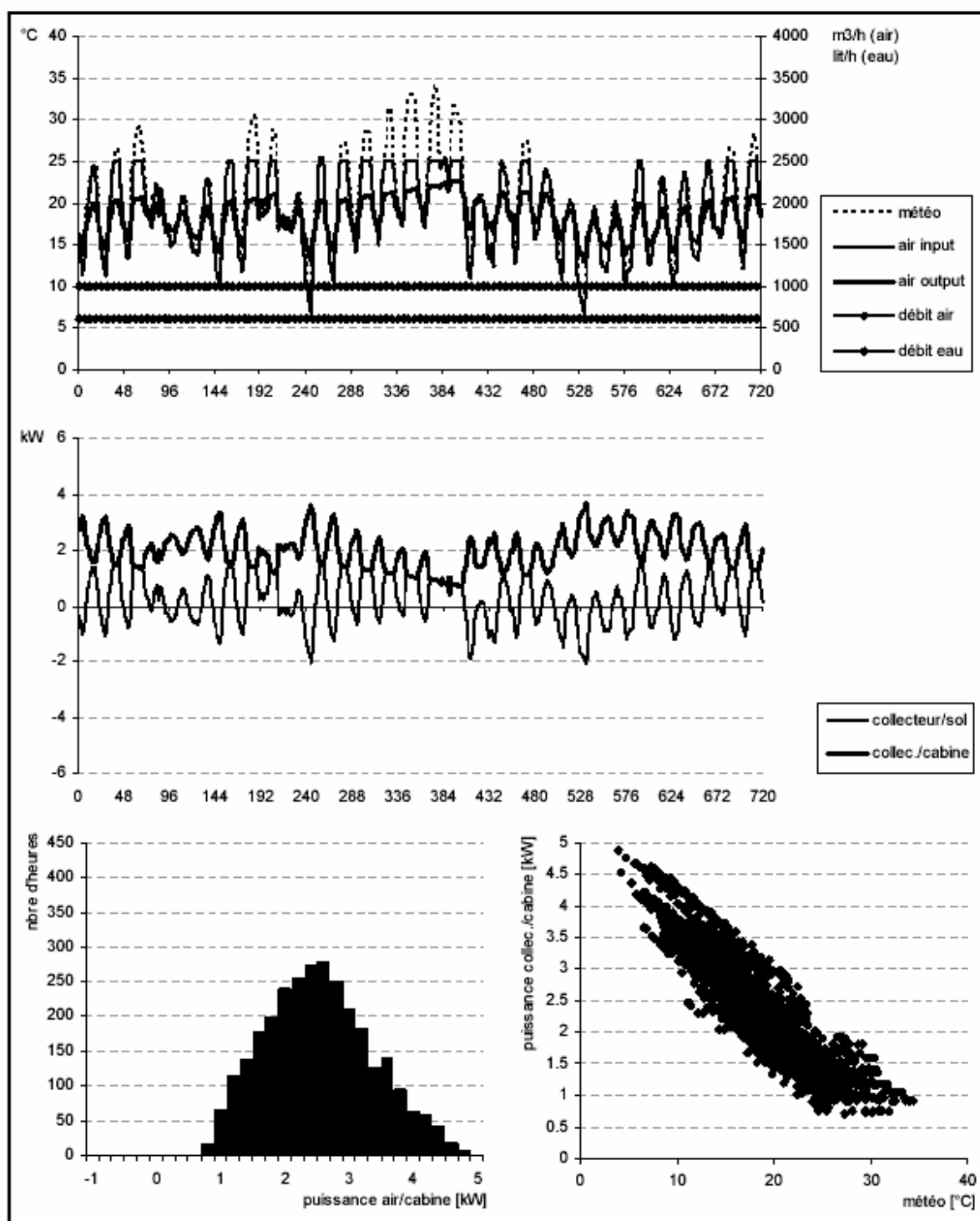
condition de sol	Profondeur cm	Efficacité échangeur
ombragé	50	60%
ombragé	100	60%
ombragé	50	80%
ombragé	100	80%
Ensoleillé, végétation	50	80%
Ensoleillé, végétation	100	80%
Ensoleillé, minéral/route	50	80%
Ensoleillé, minéral/route	100	80%

Les 8 pages suivantes donnent les résultats des simulations numériques, effectuées grâce aux logiciels développés par le Cuepe et fonctionnant sous environnement TRNSYS (P. Hollmuller et B. Lachal, 2003). La période de la simulation est de 2 ans (un an de mise en condition) et les résultats seront donnés pour la période la plus chaude : 15 juillet – 15 août.

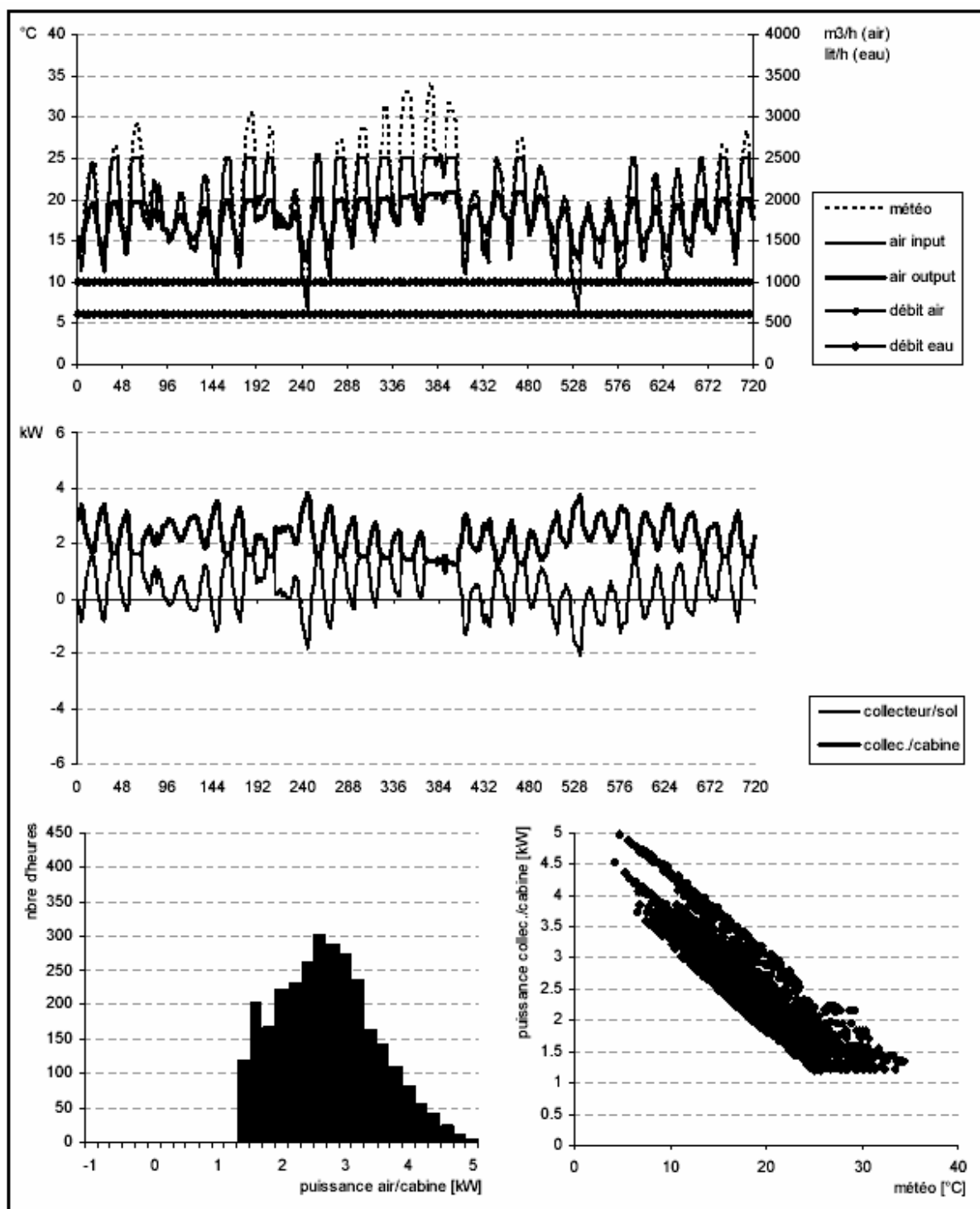
Le graphique supérieur donne les températures de l'air extérieur, de l'air entrant dans l'échangeur et de l'air en ressortant. Les débits d'eau et d'air sont indiqués.

Le graphique du milieu montre les puissances échangées (un signe positif correspond à un refroidissement du fluide entrant) soit au niveau du sous-sol (en gris collecteur/sol), soit au niveau du bilan de la cabine (en noir, collec./cabine). Dans ce dernier cas, il s'agit de la prestation de froid donnée par le système à la cabine (on considère la différence de température entre l'air sortant de l'aéroconvecteur et air de la cabine à 25°C).

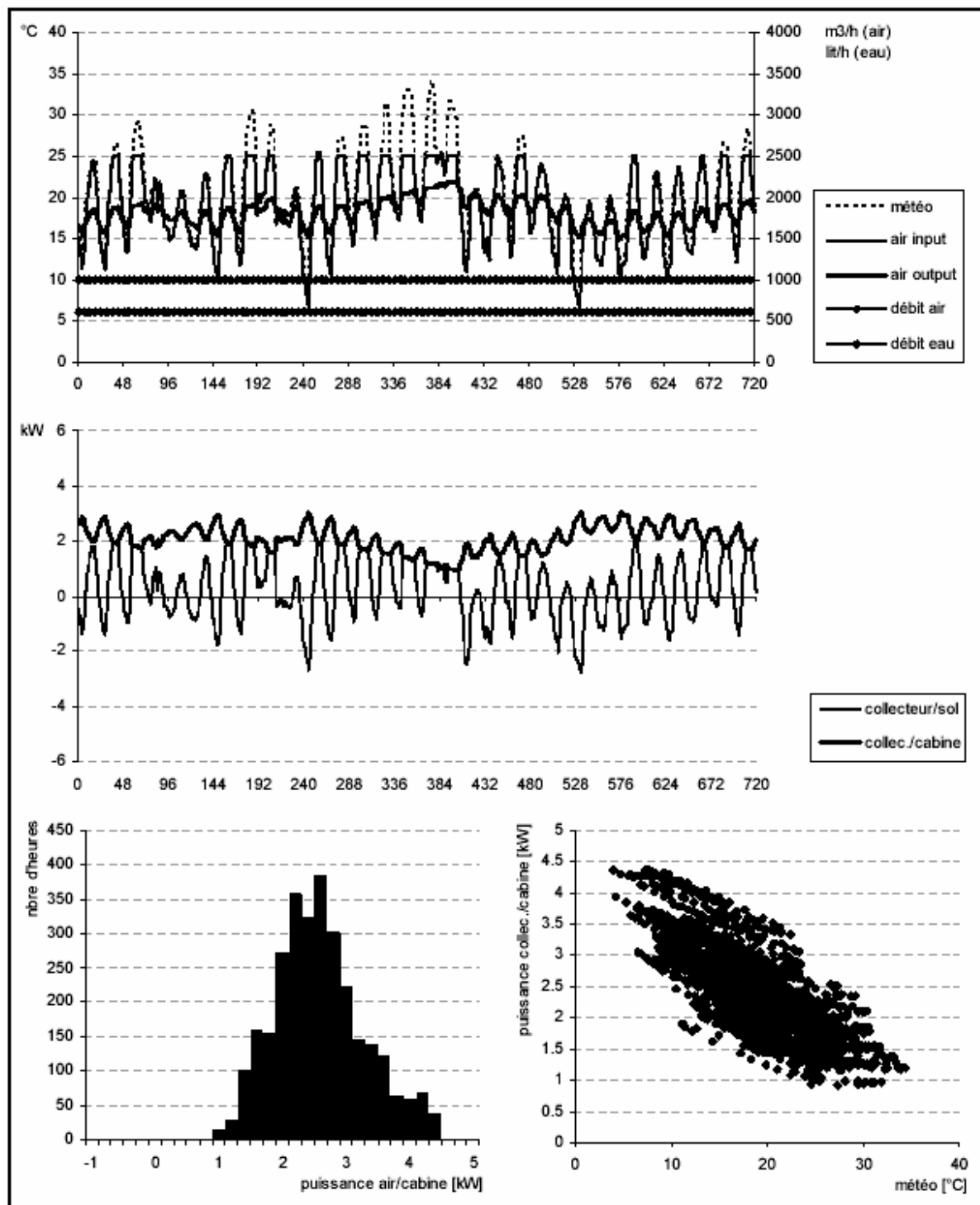
Dans les graphiques inférieurs, cette dernière prestation de puissance de froid est reprise d'abord sous forme d'histogramme, puis en fonction de la température extérieure.



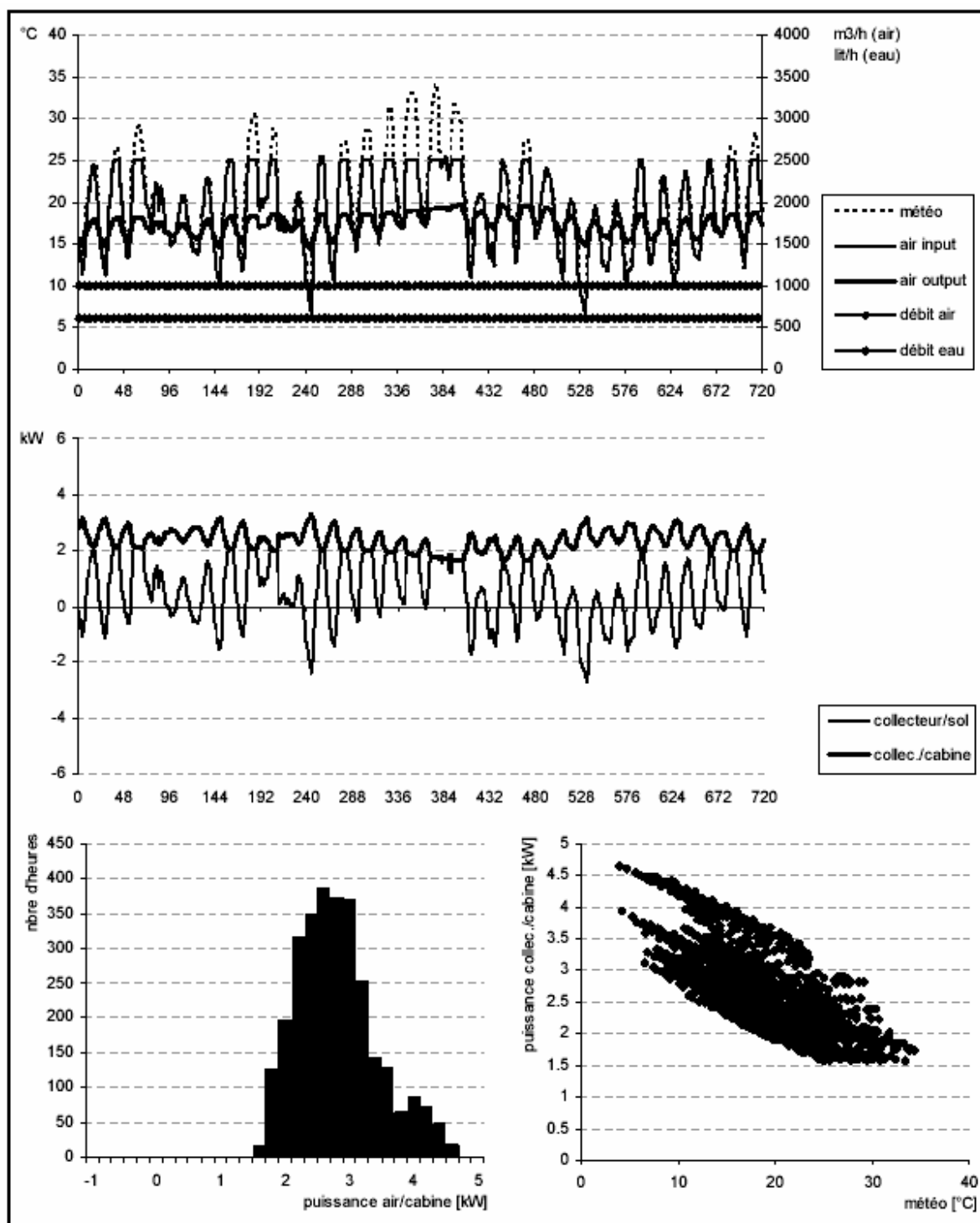
Simulation 1 : Sol : ombragé, profondeur : 50 cm, éch. air/eau : 60%. Points horaires du 15 juillet au 15 août.



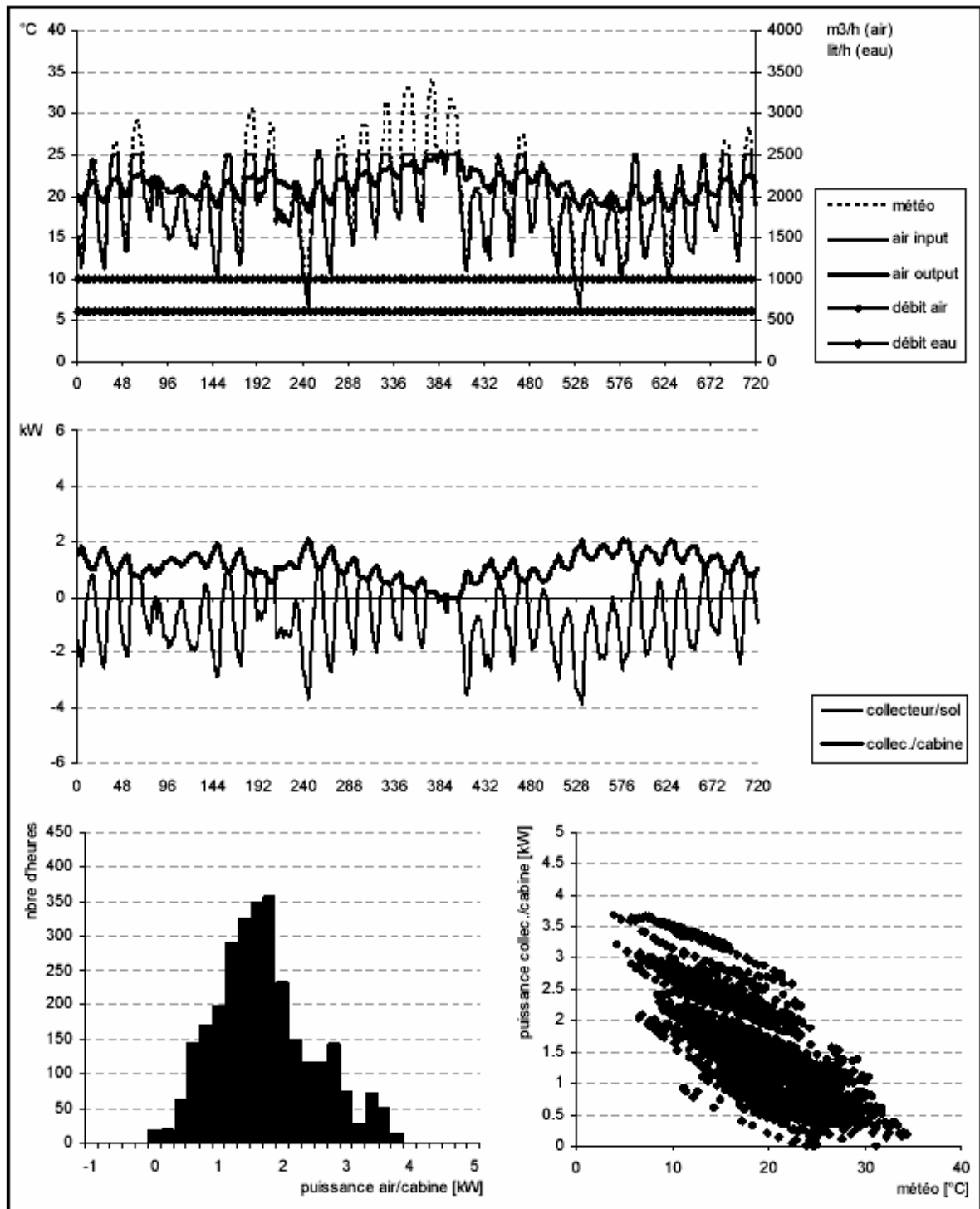
Simulation 2 : Sol : ombragé, profondeur : 100 cm, éch. air/eau : 60%. Points horaires du 15 juillet au 15 août.



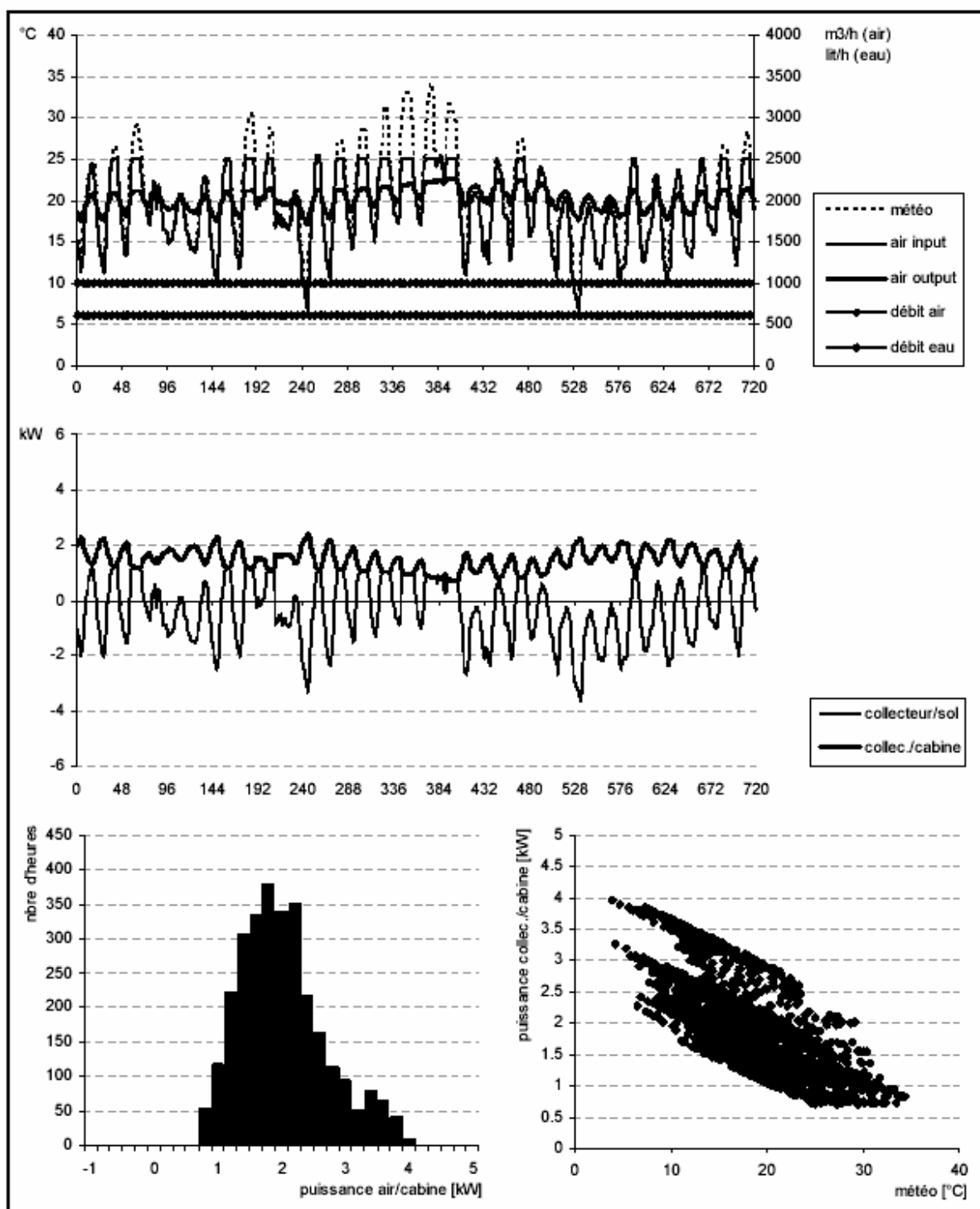
Simulation 3 : Sol : ombragé, profondeur : 50 cm, éch. air/eau : 80%. Points horaires du 15 juillet au 15 août.



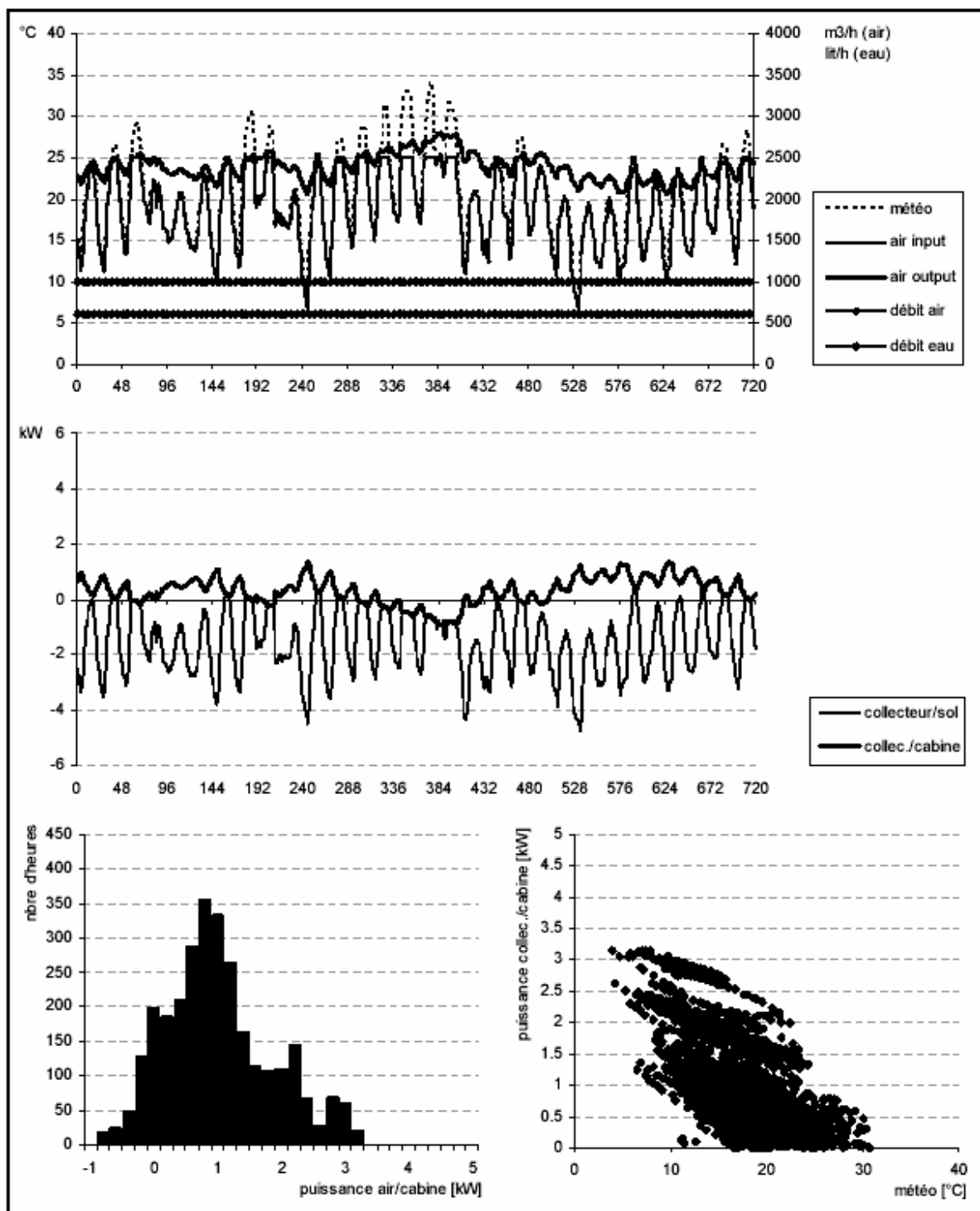
Simulation 4 : Sol : ombragé, profondeur : 100 cm, éch. air/eau : 80%. Points horaires du 15 juillet au 15 août.



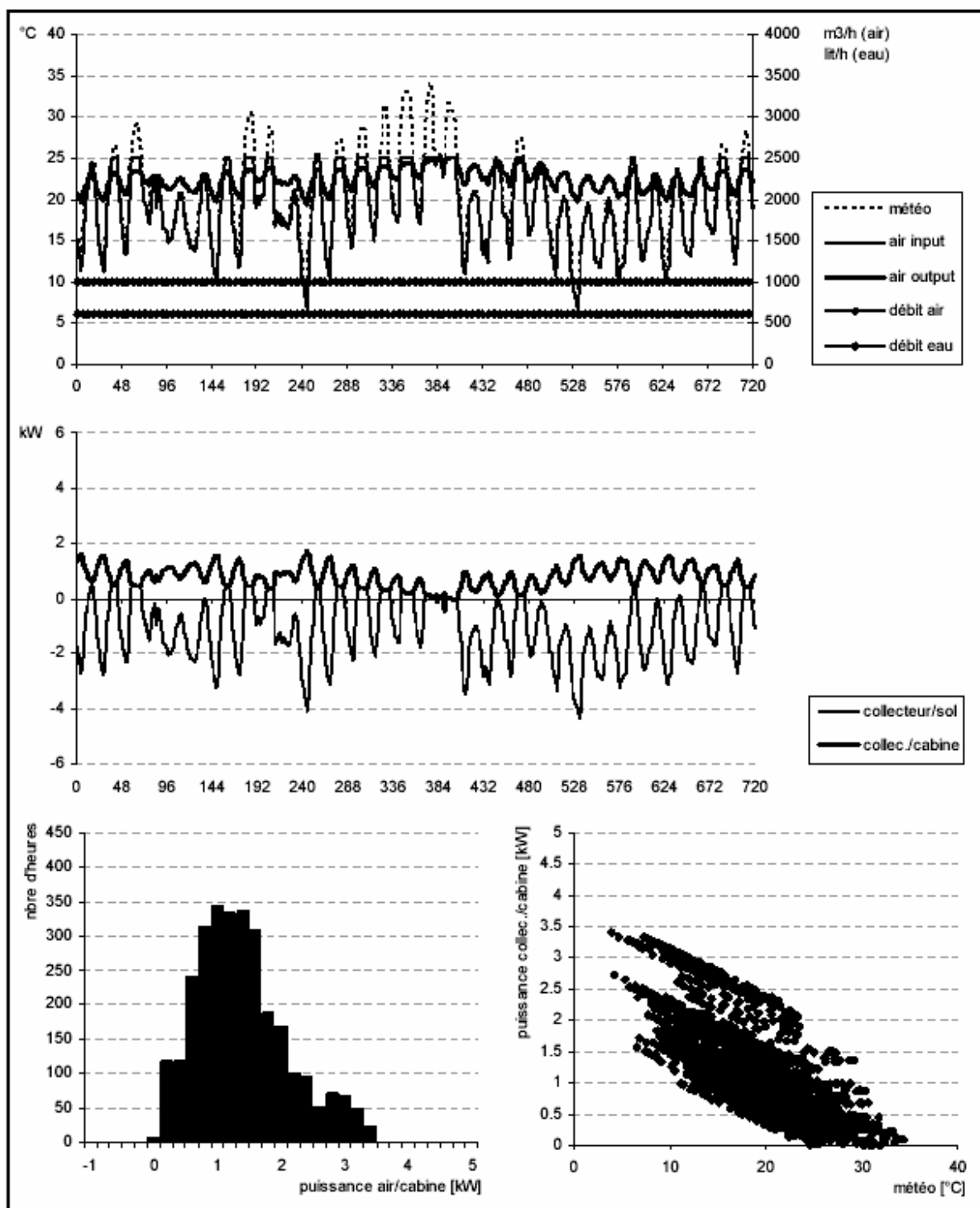
Simulation 5 : Sol : ensoleillé humide, profondeur : 50 cm, éch. air/eau : 80%. Points horaires du 15 juillet au 15 août.



Simulation 6 : Sol : ensoleillé humide, profondeur : 100 cm, éch. air/eau : 80%. Points horaires du 15 juillet au 15 août.



Simulation 7: Sol : ensoleillé sec, profondeur : 50 cm, éch. air/eau : 80%. Points horaires du 15 juillet au 15 août



Simulation :8: Sol : ensoleillé sec, profondeur : 100 cm, éch. air/eau : 80%. Points horaires du 15 juillet au 15 août

5.3 Résultats et commentaires

La première remarque concerne la très grande sensibilité aux conditions du sol : il est exclu d'installer un tel système sous une route ou en condition de surface sèche. En condition dégagée mais humide (végétation), une profondeur de 1 m est indispensable et aboutit à une puissance de froid pour la cabine en période critique de 0.6 kW pour les 600m de collecteurs (pour une température de cabine de 25°C). En condition ombragée, cette même puissance varie entre 1 et 1.5 kW pour les 600 m de collecteurs, selon la profondeur et la qualité de l'échangeur.

Ainsi, pour évacuer les 3 kW² d'une cabine type UMTS supposée se maintenir à 25 °C, il faudrait environ 1500 m de collecteur. Cette longueur (750m aller et 750m retour), en tenant compte d'un débit de 1500 l/h et d'un diamètre de 28 mm, résulterait en une perte de charge excessive de 300 kPa (puissance de la pompe : environ 1.5 kW !). Un diamètre de 40 mm permettrait de réduire la longueur à environ 1000m et aboutirait à une perte de charge acceptable de 50 kPa environ.

Pour des puissances à évacuer plus importantes, du type de celle des « telephones switching exchange », le dimensionnement devient prohibitif (20 km de tubes pour 40kW à extraire).

5.4. Estimation des coûts

Pour une température intérieure maintenue à 25°C, le coût du collecteur (pose comprise) a été estimée à 7 Fr/ml, soit 10'000 Fr au total et la partie aéraulique à 5'000 Fr (coûts donnés par Monsieur C. Jolliet, Ecoconfort, 1028 Préverenges, voir P. Hollmuller et B. Lachal, 2003). L'ensemble reviendra donc à 15'000 Fr. Ceci correspond à un investissement supérieur à celui nécessaire à la pose d'une climatisation.

5.5. Cas de petites unités tolérant 35°C

Nous avons finalement simulé un système qui tolérerait 35 °C plutôt que 25 °C dans la meilleure situation : sol ombragé, profondeur 100 cm, échangeur eau/air d'efficacité 80%. La puissance encore disponible pour les heures les plus chaudes est de 3.5 kW pour les 600 m de longueur ; une taille de 500m (250 aller et 250m retour) est alors suffisante pour un débit d'eau de 500l/h (pertes de charge pour un diamètre de 28mm :

20 kPa).

L'investissement (environ 8'000 Fr) se rapproche de celui nécessaire à la pose d'un appareil de climatisation. Les coûts de fonctionnement seront réduits. Concernant la standardisation, elle serait tout à fait possible car le seul critère de décision serait la non-construction si la couverture du sol située au dessus des collecteurs est "sèche" (route, chemin,...).

6. Comparaison des différentes solutions

Nous considérerons deux cas :

1. Le cas des relais de téléphonie mobile UMTS, de puissance à extraire limitée (3kW) et acceptant des températures intérieures jusqu'à 35°C. Dans ce cas, les collecteurs géothermiques horizontaux placés dans les fouilles sont des systèmes bien adaptés, économes en énergie et dont les coûts sont proches de ceux d'une climatisation. Les sondes verticales de grande profondeur sont mal adaptées à ces circonstances.

² Les apports autres (en particulier le soleil) sont supposés faibles du fait de la petite taille des cabines et de l'absence de fenêtres ; de plus, ils parviendront à l'intérieur de la cabine par diffusion et seront donc bien étalés dans le temps.

2. Le cas des relais téléphoniques de puissance plus élevée (typiquement 40 kW) et exigeant une température intérieure de 25 °C. Dans ce cas, les sondes verticales à grande profondeur peuvent être une alternative intéressante à la climatisation. Les sondes horizontales proches du sol ne sont plus adaptées à ces grandes puissances.

7. Conclusions

On peut tirer de cette étude les conclusions suivantes :

- Malgré l'explosion attendue du nombre de relais antennes pour le nouveau réseau UMTS de la téléphonie mobile, les enjeux énergétiques pour le refroidissement de ces installations sont relativement faibles. Les cabines équipées de climatisation fonctionnent uniquement en conditions extrêmes et sur une courte période. Toutes les informations fournies par les différentes personnes contactées corroborent ce constat.
- Les deux points suivants ont été relevés par tous les opérateurs:
- **standardisation** (pas besoin de réfléchir à chaque nouvelle antenne),
- **flexibilité**, du fait de la durée de retour sur investissement supposée courte.
- Les systèmes à collecteurs horizontaux posés dans les fouilles sont bien adaptés pour maintenir les futures relais antennes UMTS dans des conditions de températures requises (pas plus de 35 °C) : ils devraient se révéler économiquement proches de la solution climatisation, assez flexibles car facilement démontables et propres à une standardisation.
- Les systèmes "suédois" de sondes géothermiques verticales de grande profondeur (150m) sont bien adaptés pour le refroidissement des relais téléphoniques de puissance plus élevée (typiquement 40 kW) et exigeant une température intérieure de 25 °C. Si les conditions du sous-sol sont favorables, ces systèmes devraient se révéler économiquement proches de la solution climatisation et propres à une standardisation.

L'enjeu énergétique de la climatisation des cabines UMTS est modeste et ne justifie pas d'entreprendre une étude approfondie accompagnée d'essais in situ, de mesures et de simulations.

En revanche, les auteurs du rapport et le groupe d'accompagnement proposent que l'on s'approche d'une compagnie téléphonique pour réaliser un ou deux pilotes qui pourraient être instrumentés sommairement.

8. Bibliographie

G. Hellström, S. Enlund et H. Paksoy, « Direct cooling of telephone switching exchanges using borehole heat exchangers in different climates », voir annexe.

www.largeur.com/expArt.asp?artID=362, consulté le 15/04/2003.

www.ericsson.fr/nlle_technos/umts.php , consulté le 15/04/2003.

P. Hollmuller, B. Lachal, "COSTEAU", Rapport de recherche du Cuepe n°3, juillet 2003.

9. Annexe

Article de Hellström

Direct Cooling of Telephone Switching Exchanges Using Borehole Heat Exchangers in Different Climates

by Göran Hellström ¹, Svante Enlund ², *Halime Paksoy ³

¹ Div. of Mathematical Physics, Lund University, P.O.Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden, fax +46+46-2224416, e-mail: goran.hellstrom@matfys.lth.se

² Telia Network Services, SE-123 86 Farsta, Sweden, fax +46-8-6045222, e-mail: svante.p.enlund@telia.se

³ Dept. of Chemistry, Faculty of Arts and Science, Cukurova University, 01330 Adana, Turkey, fax +90-322 338 6070, e-mail: hopaksoy@mail.cu.edu.tr

KEY-WORDS

telephone, exchange , free cooling, borehole heat exchanger, ground-coupled

Abstract

Cooling systems for telephone switching exchanges that combine the availability of cold air with the use of the ground as a cold source have become popular in Sweden. The ground cooling unit uses a number of vertical or graded boreholes in ground. The main advantages of these systems are: no conventional cooling machines needed, the consumption of electric power is very low, even at high air temperatures, high reliability and very low maintenance costs. More than 30 large installations of this kind are currently in operation. This paper presents a feasibility study on the expected performance of such systems in different climates and geological conditions.

Introduction

Telephone switching exchanges have a relatively constant cooling load throughout the year. Transmission losses (or gains) through the building envelop are small in comparison and there are usually small demands for fresh air ventilation.

The main components of the system are:

- Ambient cooling unit. See figure 1. Warm air beneath the ceiling is passed through a highly efficient cooling coil and distributed as a laminar air flow at the floor level.
- Outdoor recooling unit.
- Ground cooling unit using borehole heat exchangers.
- Factory-assembled system control unit

There are two circulation loops: the main loop connects the ambient cooling unit with the ground cooling unit and the second loop with a recooling unit connects to the main loop via a heat exchanger. The main loop uses water as heat carrier fluid, whereas the second loop uses a glycole mixture. Electric energy is consumed by a circulation pump in the recooling loop, a circulation pump in the main loop, and fans in the recooling unit and the ambient cooling unit.

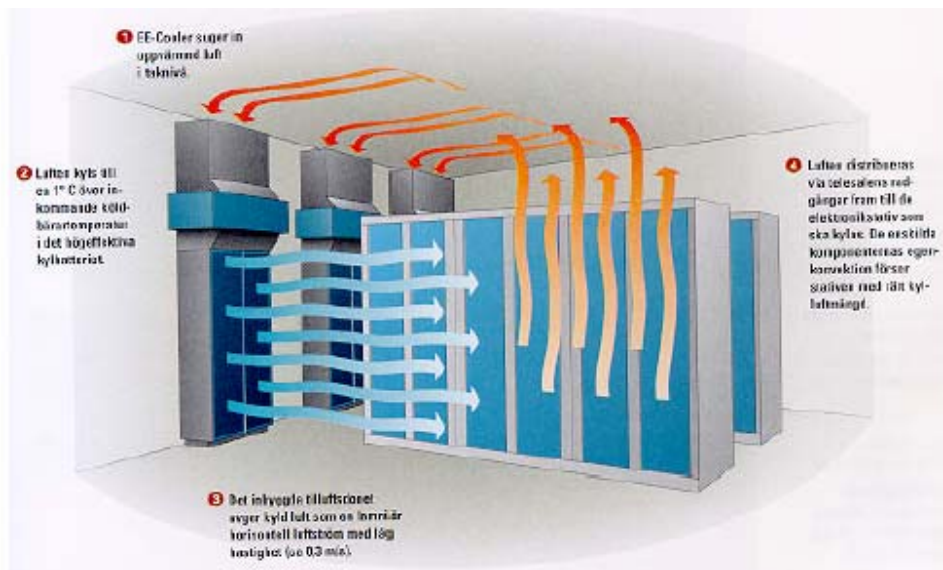


Figure 1. Diagram showing the operation of Telia's ambient cooling system in a telephone exchange switch room.

The cooling demand is supplied by the recooling unit when sufficiently cold air is available. Above a certain temperature the air cannot provide enough cooling and the remaining part has to be covered by the ground cooling unit. The capacity of the recooling unit decreases with increasing temperature and at a specified temperature the unit is shut off. The demand is then completely supplied by the ground cooling unit. The part of the demand covered by the recooling unit or the ground cooling unit depends only on the air temperature and can therefore be estimated from climate data.

The ground cooling unit is designed to deliver a maximum outlet temperature below 20 °C for ten successive years. The number of boreholes and the total borehole length depend primarily on the ground cooling demand, the ground thermal conductivity, the initial undisturbed ground temperature, the borehole thermal resistance and the borehole spacing. The total borehole length is strongly dependent on the initial ground temperature. However, the ground can be "conditioned" by recharge of cold during periods when there is no ground cooling demand and when the air is colder than the ground surrounding the boreholes. The recharging will decrease the total borehole length, but it also increases the total primary energy required to achieve a certain cooling capacity. Thus, the advantage of using recharging depends on the sitespecific balance of drilling cost versus the primary energy cost.

In Sweden, there are currently more than 30 large installations of this kind in operation. Telia's installations for telephone switching exchanges using both air and ground for cooling are summarized in Table 1. There are also three installations where a cooling load of about 30 kW is continuously rejected to the ground. The company Teracom has eight similar installations (70-100 kW) for television transmission stations. The largest ground cooling unit for telecommunication equipment is used in Malmö, where 80 boreholes drilled to a depth of 190 m in limestone provides 370 kW cooling capacity. The ground is recharged with cold from recooling units during the winter. The experiences from these installations have proven the technical reliability of this cooling technique, which is now used in about

twenty of Telia's 200 telephone switching exchanges of this size. A preliminary estimate reveals that the maintenance cost for conventional system using cooling machines is about 30,000 SEK/year, whereas the air and ground cooling technique only needs about 8,000 SEK/year (this maintenance cost includes routine service of equipment, repairs, permit issues, etc., for a 40 kW unit).

Table 1. Telia's installations with both air and ground cooling units.

Site	Number of bores	Total length (m)	Max. cooling (kW)
Stockholm	30	5100	220
Aspudden	26	4160	150
Hageby	17	2720	111
Hässleholm	19	3135	105
Kalmar	14	2520	85
Sundbyberg	14	2170	83,3
Hässelby	16	1920	70
Ludvika	5	750	55
Karlskrona	12	1980	55
Linköping	7	1120	45,5
Tumba	6	960	45
Ulriksdal	7	1120	42
Växsjö	6	930	35
Borlänge	5	750	32,5
Ömsköldsvik	3	690	28

Performance in different climates

The aim of this study is to demonstrate the expected performance of the cooling systems using air and ground as cold source in different climates and geological conditions. The telephone switching station is assumed to have a constant cooling load of 40 kW with no cooling demand for fresh air ventilation. The ambient cooling unit requires a inlet temperature of 20 °C to maintain a room temperature of 25 °C. The outlet temperature is 23,6 °C. The influence of climatic conditions is studied for eight different cities: Ankara (Turkey), Beijing (China), Birmingham (UK), Madrid (Spain), Minneapolis (USA), Moscow (Russia), Sapporo (Japan), and Stockholm (Sweden). Hourly climate data for a representative average year is obtained from the Meteoronorm database (METEONORM 1997). This weather is repeated for ten years. However, during the last year it is assumed that there is a maximum load (40 kW) on the ground cooling unit throughout August. This is not only a safeguard for a hot summer case but it also makes it possible to use the ground cooling unit if the recooling unit fails. The recooling unit is designed to cover the load completely up to 15 °C with a linear decrease to 12,1 kW at 21 °C. The recooling unit is shut off above this temperature and the ground cooling unit covers the whole load.

The total electric energy consumption (incl. circulation pumps and fans) is given in Figure 2. The power rate decreases to about 2,5 kW when the air temperature exceeds 21 °C. A comparison is made with a conventional water cooling system with inlet and outlet temperatures of 11°C and 14 °C respectively. Free cooling is used below 6 °C and the cooling machine above this temperature. The power rate for the conventional system at warm weather is about 24 kW higher. The total annual electric energy consumption for the air/ground cooling system (about 30 MWh) is about 80 % lower than the conventional one (about 150 MWh). See Figure 2.

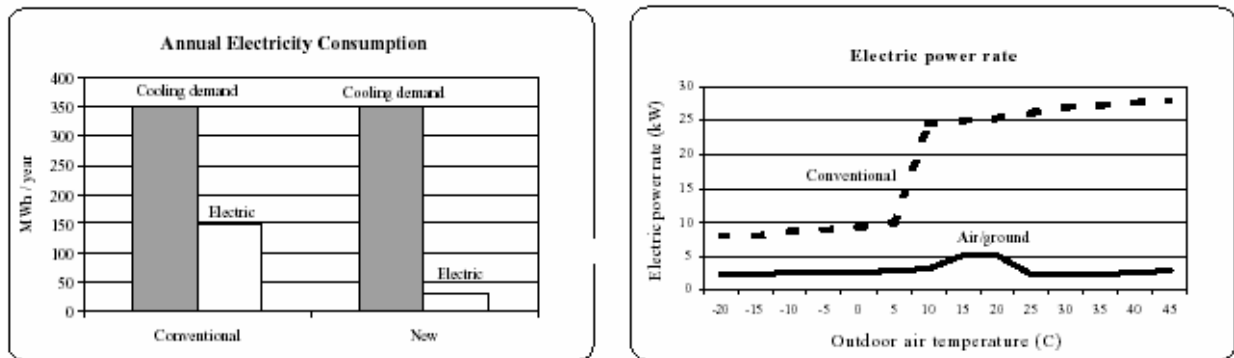


Figure 2. A comparison of the air/ground cooling system with a conventional cooling system. Left: Total annual energy consumption. Right: Electric power rate as a function of outdoor air temperature.

The cooling load rejected to the ground via the borehole heat exchanger causes an increase in the ground temperature. Without recharge of cold there will be gradual thermal build-up around the boreholes causing the return temperature from the boreholes to increase slightly with time. The sizing of the borehole heat exchanger is such that a fluid outlet temperature of 20 °C is reached at the end of August during the 10th year. The Superposition Borehole Model (SBM) is used for simulation of the thermal response in the ground (ESKILSON 1987; ESKILSON and CLAEISSON 1988). The ground is assumed to have a thermal conductivity of 2,5 W/m,K or 3,5 W/m,K. In the high thermal conductivity case, the boreholes are graded with angles of 15 and 20 degrees of the vertical. For the low thermal conductivity case, the boreholes are assumed to be vertical with spacing of 10 m. The borehole thermal resistance is assumed to be 0,08 K/(W/m). The geological conditions for the different cities have not been investigated and ground with the more favorable, high thermal conductivity may not be available there. However, this study is mainly intended to show the influence of the climate on the performance of these systems. The annual average ground surface temperature is assumed to be 1,1 °C higher than the annual average air temperature (an assumption derived from conditions valid in Stockholm). There is a vertical temperature gradient resulting in a geothermal heat flow of 60 mW/m².

The simulation results are given in Table 2 and Table 3 for the cases of a ground thermal conductivity of 3,5 /m,K and 2,5 W/m,K respectively. The cities are listed in order of increasing annual average air temperature.

Table 2. Summary of data for air/ground cooling unit with 40 kW cooling capacity. Ground thermal conductivity is 3,5 W/m,K. Boreholes are graded. Table gives annual average air temperature, number of boreholes, total active borehole length, amount of ground cooling, amount of ground cooling per meter active borehole, and maximum cooling power rate per meter active borehole.

Site	Temp °C	Number of boreholes	Length m	Ground cooling MWh	Spec. energy kWh/m	Spec. max. rate W/m
Moscow	4,7	5	795	36,8	46	52
Stockholm	6,2	6	888	32,1	36	47
Minneapolis	6,2	6	972	76,4	79	42
Sapporo	8,4	8	1184	69,2	58	35
Birmingham	9,5	8	1208	31,1	26	34
Ankara	11,3	12	1800	88,3	49	23
Beijing	12,7	16	2480	128,3	52	17
Madrid	14,3	20	3200	104,5	33	13

Table 3. Summary of data for air/ground cooling unit with 40 kW cooling capacity. Ground thermal conductivity is 2,5 W/m,K. Boreholes are vertical with a spacing of 10 meters. Table gives annual average air temperature, number of boreholes, total active borehole length, amount of ground cooling, amount of ground cooling per meter active borehole, and maximum cooling power rate per meter active borehole.

Site	Temp °C	Number of boreholes	Length m	Ground cooling MWh	Spec. energy kWh/m	Spec. max. rate W/m
Moscow	4,7	7	1071	36,8	34	39
Stockholm	6,2	8	1192	32,1	27	35
Minneapolis	6,2	9	1386	76,4	55	30
Sapporo	8,4	11	1639	69,2	42	25
Birmingham	9,5	11	1639	31,1	19	25
Ankara	11,3	16	2480	88,3	36	17
Beijing	12,7	22	3542	128,3	36	12
Madrid	14,3	28	4480	104,5	23	9

Obviously, the total borehole length required is less if the natural undisturbed ground temperature is low and the ground thermal conductivity is high. The most favorable conditions for air/ground cooling are found in regions with warm summers (substantial cooling load) and very cold winters (low ground temperatures) such as Moscow and Minneapolis. However, the ratio between the amount of ground cooling (the "benefit" of the ground cooling unit) versus the total borehole length (the "cost") shows higher values than Stockholm, where this cooling technique is in use, for all cities except Birmingham and Madrid. Madrid has an unfavorably high ground temperature. Birmingham has a low cooling load comparable to Stockholm and Moscow, but a higher ground temperature that requires more boreholes to meet the maximum cooling load of 40 kW. The air/ground cooling system consumes about 30 kW of electricity resulting in a seasonal performance factor of about 12.

Finally, the possibility of recharging the ground with cold was studied for Ankara, Beijing and Stockholm. In this case two recooling units are used. One unit is used for recooling for air temperatures below 21 °C. The second unit is used for recharging when recharging rates of more than 10 kW can be achieved. It assists in the recooling process at temperatures above 10 °C and below 21 °C. The two recooling units cover the cooling demand up to 18 °C. For the three cities it was found that the heat rejected to the ground could be balanced by recharging during the winter. The results of the simulations are given in Table 4.

Table 4. Ground cooling load and total borehole length for air/ground cooling unit without recharge (15 °C /21 °C) and with recharge (18 °C /21 °C). The ground thermal conductivity (λ) is 3,5 W/m,K in Stockholm and 2,5 W/m,K in Ankara and Beijing.

Site	No recharge		Balanced recharge		Borehole length reduction (%)
	Ground cooling load (MWh)	Borehole length (m)	Ground cooling load (MWh)	Borehole length (m)	
Ankara ($\lambda=2,5$)	88,3	2480	75,5	1920	-23
Beijing ($\lambda=2,5$)	128,3	3542	119,0	2320	-34
Stockholm ($\lambda=3,5$)	32,1	888	23,5	805	-9

The reduction in total borehole length was largest in Beijing and Ankara where the natural ground temperature is high. The borehole heat exchangers are here designed to meet the cooling load with a relatively small temperature difference between the system and the ground. This makes it possible to

recharge substantial amounts of cold in the winter when the temperature difference between the air and the ground is large. The recharging requires electric energy (about 10 MWh) to operate the fan and the pumps of the recooling and ground cooling unit. However, there are some energy savings when the recooling units operate simultaneously in the cooling mode between 10 °C and 21 °C.

Acknowledgement

This work has been supported by the Swedish Council for Building Research and Telia.

References

ESKILSON P. (1986). Superposition Borehole Model - Manual for Computer Code. Div. of Mathematical Physics, Lund

University, P.O.Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden

ESKILSON P, CLAEISSON J. (1988). Simulation Model for Thermally Interacting Heat Extraction Boreholes, Numerical

Heat Transfer, Vol. 13, pp. 149-165.

METEONORM Version 3.0. (1997). Nova Energie GmbH, Schachenallee 29, CH-5000 Aarau, Switzerland.