



Air Infiltration and Ventilation Centre

Utilisation d'échangeurs de chaleur sol-air pour le refroidissement

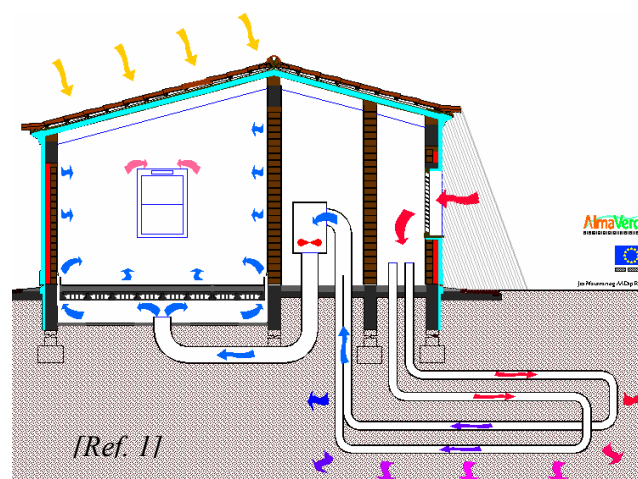
M. Santamouris
Université d'Athènes, Grèce

1 Introduction

Le présent « Ventilation Information Paper » a pour but de présenter les connaissances de base relatives à l'utilisation d'échangeurs de chaleur sol-air. Le besoin accru d'air conditionné a rendu les nouvelles techniques de refroidissement passives et hybrides très attrayantes.

La technique est basée sur l'utilisation du sol comme dissipateur de chaleur en période estivale et hivernale. En réalité, à une certaine profondeur, le sol a une température beaucoup plus basse que la température ambiante en été, et beaucoup plus haute en hiver. Dès lors, la chaleur excessive d'un bâtiment peut être dissipée vers le sol en passant par des tuyaux enterrés et positionnés à l'horizontale, ce qui réduit ainsi la température intérieure en été. En hiver, les tuyaux servent à préchauffer l'air ventilé, diminuant ainsi la charge de chauffage des bâtiments.

Cette contribution présente une description des principes opérationnels et de la manière d'appliquer les échangeurs de chaleur sol-air, suivie d'une présentation des données de performances de divers exemples. Enfin, cet article donne des informations sur les différentes méthodologies permettant de calculer la performance des systèmes. Des informations détaillées sur les échangeurs de chaleur sol-air figurent dans Santamouris et Assimakopoulos (1996).



2 Les besoins accrus de refroidissement

Ces dernières années, l'air conditionné est devenu populaire en raison de l'augmentation des niveaux de vie dans les pays développés et de l'utilisation de normes architecturales n'apportant pas de réponses en termes climatiques.

Selon l'Institut International du Froid (IIF) (IIF, 2002), plus de 240 millions d'unités d'air conditionné et 110 millions de pompes à chaleur sont installées dans le monde. La même étude montre que les secteurs de la réfrigération et de l'air conditionné utilisent environ 15 % de toute l'électricité consommée dans le monde (IIF, 2002). Les ventes annuelles d'équipements d'air conditionné approchent les 60 milliards \$ (IIF, 2002),

ce qui correspond à presque 10 % des ventes de l'industrie automobile dans le monde.

L'utilisation de l'air conditionné augmente constamment. En 1998, selon la « Japan Air Conditioning and Refrigeration News » (JARN) et la « Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association » (JRAIA), le nombre total de ventes annuelles était proche de 35 millions d'unités ; ce nombre était passé à 42 millions d'unités en 2000 et à 45 millions en 2002. Le niveau prévu pour 2006 est de 53 millions d'unités (JARN and JRAIA, 2002).

L'utilisation de l'air conditionné engendre plusieurs problèmes. Outre la forte hausse de la consommation énergétique absolue des bâtiments, d'autres impacts importants comprennent :

- l'augmentation de la charge électrique de pointe ;
- des problèmes environnementaux liés à la destruction de la couche d'ozone et au réchauffement climatique ;
- des problèmes de qualité de l'air intérieur.

Des charges électriques de pointe élevées obligent les entreprises publiques à construire des centrales électriques supplémentaires pour répondre à la demande. Mais, comme ces centrales sont utilisées pour de courtes périodes, le coût moyen de l'électricité augmente considérablement.

L'une des principales exigences scientifiques et techniques de nos jours est de trouver des solutions efficaces pour réduire les incidences énergétiques et environnementales de l'air conditionné.

Les techniques de refroidissement passif utilisées dans les bâtiments se sont avérées très efficaces et permettent de diminuer fortement la charge de refroidissement des bâtiments. De plus, elles fournissent un excellent confort thermique et une très bonne qualité de l'air intérieur, ainsi qu'une faible consommation énergétique.

3 L'utilisation du sol comme dissipateur de chaleur

En général, la température du sol est beaucoup plus basse que celle de l'air ambiant en été, et plus élevée en hiver. La valeur exacte de la température du sol dépend de la profondeur (z), des caractéristiques thermiques du sol et en particulier de sa diffusivité thermique (a), et de la variation de la température de la surface.

Il est possible de calculer la température du sol à n'importe quelle profondeur en utilisant l'équation ci-dessous.

Le refroidissement par le sol est basé sur la dissipation du surplus de chaleur d'un bâtiment vers le sol. En été, la température du sol est bien plus basse que celle de l'air ambiant. La dissipation du surplus de chaleur est possible au moyen d'échangeurs de chaleur sol-air. Vous trouverez davantage d'informations sur la dissipation de la chaleur vers le sol dans (Mihalakakou et al 1994).

Un échangeur de chaleur sol-air est un tuyau horizontal enterré à une certaine profondeur. L'air circule à l'intérieur (la plupart du temps par des moyens mécaniques) et, en raison de la température du sol plus basse, sa température diminue (figure 1). L'air froid est alors aspiré à l'intérieur du bâtiment pour faire baisser la température intérieure.

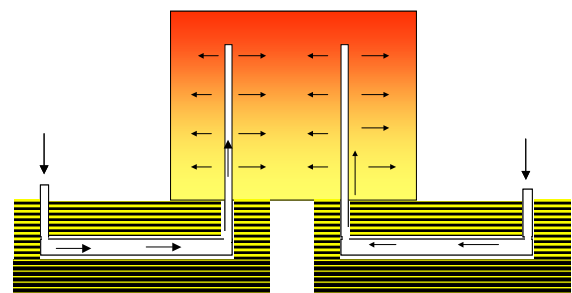


Figure 1: Principe des échangeurs de chaleur sol-air

Il existe deux configurations principales pour les échangeurs de chaleur sol-air. Le système peut être un circuit en boucle ouverte ou fermée. Dans un circuit en boucle ouverte, l'air ambiant circule à l'intérieur des tuyaux et est ensuite transféré dans le bâtiment (Figure 1), alors que dans des configurations à boucle

$$T_{z,t} = T_m - A_s \exp\left(-z\left(\frac{\pi \alpha}{365}\right)^{0.5}\right) \cos\left(\frac{2\pi}{365}\left(t - t_0 - \frac{z}{2}\left(\frac{365\alpha}{\pi}\right)^{0.5}\right)\right)$$

Où :

T_m est la température annuelle moyenne de la surface du sol (K)

A_s est l'amplitude de la variation de la température de surface (K)

z est la profondeur (m)

α est la diffusivité thermique du sol (m^2/h)

t est le temps écoulé depuis le début de l'année civile (jours)

t_0 est une constante de phase (heures depuis le début de l'année de la température moyenne de surface la plus basse).

Vous trouverez plus d'informations sur la température du sol dans Mihalakakou et al (1992, 1997).

fermée, l'entrée et la sortie se trouvent toutes les deux à l'intérieur du bâtiment (Figure 2). La performance spécifique des échangeurs de chaleur sol-air, et en particulier la diminution de température de l'air obtenue, dépendent de la température de l'air d'entrée, de la température du sol à la profondeur de l'échangeur, des caractéristiques thermiques des échangeurs et du sol, et enfin de la vitesse de l'air et des dimensions des tuyaux.

On trouvera des informations sur le potentiel de refroidissement des échangeurs de chaleur sol-air dans (Mihalakakou et al 1994b), de même que des informations sur l'impact de la couverture du sol sur l'efficacité des échangeurs de chaleur sol-air dans Mihalakakou et al (1994c, 1996).

4 Description des échangeurs de chaleur sol-air

Un échangeur de chaleur sol-air est un tuyau synthétique, en béton, en céramique ou en métal, enterré à une certaine profondeur dans le sol (Figures 3-4). Étant donné la très forte inertie thermique du sol, la conductivité du tuyau est de moindre importance. Afin d'améliorer le contact thermique entre le tuyau et le sol, on place généralement une couche de 5 cm de sable en dessous et au-dessus du tuyau (Figure 5).

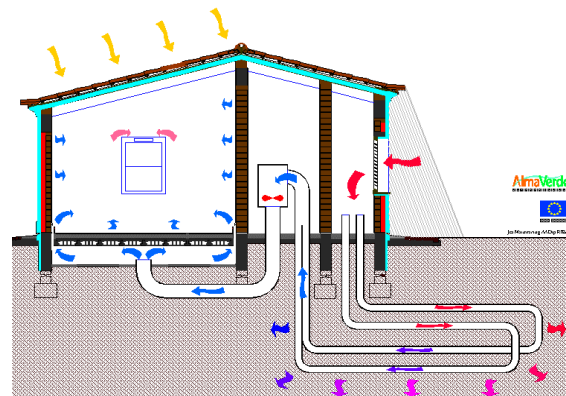


Figure 2: Echangeur de chaleur sol-air en boucle fermée [Ref. 1]



Figure 3: Pose d'un tuyau dans le sol [Ref. 1]



Figure 4: Pose d'un tuyau dans le sol

Chaque échangeur a une partie d'entrée et de sortie par laquelle l'air entre et sort. Les tuyaux peuvent être reliés entre eux afin d'avoir une entrée et une sortie communes (Figure 6), ou peuvent être indépendants. L'air circule dans les tuyaux en utilisant un ventilateur commun ou individuel. Il convient de bien sélectionner le ventilateur pour obtenir la vitesse de l'air la plus appropriée à l'intérieur des tuyaux.

Même si les échangeurs de chaleur sol-air sont en principe plutôt des systèmes low-cost simples, des problèmes de condensation peuvent survenir et provoquer d'importants problèmes de qualité de l'air intérieur. Il est possible d'y remédier en installant les tuyaux avec une légère inclinaison de par exemple 1 % pour le drainage. Un petit orifice dans la partie inférieure de l'échangeur peut permettre d'éviter l'accumulation d'eau à l'intérieur du tuyau. Il est également possible de concevoir un système de drainage. Une filtration de l'air peut s'avérer utile ou nécessaire. Dans certains cas, l'air passe à l'intérieur du bâtiment, à travers une unité de traitement de l'air : l'air est donc filtré.

Les principaux paramètres à définir avant l'installation d'un échangeur de chaleur sol-air sont :

- la profondeur à laquelle l'échangeur doit être placé ;
- la longueur et le diamètre des tuyaux ;
- la vitesse de l'air à l'intérieur des tuyaux ;
- le système de contrôle à appliquer.

L'optimisation du concept requiert une simulation thermique complète du système. Voici quelques méthodologies pour concevoir des échangeurs de chaleur sol-air.

L'expérience acquise permet d'avancer quelques directives préliminaires. Ces lignes directrices s'appliquent à tous les climats. Il convient en particulier de veiller à ce que :

- la longueur de l'échangeur soit de plus de 20 m au moins ;
- le diamètre de l'échangeur se situe entre 0,2 et 0,3 m ;
- la profondeur de l'échangeur se situe entre 2 m et 3 m ;



Figure 5: Pose d'un tuyau dans le sol en utilisant du sable pour améliorer le contact thermique entre le tuyau et le sol



Figure 6: Tuyaux enterrés avec entrée et sortie communes [Ref. 1]

- la vitesse de l'air passant par le tuyau enterré se situe entre 6 et 10 m/s. On peut également utiliser des vitesses de l'air inférieures, mais le coefficient d'échange de chaleur à l'intérieur des tuyaux sera plus bas, et l'efficacité du système sera donc réduite ;
- les tuyaux soient séparés entre eux d'au moins 2 m pour permettre la dissipation de la chaleur ;
- dans certains cas, un nettoyage périodique des tuyaux est important. Un tel nettoyage est possible en installant les tuyaux avec une pente du début à la fin de 1:60, pour permettre le lavage sous pression.

Les échangeurs de chaleur sol-air peuvent être utilisés pour envoyer directement de l'air froid dans les bâtiments, ou peuvent être reliés à un système d'air conditionné existant. Dans ce dernier cas, les échangeurs peuvent être utilisés.

En ce qui concerne le contrôle du système, il convient d'appliquer une stratégie très simple. Il faut en premier lieu s'assurer que la température à la sortie des tuyaux est inférieure d'au moins 3 ou 4 °C à la température intérieure (été). Deuxièmement, il convient de vérifier que la quantité d'énergie utilisée pour la circulation de l'air est beaucoup plus basse que la puissance de refroidissement fournie par le système. Pour cela, il y a lieu de mesurer les températures d'entrée et de sortie de l'air ainsi que les températures intérieures. Un régulateur très simple suffit pour satisfaire à ces conditions.

5 Exemples et données de performances

Des données de performance de l'application d'échangeurs de chaleur sol-air sont disponibles à partir de nombreux projets. On trouvera ci-dessous des informations sur ces projets. Dans la plupart des projets, il apparaît clairement que la température de sortie des tuyaux est assez basse et peut en grande partie contribuer à satisfaire les besoins de refroidissement des bâtiments.

5.1 Bâtiment universitaire

La Figure 7 montre les températures ambiantes minimale et maximale ainsi que la température de sortie d'un échangeur de chaleur sol-air de l'Université d'Ioannina, en Grèce (Stournas Triantis et al, 1986). La longueur des tuyaux était d'environ 30 m et les tuyaux étaient enterrés à environ 3 m de profondeur. Le monitoring a été effectué pendant la période estivale et la figure 7 montre les données de 31 jours consécutifs en juillet. Comme on peut le constater, la diminution maximale de la température obtenue à la sortie des tuyaux par rapport à la température ambiante était proche de 10 °C.

5.2 Entrepôt de papier

Le bâtiment Aggelidis est un entrepôt de papier situé sur un site de 10.900 km², à 21 km du centre d'Athènes et le long de l'autoroute reliant Athènes à Thessalonique. Il présente trois niveaux : le sous-sol, où se trouvent le parking et l'équipement mécanique principal, le rez-de-chaussée pour la salle de stockage principale et les élévateurs, et le premier étage

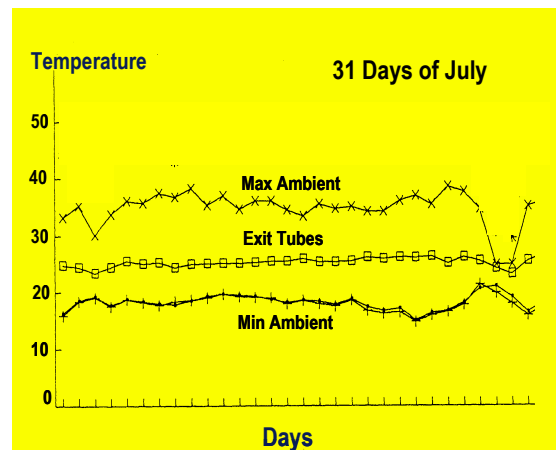


Figure 7: Performance d'échangeurs de chaleur sol-air à l'Université d'Ioannina



Figure 8: Vue extérieure de l'entrepôt de papier Aggelidis



Figure 9: Point où l'air provenant du tube enterré est introduit dans le bâtiment

pour l'entrepôt des produits spéciaux, la plateforme et les bureaux (voir Figures 8, 9).

Le bâtiment utilise des techniques d'économie d'énergie telles que les échangeurs de chaleur sol-air, des revêtements pare-soleil et pare-vent et des pompes à chaleur du type VRV (Variable Refrigerant Volume), combinés à de

simples ventilateurs de plafond pour l'air conditionné dans le bureau. L'échangeur de chaleur sol-air est constitué de deux tuyaux de 0,315 m de diamètre, enterrés à 2 m de profondeur autour du bâtiment. Ils ont chacun une longueur de 50 m. Ils sont conçus pour fournir 4500 m³/h d'air (vitesse de l'air de 8 m/s). Le bâtiment est sous monitoring depuis novembre 2004 afin d'évaluer l'efficacité des techniques d'économie d'énergie.

Les températures quotidiennes maximales moyennes d'entrée et de sortie de l'un des échangeurs de chaleur sol-air sont présentées dans la Figure 10. Comme on peut le voir, la diminution de température moyenne à la sortie est proche de 5 °C. L'utilisation d'échangeurs de chaleur sol-air a permis de maintenir la température intérieure dans les limites du confort sans utiliser l'air conditionné. La Figure 11 montre la répartition de la température intérieure dans l'entrepôt pendant la période estivale.

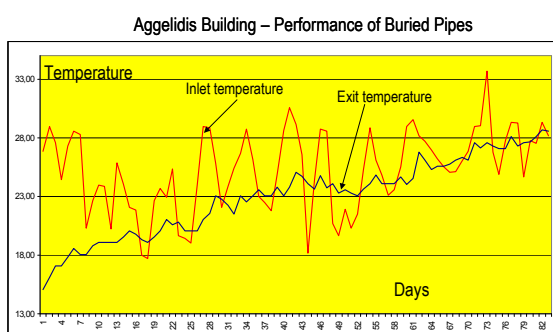


Figure 10: Températures d'entrée et de sortie dans l'un des échangeurs de chaleur pendant la période estivale

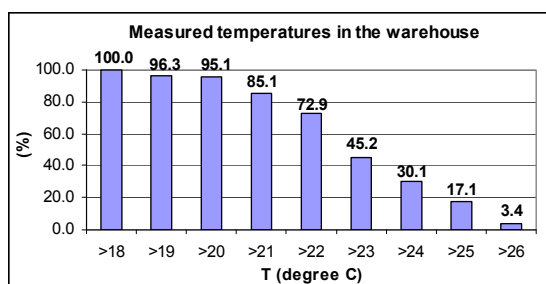


Figure 11: Répartition des températures intérieures dans l'entrepôt pendant la période estivale

5.3 Projet COOLHOUSE

Le projet COOLHOUSE de la Commission européenne avait pour objectif de tester la viabilité des variantes à l'air conditionné en utilisant des techniques de construction passive et basse énergie, y compris en matière de refroidissement et de ventilation, dans les climats méditerranéens et côtiers et de démontrer que de telles stratégies peuvent s'avérer pratiques et fournir des conditions intérieures agréables pour les occupants (Burton, 2004).

Le projet impliquait trois sites de démonstration au Portugal, en France et en Italie.

5.3.1 Vaste nouvelle communauté résidentielle au Portugal

Le projet Alma Verde au Portugal comprend :

- 35,3 hectares de nouvelle communauté résidentielle,
- de nombreuses installations publiques et privées situées dans l'ouest intact de l'Algarve, à 8 km à l'ouest de Lagos, au Portugal, et à quelque 25 km à l'est de la pointe de l'Europe,
- 6 maisons individuelles utilisées pour montrer les principes COOLHOUSE.

Les principales composantes énergétiques étaient :

- une isolation des murs extérieurs ;
- l'ombrage solaire ;
- une masse thermique intérieure, y compris des murs intérieurs en adobe ;
- un refroidissement du sol au moyen d'une tuyauterie de drainage en PVCu standard.

Les principales caractéristiques des échangeurs de chaleur sol-air utilisés (Figure 2) sont :

- un diamètre de tuyau de 160 mm ;
- deux tubes enterrés d'une longueur de 25 m chacun ;
- l'assistance d'un ventilateur ;
- une distance de 2 m entre les tuyaux pour permettre la dissipation de la chaleur ;
- des courbes de 90° formées à partir de deux sections de tuyaux de 45° pour diminuer la résistance de l'air ;
- un nettoyage périodique en installant des tuyaux avec une pente du début à la fin de 1:60 pour permettre le lavage sous pression.

Le monitoring du projet a démontré que le système de refroidissement par le sol était très efficace pour éliminer les pics et les creux de température de l'air extérieur. Le +DT maximal (c.-à-d. la chaleur éliminée de l'air entrant) était de 11 °C, alors que le -DT maximal (c.-à-d. la chaleur ajoutée à l'air froid extérieur) était de 8 °C. La température de l'air des tuyaux enterrés allait de 26 °C en août à 15 °C en hiver.

Les calculs montrent une diminution de 95 % des émissions d'énergie et de CO₂, par rapport aux émissions correspondantes lorsque l'on utilise un air conditionné conventionnel. Parallèlement, les gains additionnels en préchauffage par ventilation sont également disponibles en hiver. Un avantage considérable du refroidissement par le sol se situe au niveau de la diminution de l'humidité relative (HR) intérieure. L'humidité relative enregistrée peut être de 25 à 30 %, ce qui est particulièrement important au Portugal.

5.3.2 Maison de soins en France

L'Aubier de Cybèle, dans le sud de la France, est une maison de soins de 80 lits pour personnes âgées. Elle est considérée comme la première maison de repos « verte » du sud de la France à utiliser un concept de refroidissement bioclimatique et passif, ce qui implique un certain nombre de mesures bioclimatiques et d'efficacité énergétique, comme : l'isolation, l'ombrage solaire, la lumière du jour, la masse thermique, la ventilation naturelle, les plantations, le chauffage d'eau solaire, le gain solaire passif et le refroidissement par le sol.

Le système de refroidissement par le sol sert pour le réfectoire de 380 m². Ce système consiste en un grillage de 11 tuyaux de 200 mm de diamètre chacun, enterrés à 2 m de profondeur (Figure 6).

Le projet est placé sous monitoring dans le cadre du projet Coolhouse, et il a été constaté qu'alors que la puissance de refroidissement initiale était de 14 kW à une vitesse d'écoulement de l'air de 2 m³/s et de 9,5 kW à une vitesse d'écoulement de l'air de 1 m³/s en juillet et en août, les valeurs de puissance de refroidissement ont été ramenées à 5 kW après un à trois jours d'utilisation ininterrompue.

5.3.3 Aler Pavia

Le projet Aler Pavia (Italie) se trouve dans une zone existante de logements sociaux et concerne la rénovation de 220 habitations. Cela comprend un nouveau centre de communauté, le « CircoLab », un complexe multifonctionnel avec des fonctions d'entreprise, de conférence, de loisirs, de culture et de communauté. Ce bâtiment a été conçu sous la forme d'une « boîte de béton », coupée par deux patios intérieurs en verre et entourée de plantes grimpantes.

Ce projet utilise un système de refroidissement par le sol, comprenant des tuyaux en PVC de 400 mm de diamètre, de 40 m de long et enterrés à 4 m en dessous du niveau du sol (Figure 3). L'air extérieur est collecté dans une zone ombragée située à l'opposé de la cour. Un échangeur de chaleur air-air est placé entre le tuyau enterré et le système de ventilation.

Le monitoring a démontré que le refroidissement par le sol était très efficace pour modifier les pics et les creux de température de l'air extérieur. La différence de température moyenne de l'air entrant dans le bâtiment était de 2,9 °C de moins que la température de l'air extérieur.

6 Méthodes de calcul

Le calcul de la performance thermique d'un échangeur de chaleur sol-air est un problème complexe. Les outils de calcul peuvent être classés en outils simplifiés ou détaillés. Les outils simplifiés sont surtout conçus pour calculer la température de l'air de sortie des tuyaux. Les outils détaillés sont des méthodes de simulation permettant de résoudre à la fois les équations de transfert de chaleur en ce qui concerne l'air, le tuyau et le sol.

On trouvera une présentation complète ainsi qu'une comparaison de la plupart des méthodes simplifiées dans (Tzaferis et al 1992). Un modèle paramétrique validé simple permettant de calculer la température de sortie des tuyaux enterrés est proposé dans (Mihalakakou et al 1995b).

Plusieurs modèles de simulation détaillée servant à calculer les phénomènes de transfert de chaleur associés à des échangeurs de

chaleur sol-air ont été développés. Un modèle validé lié au programme TRNSYS est décrit dans (Mihalakakou et al 1994d).

Les phénomènes couplés de transfert de chaleur entre des bâtiments et des échangeurs de chaleur sol-air sont très importants. On trouvera des informations sur la température du sol sous les bâtiments dans (Mihalakakou et al 1995). De même, une méthode permettant d'estimer la performance spécifique des bâtiments couplés à des échangeurs de chaleur sol-air est fournie dans (Santamouris et al 1995, 1997).

7 Références

1. Burton S.: Final Report of the Coolhouse Project. European Commission, Directorate General for Energy and Transport, 2003.
2. Japan Air Conditioning and Refrigeration News (JARN), Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association (JRAIA). 2002. Air Conditioning Market. Tokyo, Japan
3. International Institute of Refrigeration. 2002. Industry as a partner for sustainable development – refrigeration,. Report Published by, Paris, France
4. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos :Modelling the earth temperature using multiyear measurements. J. Energy and Buildings, 19, 1-9, 1992.
5. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos : On the Use of Ground for Heat Dissipation J. of Energy, 19, 1, p.p. 17-25, 1994.
6. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos :On the Cooling Potential of Earth to air heat Exchangers, J. Energy Conversion and Management, 35, 5,395-402, 1994b.
7. G. Mihalakakou, M. Santamouris and D. Asimakopoulos and N. Papanikolaou : The impact of the ground cover on the efficiency of Earth to air heat Exchangers. J. Applied Energy , 48, p.p. 19-32, 1994c.
8. Mihalakakou, M. Santamouris and D.N. Asimakopoulos : Modelling the thermal performance of the earth to air heat exchangers.Solar Energy, 53,3, 1994d
9. Mihalakakou, M. Santamouris, D. Asimakopoulos and A. Argiriou : On the ground temperature below buildings. Solar Energy, 55, 5, 355-362, 1995
10. Mihalakakou, M. Santamouris , D. Asimakopoulos and I. Tselepidaki : Parametric Prediction of the Buried Pipes Cooling Potential for Passive Cooling Applications. Solar Energy, 55, 3, p.p. 163-173, 1995b
11. Mihalakakou, J.O. Lewis and M. Santamouris :The Influence of Different Ground Covers on the Heating Potential of Earth to Air Heat Exchangers. Journal of Renewable Energies, 7,1, p.p. 33-46, 1996
12. Mihalakakou, M. Santamouris J.O.Lewis and D.N. Asimakopoulos : On the application of the energy balance equation to predict the ground temperature profiles. Solar Energy, 60,3/4,p.p, 181-190, 1997
13. Santamouris, G. Mihalakakou, A. Argiriou and D.N. Asimakopoulos : On the Performance of Buildings coupled with earth to air heat exchangers. Solar Energy, 54, 6, 375-380, 1995
14. Santamouris M, and D.N. Asimakopoulos, (Eds) : Passive Cooling of Buildings. James and James Science Publishers, London, 1996.
15. Santamouris G. Mihalakakou and D.N. Asimakopoulos : On the coupling of thermostatically controlled buildings with ground and night ventilation passive dissipation techniques. Solar Energy, 60,3/4, .p.p. 191-197, 1997
16. Stournas-Triantis, M. Santamouris και T. Metsis : Passive Solar Restoration of the new School of Philosophy building in the University of Ioannina, Greece. Proc. Conference "International Climatic Architecture Congress", Belgium, 1986.
17. Tzaferis, D. Liparakis , M. Santamouris and A. Argiriou : Analysis of the accuracy and sensitivity of eight models to predict the performance of earth to air heat exchangers. J. Energy and Buildings, 18, 35-43, 1992

Version originale en anglais

Traduction française réalisée avec le soutien de :



Wallonie



CSTC

L'« **Air Infiltration and Ventilation Centre** » (**AIVC**) a été créé dans le cadre de l'Agence internationale de l'Énergie et est financé par les sept pays suivants : Belgique, République Tchèque, France, Grèce, Pays-Bas, Norvège et États-Unis d'Amérique.

L'Air Infiltration and Ventilation Centre apporte son soutien technique à la recherche théorique et appliquée sur l'infiltration d'air et la ventilation. Il ambitionne de promouvoir la compréhension de la complexité de la circulation de l'air dans les bâtiments. Il entend également faire progresser l'application efficace de mesures d'économie d'énergie dès la conception des nouveaux bâtiments et l'amélioration du parc immobilier existant.