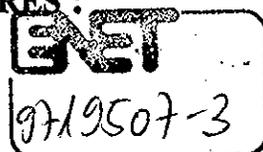


RAFRAÎCHISSEMENT ET PRÉCHAUFFAGE PAR TUBES ENTERRÉS : MESURES, SIMULATIONS & CALCULS ÉCONOMIQUES



P. Hollmuller¹ ; B. Lachal¹

1: Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, Université de Genève, 19 av. de la Jonction, CH - 1205 Genève.

ABSTRACT *

On basis of extensive monitoring and simulation work, we examine the potential of buried pipe systems under Central European climate, insiting on the fundamental difference between winter preheating and summer cooling.

RÉSUMÉ

Sur la base d'un important travail de mesures et de simulations, nous étudions le potentiel des systèmes de tube enterrés sous le climat d'Europe Centrale, en insistant sur la différence fondamentale entre préchauffage hivernal et rafraîchissement estival.

1. INTRODUCTION

Avec l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments il y a un intérêt croissant pour des systèmes de préchauffage hivernal et rafraîchissement estival à base d'énergies renouvelables. L'un d'eux, qui peut fournir les deux prestations, consiste à faire passer de l'air externe par un système de tubes enterrés (hypocauste) afin de l'utiliser pour le renouvellement d'air (hiver) ou la ventilation (été), le sous-sol servant de stockage énergétique saisonnier. En se basant plus particulièrement sur deux installations existantes, nous survolerons ici un ensemble d'analyses que nous menons sur de tels systèmes. Après une description du modèle numérique développé à cet effet (Sec. 2), nous étudierons les potentiels de préchauffage (Sec. 3) et rafraîchissement (Sec. 4) qui, bien que complémentaires, s'avèrent sous nos climats ne pas avoir les mêmes spécificités et intérêts. L'analyse énergétique sera enfin complétée par une brève discussion des aspects économiques (Sec. 5).

2. OUTIL DE SIMULATION

A l'origine de l'outil de simulation que nous avons développé se trouve une étude sur le stockage des excès de gains solaires journaliers dans les serres horticoles, réutilisés en période de chauffage pour réduire la consommation de combustible [4]. L'une des techniques analysées consiste à chauffer/rafraîchir l'air de la serre en le faisant passer par une série de tubes enterrés dans lesquels les échanges sensibles (variation de température) sont parfois accompagnés d'échanges latents (évaporation/condensation) : au printemps, durant les premières heures matinales de stockage, l'air humide se condense au contact du sol, pour à nouveau évaporer l'eau lorsque l'humidité de la serre baisse avec l'accroissement de température dû aux gains solaires (Fig. 1). En se basant sur un travail précédent [2] nous avons donc développé un modèle qui tient compte des deux phénomènes à la fois, ainsi que

* An english version of this aticle is to be found in [1]

des pertes de charge et des éventuels infiltration/écoulement d'eau le long des tubes. Il permet par ailleurs d'inverser la direction du flux d'air, de définir différents types de géométries (sols inhomogènes, conditions de surface variées, utilisation des symétries pour l'économie du temps de calcul, cf. Fig. 2) et est adapté à TRNSYS (un environnement modulaire pour la simulation des systèmes énergétiques).

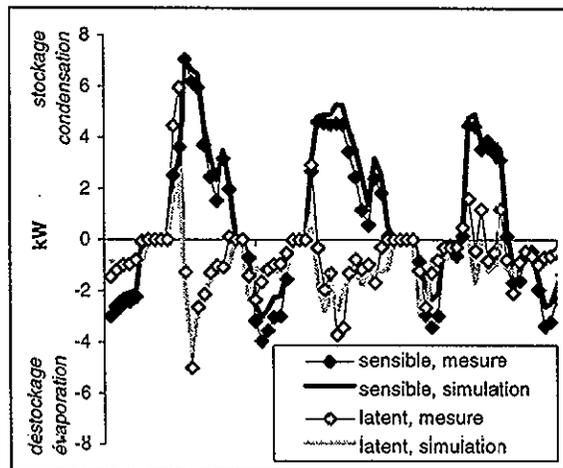


Fig. 1 : Stockage et déstockage journaliers (sensible et latent) par tubes enterrés sous une serre horticole : valeurs horaires sur 3 jours.

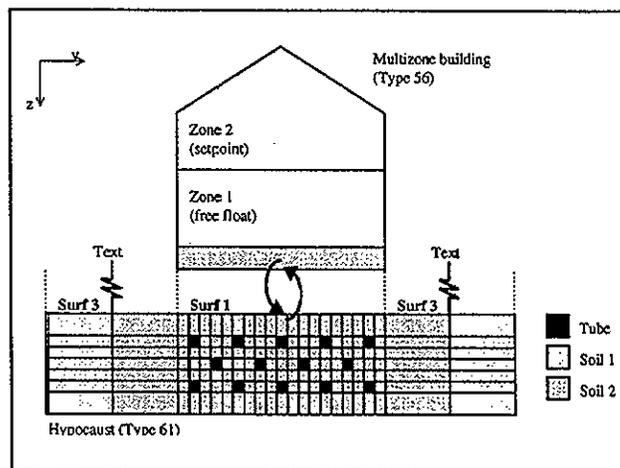


Fig. 2 : Exemple de géométrie pour le modèle numérique (différentes couches de tubes, sols inhomogènes) et couplage avec un autre module TRNSYS.

Un travail de validation sur plusieurs installations existantes [3] donne de très bons résultats, aussi bien pour les échanges sensibles que latents (pour ces derniers à condition d'une mesure précise des humidités, ce qui nécessite un bon étalonnage/contrôle des sondes). Lors d'infiltration d'eau les échanges latents peuvent également jouer un rôle important lorsque la prise d'air se trouve à l'extérieur du bâtiment comme cela est le cas pour les puits canadiens, auquel cas notre modèle s'avère également être d'un intérêt particulier (cf. Sec. 3.2).

3. POTENTIEL DE PRÉCHAUFFAGE

3.1 Comparaison avec d'autres techniques

En Suisse la saison de chauffage couvre quelques 7 mois de l'année (3000 degrés-jours) pendant lesquels le renouvellement d'air a un effet négatif sur le bilan énergétique des bâtiments, nécessitant environ $100 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{an}$ pour un taux de ventilation standard de 0.5 vol/h. Dans les bâtiments bien isolés cette perte correspond à une partie importante de la demande énergétique globale, si bien que les mesures d'économie dans ce domaine commencent à prendre de l'importance. Parmi les différentes techniques de préchauffage passif du renouvellement d'air se trouvent les puits canadiens, mais aussi les échangeurs de chaleur sur air vicié et les collecteurs solaire à air (prise d'air sous un toit métallique).

L'immeuble résidentiel et commercial des « Caroubiers » à Genève [5] est équipé des trois systèmes (Fig. 3) : selon l'ensoleillement l'air frais ($3000/2400 \text{ m}^3/\text{h}$ en périodes diurne/nocturne) est pris au puits canadien ou au collecteur solaire, tous deux couplés en aval à un échangeur sur air vicié (ce dernier étant finalement éjecté dans le parking souterrain pour une dernière prestation thermique). Le puits canadien consiste en 49 tubes (diamètre : 12.5 cm, longueur : 50 m, entreaxe : 30 cm, surface d'échange totale : 980 m^2) qui passent 50 cm en dessous du parking, environ 10 cm au dessus de la nappe phréatique.

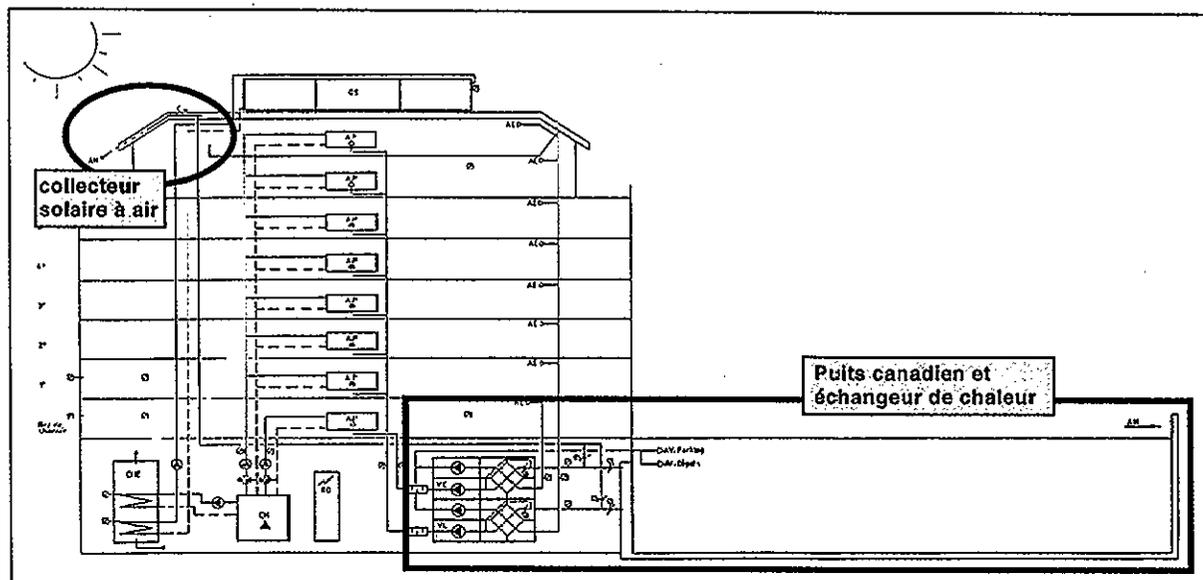


Fig. 3 : Configuration du système de préchauffage de l'air des « Caroubiers ».

Une campagne de mesure sur une vingtaine de jours d'hiver a permis de valider la simulation du puits canadien (erreur quadratique moyenne de 2% aussi bien sur les gains journaliers que horaires), ainsi que de déterminer l'efficacité de l'échangeur de chaleur (60 et 66 % pour les taux de ventilation supérieur et inférieur), alors que le collecteur solaire n'a jusqu'ici pas été analysé. Pour le système couplé puits/échangeur (uniquement lorsque le collecteur solaire est inactif) le potentiel simulé s'élève à 59'000 kWh sur la période de chauffage, répartis à peu près équitablement entre les deux sous-systèmes (Tab. 1). En supprimant le puits canadien (air froid directement vers l'échangeur) cette valeur s'élèverait encore à 49'600 kWh, si bien que le gain net du puits canadien ($59'000 - 49'600 = 9'400$ kWh) s'avère en fait être très faible. Un échangeur mieux dimensionné (surface d'échange doublée pour amener les efficacités à 80 et 85 %) pourrait par ailleurs à lui seul produire quelques 64'200 kWh, contrairement au puits canadien surdimensionné, dont l'efficacité ne pourrait guère être améliorée (cf. gains de chaleur similaires pour un système deux fois plus petit).

Configuration description				Préchauffage		
	puits canad. Long. [m]	éch. air vicié effic. [%]	coll. solaire	puits canad. [kWh/an]	éch. air vicié [kWh/an]	total [kWh/an]
puits canad. tel quel	50 m	60 / 68	oui	27'100	31'900	59'000
puits canad. demi longueur	25 m	60 / 68	oui	21'700	35'100	56'800
éch. air vicié seul	-	60 / 68	oui	-	49'600	49'600
éch. air vicié seul, optimisé	-	80 / 85	oui	-	64'200	64'200
collecteur solaire inactif	50 m	60 / 68	non	27'500	39'300	66'800

Les gains de l'échangeur de chaleur sont calculés avec de l'air vicié à 22.5 °C, tel que mesuré sur 20 jours.

Table 1 : Potentiel de préchauffage d'un puits canadien couplé à un échangeur de chaleur (avec collecteur solaire à air en option).

Ainsi l'échangeur de chaleur s'avère être une meilleure technique de préchauffage que le puits canadien, et la mise en oeuvre coûteuse des deux techniques n'amène pas de gains substantiels. Ceci encore moins en absence de collecteur solaire, puisque pendant les heures ensoleillées le sol n'est plus suffisamment chaud pour le préchauffage de l'air, que seul l'échangeur peut encore fournir.

3.2. Bilan énergétique global et effet de l'infiltration d'eau

Le bilan énergétique global d'un puits canadien doit non seulement tenir compte des échanges sensibles et latents avec l'air, mais encore de la diffusion au travers de sa frontière. Un bel exemple du couplage entre ces différents flux est donné par l'immeuble commercial et administratif « Schwerzenbacherhof » près de Zürich [6]. Le puits canadien consiste en 43 tubes (diamètre : 25 cm, longueur : 23 m, entreaxe : 116 cm, surface d'échange totale incluant distribution et collecte : 900 m^2) qui passent à 75 cm en dessous du deuxième sous-sol (~6 m en dessous du sol). Un débit d'air variable pendant les heures de bureau (6'000 - 12'000 m^3/h en hiver, 18'000 m^3/h en été) permet de faire du préchauffage hivernal comme du rafraîchissement estival.

Une campagne de mesure d'une année transmise par l'Office fédéral de l'énergie indique que de l'eau s'infiltrerait régulièrement (la comparaison des mesure d'enthalpies et d'échanges sensibles témoigne d'évaporation tout au long de l'année sans jamais de condensation), ainsi que nous l'avons nous-mêmes observés sur d'autres systèmes. Des simulations en présence/absence d'infiltration permettent de comprendre l'effet de ces phénomènes sur les bilans énergétiques du puits canadien et de l'immeuble.

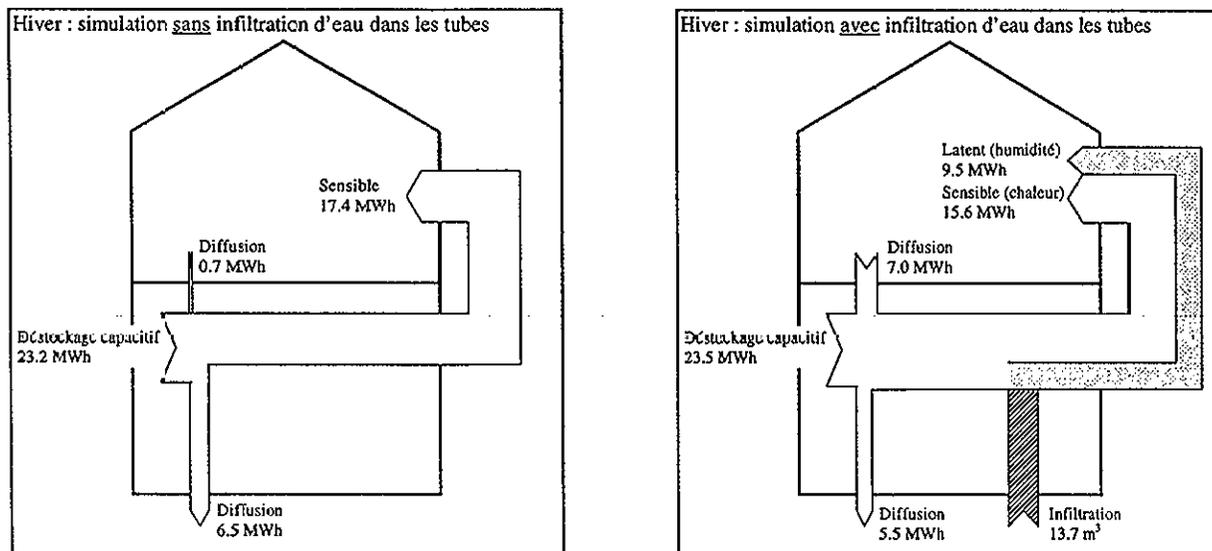


Fig. 4 : Superposition des bilan d'énergie (flux non-hachurés) et de matière (flux gris) pour le puits canadien « Schwerzenbacherhof » en hiver, avec et sans infiltration.

Ainsi on observe que la présence d'eau et la ponction de chaleur nécessaire à l'évaporer font baisser le préchauffage de l'air en hiver de quelques 20 %. Le plus grand effet va pourtant pour un accroissement de la diffusion de chaleur en provenance de l'immeuble, qui additionné à la baisse d'échange sensible avec le flux d'air fait finalement baissé l'apport global du puits canadien de 50 % ($15.6 - 7.0 = 8.6$ au lieu de $17.4 - 0.7 = 16.7 \text{ MWh}$).

4. POTENTIEL DE RAFRAÎCHISSEMENT

4.1. Rafraîchissement versus préchauffage

Le potentiel de préchauffage examiné ci-dessus, clairement lié au rôle de stockage capacitif du sol, indique la possibilité réciproque de faire du rafraîchissement estival. Il est cependant important de comprendre les différences fondamentales de ces deux prestations et le rôle que peut y jouer le puits canadien :

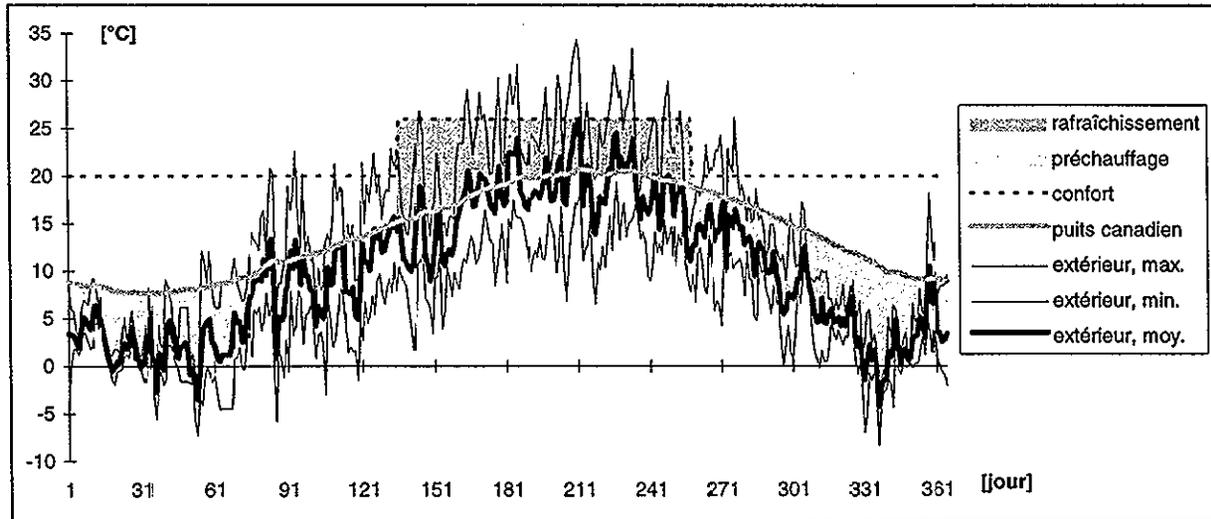


Fig. 5 : Profil de température en ville de Genève ainsi que potentiels de préchauffage et rafraîchissement du puits canadien des « Caroubiers ».

Alors qu'en hiver la température moyenne se trouve bien en dessous du seuil inférieur de confort de 20 °C, en été elle n'excède pas le seuil de confort supérieur de 26 °C (Fig. 5). Contrairement au préchauffage hivernal (accroissement de la température d'entrée), le rafraîchissement d'été consiste essentiellement à utiliser l'inertie du sol pour un lissage sur 24 heures à quelques jours, et éviter ainsi les poussées en température diurnes liés aux importants flux solaires. Il s'en suit que si le potentiel de préchauffage d'un puits canadien est proportionnel à la différence de température entrée-sortie (réchauffement de l'air), le potentiel de rafraîchissement est quant à lui proportionnel à la différence de température confort-sortie (permettant le rafraîchissement de l'air dans le bâtiment). Un bon exemple de ce phénomène souvent mal compris vient de l'immeuble des « Caroubiers » décrit précédemment, dans lequel l'air qui circule à proximité immédiate du parking (jusqu'à 23 °C en été) est globalement réchauffé par le puits canadien (2'800 kWh) sur la période d'été. L'utilisation du puits canadien permet cependant de bénéficier d'une température très stable (amplitude journalière de moins de 0.2 K) située en dessous de 26 °C et dégageant un potentiel de rafraîchissement de 19'600 kWh. L'utilisation réelle de ce potentiel dépend bien entendu de l'enveloppe du bâtiment (isolation thermique et protection solaire) et de son utilisation (gains internes).

Le renouvellement d'air, énergétiquement négatif en hiver et donc maintenu à un taux minimum, s'avère ainsi avantageux en été, lorsqu'il traverse un stock tampon comme un puits canadien. Le débit d'air peut alors être élevé à des taux bien plus importants de quelques vol/h, dégageant un accroissement proportionnel du potentiel de rafraîchissement, limité cependant par le coefficient d'échange air/sol. Or pour l'amortissement d'une oscillation (qui s'effectue sur la longueur de pénétration) ce coefficient est plus important que pour l'amortissement d'un différentiel sur forte profondeur, tel que celui du préchauffage saisonnier (voir calcul analytique dans l'encadré ci-dessous). On veut pour preuve de cette élasticité les résultats de simulation d'une configuration alternative pour les « Caroubiers », comprenant un débit d'air estival trois fois supérieur (8800 m³/h jour et nuit, par des tubes de plus grand diamètre afin de maintenir les pertes de charge à même niveau) qui permet

En pondérant les gains de chaleur par une efficacité globale de 75 % pour le système de chauffage auxiliaire, on obtient un coût du kWh extrait de 24 et 10 cts (centimes suisses) respectivement pour les configurations « tel quel » et « optimisée » (compte non tenu de la baisse de rendement dû à l'échangeur sur air vicié, cf. Sec. 3.1), valeurs qui restent supérieures au coût du combustible de 3 cts/kWh.

Le potentiel de rafraîchissement, pondéré quant à lui par un coefficient de performance de 2 relatif à l'air conditionné, donne un coût de l'énergie de froid de 33 et 26 cts/kWh respectivement pour les configurations « optimisée » à débit normal et tel quel à « haut débit d'air ». Ces valeurs doivent être comparées au prix de l'électricité (coûts moyen et en heure de pointe de 20 et 28 cts/kWh respectivement) auquel il conviendrait d'ajouter le remboursement de capital pour l'air conditionné (qui peut le cas échéant être évité), le rafraîchissement inertiel revenant ainsi moins cher que des techniques de froid classiques.

Configuration nom	long. débit		Capital		Préchauffage (seul)			Rafraîchissement (seul)		
	m	m ³ /h	invest. Fr	remb. Fr/an	gains kWh/an	coûts cts/kWh	coûts eq. cts/kWh	gains kWh/an	cost cts/kWh	eq. cost cts/kWh
tel quel	50	3'000	137'000	8'700	27'100	32.1	24.1	19'600	44.4	88.7
optimisée	25	3'000	48'000	3'050	22'400	13.6	10.2	18'400	16.6	33.1
haut débit d'air	50	8'800	137'000	8'700	25'700	33.9	25.4	66'800	13.0	26.0

Remboursement à 6% sur 50 ans.

Table 2 : Coût (francs suisses) des énergies de préchauffage et rafraîchissement pour le puits canadien des « Caroubier ».

6. CONCLUSIONS

L'analyse détaillée de systèmes de tubes enterrés existants en Suisse, étoffée de simulations numériques et de calcul analytique, nous amène aux conclusions suivantes :

- En Europe Centrale les contraintes entre climat et seuils de confort induisent une asymétrie fondamentale entre potentiels de préchauffage et de rafraîchissement avec utilisation du sol comme stock saisonnier : le préchauffage du renouvellement d'air (accroissement hivernal de la température extérieure) a une fonction d'économie sur la consommation énergétique, qui en limite le potentiel par minimisation du débit d'air ; le rafraîchissement inertiel (amortissement en dessous du seuil de confort des fluctuations journalières en été) peut au contraire être accru par augmentation du débit d'air et devenir ainsi une prestation énergétique à part entière.
- Le coût du préchauffage reste supérieur à celui du combustible, qu'il ne peut généralement pas substituer complètement. Cette technique entre par ailleurs en compétition avec la récupération de chaleur sur l'air vicié, plus efficace. Le rafraîchissement inertiel s'avère au contraire compétitif par rapport à l'air conditionné, qu'il peut permettre d'éviter, économisant alors à la fois les coûts en capital, l'électricité et les gas à CFC. Vu sous cet angle le préchauffage hivernal devient alors une prestation supplémentaire, qui peut être couplée à d'autres techniques de préchauffage.
- Les systèmes de tubes enterrés peuvent être sujets à de l'infiltration d'eau. Tout en affectant le préchauffage négativement et le rafraîchissement positivement, ceci soulève la question sanitaire posée par l'eau stagnante. Cette problématique peut être évitée en remplaçant les tubes à air par un circuit fermé à eau, couplé à un échangeur de chaleur sur

l'aspiration d'air frais. Une telle configuration, réalisée à Genève et actuellement analysée par nos soins, semble par ailleurs se satisfaire d'un investissement faible.

- Comme pour tout système basé sur les énergies renouvelables, la mise en place de systèmes à tubes enterrés nécessite un dimensionnement attentif, avec des outils ad hoc. En parallèle au développement de modèles de simulation détaillés qui ne sont pas toujours à la mesure du travail d'ingénieur, nous travaillons à la définition de règles du pouce, dont l'un des paramètres important au niveau économique est la profondeur des tuyaux et le couplage résultant avec la température de surface, des résultats préliminaires indiquant que la profondeur d'excavation devrait être maintenue à des valeurs minimales.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Thierry Boulard (Institut national de recherches agronomiques, Avignon, France) pour nous avoir transmis le modèle numérique développé à l'origine dans son institut ; Robert Weber et Markus Koschenz (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, Dübendorf) pour lecture critique et conseils lors de l'adaptation à TRNSYS ; Antoine Reist (Station agronomique de Changins, Conthey), Pierre Jaboyedoff (Sorane SA, Lausanne) et Javier Gil (P&A Partners, Cochabamba, Bolivie) pour leur collaboration au projet GEOSER ; Jean Putallaz (Ingénieur-conseil, Genève) pour sa collaboration au projet Caroubier ; Mark Zimmermann (Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, Dübendorf) pour les mesures de Schwerzenbacherhof ; Eric Pampaloni (Université de Genève) pour son apport technique ; L'Office fédéral de l'énergie (Bern) et l'Office cantonal de l'énergie (Genève) pour leur appui financier.

RÉFÉRENCES

1. Hollmuller P. et Lachal B. : Cooling and preheating with buried pipe systems : monitoring and simulation of installations in Switzerland. Proceedings of PLEA'99, à paraître, Brisbane, 1999.
2. Boulard T., Razafinjohany E., et Baille A. : Heat and vapour transfer in a greenhouse with an underground heat storage system (Part 1+2). Agric. For. Meteorol., 45, pp. 175-184, 1989.
3. Hollmuller P., Lachal B. : TRNSYS compatible moist air hypocaust model. Final report, Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie, Genève, 1998.
4. Lachal B., Hollmuller P., Gil J. : Stockage de chaleur : résultats de GEOSER, in Stockage de chaleur, gestion de l'énergie et du climat dans les serres horticoles. Recueil des exposés du colloque GEOSER du 15 février 1996 au RAC Conthey, Office fédéral de l'énergie, 1996.
5. Putallaz J., Lachal B., Hollmuller P., Pampaloni E. : Evaluation des performances du puits canadien de l'immeuble locatif du 19 rue des Caroubiers, 1227 Carouge. Expertise, Centre universitaire d'études des problèmes de l'énergie, 1205 Genève, 1996.
6. Zimmermann M. : The Schwerzenbacherhof Office and Industrial Building, Switzerland : Ground Coupled Ventilation System. IEA Low Energy Cooling Task, 1995.
7. Hollmuller P., article en préparation.