

Etude numérique des « puits canadiens » pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments

Raluca Hohotă, Iolanda Colda, Dumitru Enache, Mihai Găvan, Ruxandra Enache

Université Technique des Constructions Bucarest
Bdul. Lacul Tei nr. 124, Bucarest, Roumanie – 020396,
hohota@instalatii.utcb.ro

RESUME. Ce travail fait partie d'un projet de recherche qui vise la proposition des solutions afin de diminuer les consommations énergétiques pour ventilation et climatisation des bâtiments en Roumanie. Les résultats présentés ici sont issus d'un modèle numérique concernant le comportement d'un puits canadien introduit dans le système de ventilation d'un bâtiment situé à Bucarest. Le modèle numérique mis au point permet l'évaluation précise des économies d'énergies engendrées par l'adjonction d'un puits canadien au bâtiment. Le travail présente aussi une étude paramétrique concernant les grandeurs caractéristiques d'un puits canadien : débit d'air, longueur et diamètre.

MOTS-CLÉS : puits canadiens, modélisation numérique, TRNSYS

ABSTRACT. This study is a part of a research project concerning solutions to reduce energetic consumptions for building HVAC systems in Romania. The data presented here are the result of earth-air heat exchanger numerical model within a ventilation system for a dwelling in Bucharest. The numerical model gives accurate assessments regarding energetic savings due to use of earth-air heat exchanger. The paper is dealing also with parametric study concerning the earth-air heat exchanger behavior in function of its principal parameters: air flow rate, length, and diameter.

KEYWORDS : earth-air heat exchanger, numerical model, TRNSYS

1. INTRODUCTION

Le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche de Roumanie, par l'intermédiaire de l'Agence Nationale de la Recherche Scientifique, finance actuellement un projet proposé par l'Université Technique des Constructions de Bucarest qui vise l'étude des solutions afin de diminuer les consommations énergétiques pour ventilation et climatisation des bâtiments.

Une proposition dans ce sens consiste à intégrer dans les systèmes de ventilation la technique basée sur les « puits canadiens » ou « puits provençal ». Ce travail présente ainsi les résultats obtenus suite à une étude numérique concernant l'efficacité d'un tel système appliqué pour une maison individuelle située près de Bucarest.

2. PUIITS CANADIEN

Dans le contexte mondial de réduction des émissions et de protection du milieu environnant, les solutions alternatives ont bénéficié d'un grand développement dans les dernières années et de plus en plus les gens prennent en compte ces solutions pour leur espace de logement. Parmi ces nouvelles solutions on a le puits canadien. Le « puits canadien » est sorti peu à peu de l'oubli à partir de 2003, suite à la canicule, et grâce à la visibilité croissante des énergies renouvelables. S'il existe de

nombreuses solutions écologiques pour produire de la chaleur, les solutions alternatives à la climatisation sont peu nombreuses. Le puits canadien est l'une d'elle, la plus facilement transposable sur l'habitat individuel.

2.1. PRESENTATION DU SYSTEME ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'utilisation du sol comme source thermique, appelée la géothermie, est connue depuis l'époque des Romains (des archéologues ont en effet trouvé des exemples de puits canadien qui datent de cette époque). Depuis quelques années, cette source d'énergie a connu un regain d'intérêt, le puits canadien pour le préchauffage ou le rafraîchissement de l'air de ventilation étant une de ses applications principales. La terre à deux mètres de profondeur a une température pratiquement constante tout au long de l'année, elle varie entre 5°C et 13...15°C selon les saisons alors que l'air extérieur peut varier de -15°C à +35°C dans la plupart des climats roumains. Un puits canadien va exploiter cette température constante : l'air, au lieu d'être pris directement de l'extérieur, va circuler dans un collecteur enterré au contact avec le sol pour en échanger ses calories. Le principe de fonctionnement consiste ainsi à faire passer de l'air dans des tuyaux enterrés avant d'être soufflé dans la maison (Figure 1) : *en hiver*, la température du sol est environ égale à 5°C, elle est plus élevée que la température de l'air extérieur, donc l'air froid est préchauffé lors de son passage dans les tuyaux ; *en été*, c'est le contraire, la température du sol est plus basse que la température de l'air extérieur, elle est environ à 13°C, cette fois-ci l'air extérieur est pré-refroidi lors de son passage dans les tuyaux ; *en intersaisons*, le réseau de canalisations a moins d'intérêt ; la température de l'air extérieur est la température de confort, comprise entre 18°C et 22°C. Le système sera déconnecté en cas de besoin par l'intermédiaire d'un by-pass pour ne pas obtenir l'effet inverse pendant ces périodes (Figure 1).

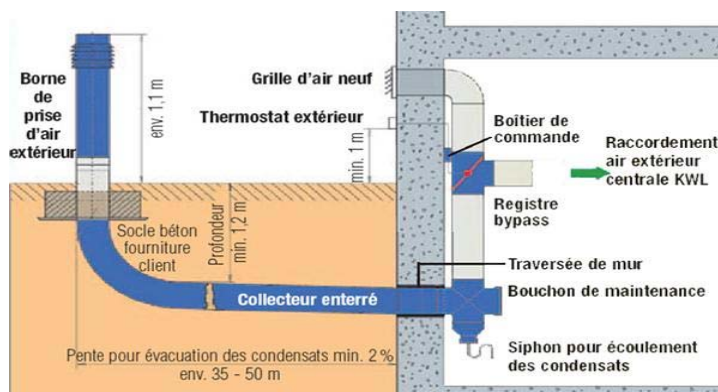


Figure 1 : Schéma de principe d'un puits canadien

2.2. ELEMENTS COMPOSANTS. MISE EN ŒUVRE ET DIMENSIONNEMENT

Le puits canadien fait toujours partie d'un ensemble d'installation de ventilation du bâtiment (rappelons que le renouvellement d'air dans un bâtiment est très important pour la santé des gens et de la construction, car elle permet de créer et maintenir une atmosphère saine et agréable). Les principaux éléments d'une telle installation sont : *prise d'air*: l'élément par lequel l'air rentre dans la maison, il est situé en départ de circuit ; pour un bon fonctionnement du puits, les prises d'air sont des éléments complets qui comprennent : grille à mailles fines dont le but est d'empêcher les petits rongeurs de pénétrer dans le collecteur ; chapeau de protection ou des ailettes orientées pour empêcher les eaux de pluie de rentrer dans le collecteur ; préfiltration (efficacité G2 à G4) dont l'objectif est de limiter l'encrassement du collecteur ; *canalisation*: le diamètre est déterminé par le débit d'air calculé en

amont (en général entre 160 et 250 mm à l'intérieur parce que un diamètre supérieur ne permet pas un échange uniforme, bon en périphérie mais mauvais au centre) ; pour un échange optimal, l'air ne dépasse pas 2 m/s dans le puits, plus la vitesse est importante et moins l'air se réchauffe ou refroidit (afin d'obtenir un échange correct, l'air doit passer plus de 20 secondes sous terre) ; le choix du matériau va prendre en compte de nombreux paramètres : la mise en œuvre du conduit et caractéristiques du sol, la durée de vie du conduit et son étanchéité, la non émissivité de polluants du conduit, la non rugosité des parois du conduit, le traitement antistatique des surfaces intérieures, le traitement antibactérien, etc. ; *ventilateur* : il est nécessaire pour assurer le débit d'air (il peut être contrôlé par un thermostat et possède souvent un variateur de vitesse).

Le dimensionnement d'un puits canadien doit se faire avec une approche globale de la ventilation du bâtiment. Le dimensionnement d'un tel équipement peut être en fonction des paramètres principaux ci-dessous : *débit d'air nécessaire* : il est déterminé en fonction du volume à ventiler ainsi que des débits minimums à respecter selon la réglementation ; il peut aussi être en fonction du choix de la ventilation (VMC, aération naturelle, ...), ou encore de l'architecture du bâtiment (bioclimatique, isolation, ...) ; *longueur* : plus la longueur est importante, plus la température de l'air sera proche de celle de la terre, une longueur privilégiée se situe entre 40 et 50 m ; à partir d'une certaine longueur, l'augmentation de longueur ne prouve que des gains très faibles ; *diamètre* : un diamètre de 20 cm semble bien adapté ; en effet, plus le rayon est grand, plus le coefficient d'échange convectif entre le tube et l'air est faible ; une section plus importante créera un flux au centre du tuyau qui ne touchera pas les parois, le réchauffement ou le rafraîchissement de l'air dans la conduite est alors inégal, d'où un mauvais échange ; mais il se trouve qu'il existe un diamètre critique qui est de 52 cm, au dessus duquel l'augmentation de la surface d'échange permet de compenser la diminution du coefficient d'échange (Kumar *et al.*, 2003) ; *vitesse de l'air* : il ne faut pas que la vitesse de l'air qui traverse le puits canadien soit trop importante, sinon il n'y aura pas suffisamment d'échange entre l'air et le sol ; en principe, cette vitesse ne doit pas dépasser 3 m/s ; *type du sol* : il est possible de regrouper les textures du sol dans quatre catégories principales (Duchaufour, 2001) : texture sableuse - sol bien aéré, pauvre en réserves d'eau, faible capacité d'échange anionique et cationique ; texture limoneuse - l'excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés thermo physiques ; texture argileuse - sol chimiquement riche mais à mauvaises propriétés physiques, milieu imperméable et mal aéré et texture équilibrée - elle correspond à l'optimum, elle présente la plupart des qualités des trois types précédents, sans en avoir les défauts (exemple : 25% d'argile, 30 à 35% de limons, 40 à 45% de sable). La présence ou non d'une nappe phréatique peut aussi être un paramètre important, car elle peut être une source de chaleur ; *profondeur* : plus la profondeur est importante, plus la variation de la température du sol est faible, et donc plus le puits canadien profite de la géothermie ; mais cette profondeur peut dépendre du climat, de la nature de sol, ou encore de la zone de passage du tube, ou de l'endroit où l'air est capté (au soleil ou à l'ombre) ; En général, il faut au minimum une profondeur de 1,5 m.

Peu de règles de dimensionnement simples existent pour un puits canadien. Il existe une méthode graphique utilisant une méthode de NUT (nombre d'unités de transfert) qui n'est pas très évidente à utiliser (De Paepe *et al.*, 2003). En revanche une « règle du pouce » simple et facile à comprendre est définie par (Hollmuller, 2002) basée sur une solution analytique développée à partir des équations de chaleur. Les paramètres nécessaires pour cette règle sont : le débit d'air [m³/h], la surface d'échange

[m²] et la fréquence journalière ou annuelle (le puits étant dimensionné pour une utilisation journalière ou annuelle).

Le dimensionnement des puits canadiens et l'influence de tous ces paramètres ont été étudiés numériquement afin de quantifier l'importance de chacun par rapport à l'économie d'énergie engendrée.

3. MODELISATION NUMERIQUE

Le modèle numérique a été développé au sein du logiciel TRNSYS qui est un outil flexible, modulaire conçu pour simuler les performances énergétiques de systèmes dynamiques. Il est commercialement disponible depuis 1975. TRNSYS est aujourd'hui un outil de référence au niveau mondial dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes. Quelques 50 familles de composants (« types »), disponibles en standard dans une bibliothèque, permettent de simuler, en régime transitoire, les bâtiments (mono ou multi zonaux), les systèmes de chauffage et de climatisation, les plus simples comme les plus complexes, y compris les systèmes solaires innovants. Des composants utilitaires permettent de coupler la simulation avec les conditions météorologiques, des plans d'occupation, d'utilisation de différentes formes d'énergie, et de générer les fichiers de résultats souhaités.

On présente en ce qui suit les principaux types utilisés au sein de la simulation ainsi que l'interface du modèle (Figure 2).

- Type 109 TMY2 –fichier météo (“weather data”) : cette composante a l'objectif principal la lecture des données météorologiques à intervalles réguliers à partir d'un fichier de données, la conversion à un système désiré d'unités et de transformation du rayonnement solaire afin d'obtenir des données de rayonnement en surface inclinée et l'angle d'incidence pour un nombre arbitraire de surfaces ; dans ce mode, Type 109 lit un fichier de données météorologiques dans la norme TMY2 format. Le format TMY2 est utilisé par le « National Solar Radiation Data Base » (USA), mais TMY2 fichiers peuvent être générés par de nombreux programmes, tels que Meteonorm. Dans notre étude on a utilisé le fichier météo avec les données pour la ville de Bucarest. Ces données contiennent la température extérieure, l'humidité de l'air et les radiations solaires (directes, diffuses et globales).

- Type 56 a – le modèle de bâtiment (« building ») : cette composante modèle le comportement thermique dynamique d'un bâtiment ayant jusqu'à 25 zones thermiques.

- Type 501 – le modèle de sol : cette composante modèle la distribution verticale de la température du sol compte tenu de la température moyenne de la surface du sol pour l'année, l'amplitude de la température de surface du sol pour l'année, la différence de temps entre le début de l'année calendrier et l'apparition du minimum de la température de surface et la diffusivité thermique du sol. Ces valeurs peuvent être trouvées dans une variété de sources, y compris l'ASHRAE Manuels (Klein *et al.*, 1996).

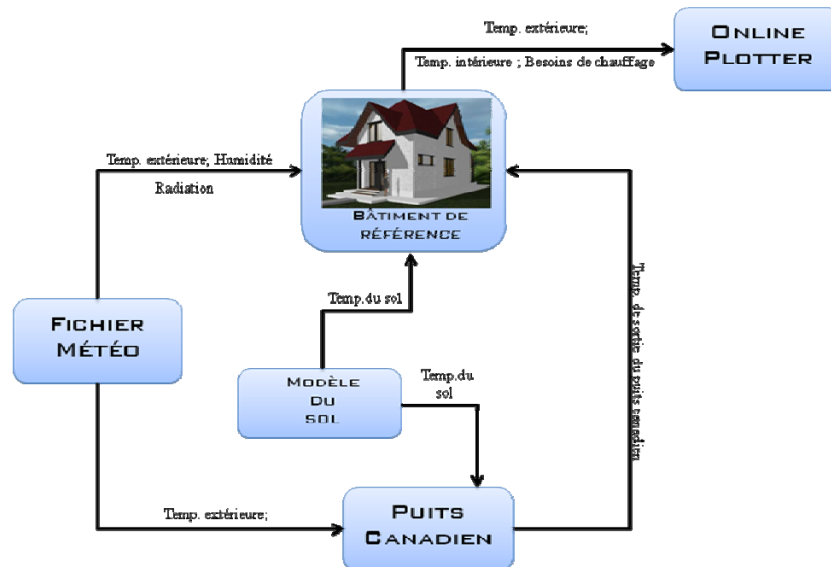


Figure 2 : Schéma du base du modèle numérique

- Type 31b – modèle de tuyau enterré : ce type nous permet de simuler notre tuyau enterré de telle manière qu'on peut l'utiliser dans cette étude. A l'origine c'est un tuyau parcouru par de l'eau, mais ici on a changé les paramètres initiaux du tuyau en remplaçant les propriétés de l'eau (densité, chaleur spécifique, ...) avec les propriétés de l'air.

4. RESULTATS

Le bâtiment pris en compte dans l'étude est caractéristique pour les nouveaux logements individuels construits à présent autour de Bucarest. La maison a une surface habitable d'environ 45 m²/étage, avec une hauteur des locaux de 2,7 m (volume total : 370 m³ pour RDC et 2 étages). Les gains intérieurs ont été pris conformément à la Norme Européenne ISO 13790, valeur normée : 4 W/m² (EN ISO 13790, 2005). Les principales caractéristiques de l'enveloppe sont les suivantes : *murs extérieurs* : brique alvéolée (épaisseur 0,25 m) et à l'extérieure polystyrène expansé (épaisseur 0,05 m) ; *toiture* : laine de verre (épaisseur 0,1 m), bois léger (épaisseur 0,1 m) et tuile (0,015 m) ; *plancher sur terre plein* : isolant – mousse de polyuréthane (épaisseur 0,15 m) ; *fenêtres* : double vitrage argon à faible émissivité ($U_{fen} = 1,55 \text{ W/m}^2\text{°C}$; $U_{j-n} = 1,35 \text{ W/m}^2\text{°C}$).

Les modélisations comprennent deux parties : situation d'hiver (préchauffage de l'air) et situation d'été (l'air extérieur est pré-refroidi)

En ce qui concerne le préchauffage de l'air en hiver, le puits canadien pris en compte a les caractéristiques suivantes : longueur : 50 m ; diamètre : 20 cm ; débit d'air : 185 m³/h (taux de renouvellement d'air : 0,5 h⁻¹) ; profondeur : 2 m.

On peut voir dans la Figure 3 l'évolution de la température du puits canadien par rapport à la température extérieure. On peut constater que l'air à la sortie de puits canadien se retrouve à une température relativement constante (environ 10°C) sur toute l'année.

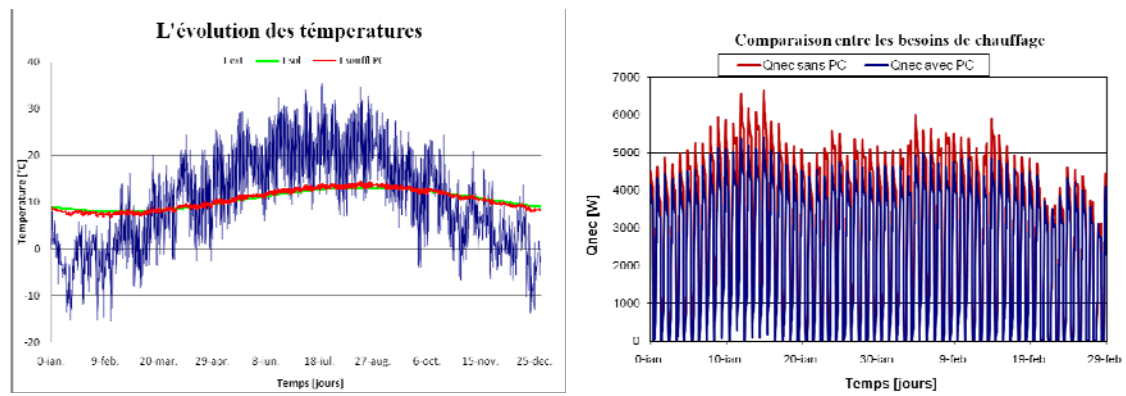


Figure 3 : Températures caractéristiques de la simulation et comparaison des besoins de chauffage avec/sans puits canadien

Pour mieux comprendre l'apport énergétique du puits canadien, on a comparé, toujours dans la Figure 3, les besoins de chauffage avec/sans puit canadien. L'économie qui en résulte pour le chauffage dans le cas où on utilise le puits canadien est d'environ 15% sur 2 mois (janvier et février).

Pour ce qui est du fonctionnement en été (avec les mêmes caractéristiques du puits canadien), dans la Figure 4 on peut voir une comparaison très suggestive entre les températures intérieures et les températures de soufflage du puits canadien dans les cas des différents taux de renouvellement de l'air intérieur. Les températures intérieures diminuent avec l'augmentation des débits d'air en obtenant dans la période estivale des températures intérieures très proches des températures du confort thermique.

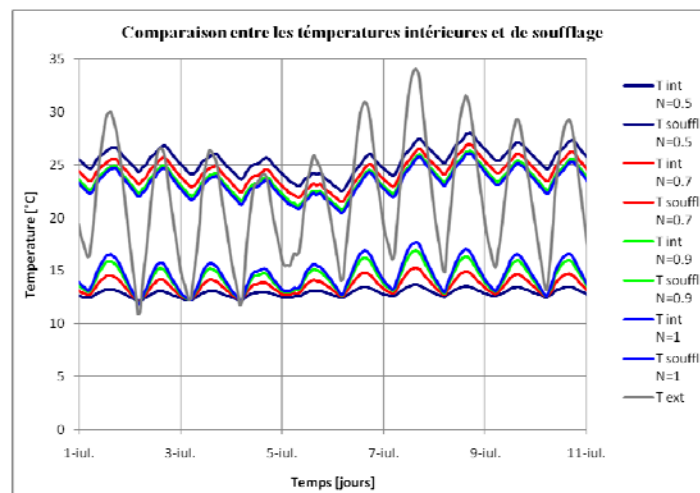


Figure 4 : Comparaison des températures intérieures et températures de soufflage (période : 1-11 juillet)

On présente en ce qui suit les résultats principaux issus d'une étude paramétrique (basée sur plus de 300 simulations) concernant le comportement thermique du puits canadien en été. La sortie principale suivie a été le flux de chaleur « fourni » par le puits canadien en faisant varier les débits d'air, les longueurs et les diamètres (les diamètres utilisés sont de 5, 10, 15, 20 et 25 cm ; les longueurs des gaines de 0 à 100 m et les débits d'air correspondent aux taux de renouvellement de 0,5 ; 0,6 ; 0,7 ;

0,8 ; 0,9 et 1 h⁻¹). Dans les figures suivantes on voit l'influence de ces paramètres sur le flux de chaleur calculé avec la formule suivante :

$$\varphi = c_{air} * \rho_{air} * D(T_{souffli} - T_{ext}) \quad [1]$$

où : c_{air} – chaleur spécifique de l'air – 1 [KJ/kg° C] ; ρ_{air} – densité de l'air [kg/m³] ; D – débit volumique d'air [m³/s] ; $T_{souffli}$ – température de sortie du puits canadien [° C] ; T_{ext} – température extérieure de l'air [° C].

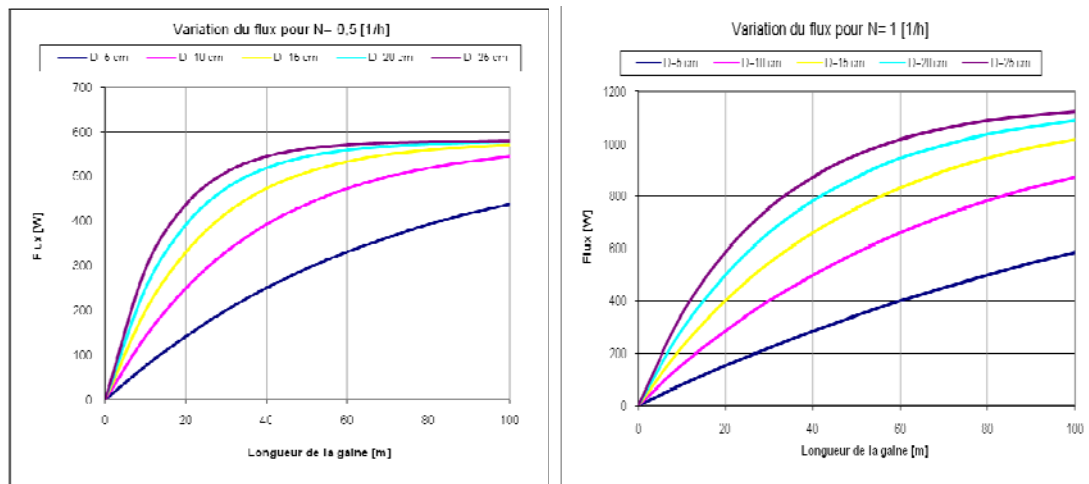


Figure 5 : Variation du flux en fonction de diamètre pour différents débits d'air

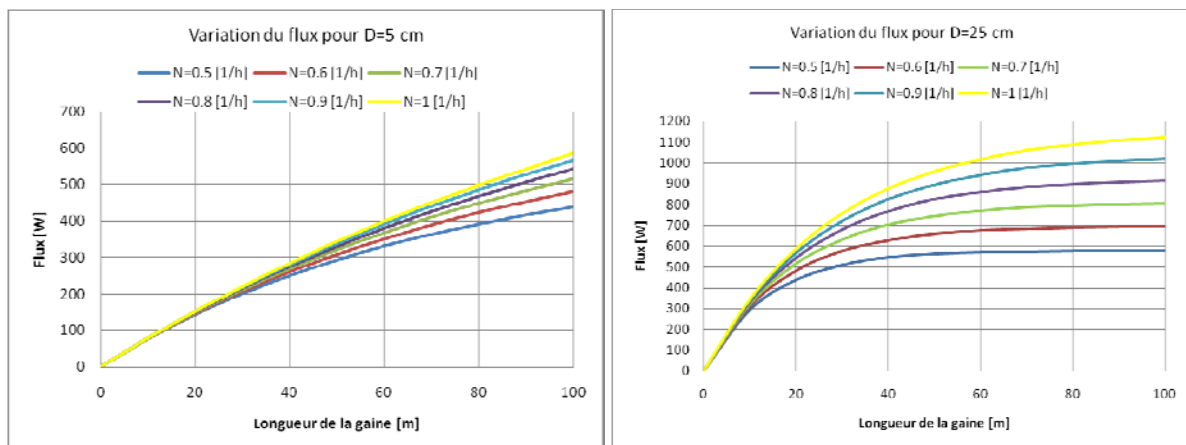


Figure 6 : Variation du flux en fonction de débit d'air pour différents diamètres

A partir des données présentées dans la Figure 5, on constate une meilleure efficacité avec les diamètres compris entre 10...20 cm par rapport au diamètre de 5 cm qui n'a pas des valeurs assez importantes pour les flux récupérés et aussi parce que ce diamètre, qui est assez petit, introduit des pertes de charge importantes. La même conclusion pour le diamètre de 25 cm qui n'a pas une augmentation très importante du niveau de flux récupéré par rapport au diamètre de 20 cm, ne méritant pas l'investissement. Dans la Figure 6, chaque courbe atteint de manière asymptotique un palier qui représente le flux maximal récupérable, étant donnée la différence de température air soufflé/air

extérieur. Le diamètre de la gaine influe essentiellement sur la longueur de gaine nécessaire pour atteindre ce palier : plus le diamètre est petit, plus la longueur nécessaire est faible. La valeur de ce palier est uniquement déterminée par le débit d'air.

5. CONCLUSION

Un puits canadien est un échangeur air/sol qui représente une technique intéressante pour réduire la consommation d'énergie d'un bâtiment. La puissance de préchauffage d'un puits canadien n'est pas forcément très performante vis à vis de la récupération de chaleur sur air extrait pour les conditions climatiques de Bucarest, mais il peut être utilisé pour une mise hors gel des locaux. La puissance de rafraîchissement d'un puits canadien est beaucoup plus performante et permet aux bâtiments de se passer de la climatisation. Contrairement à la saison d'hiver, pendant laquelle la température de sortie des échangeurs terrestres reste contraignante (en dessous du seuil de confort inférieur de 20°C), l'amortissement des pointes estivales diurnes permet d'amener dans le bâtiment de l'air frais. Dès lors la prestation du puits canadien ne se limite plus à une économie énergétique, mais permet au contraire une production de frais à part entière: le débit d'air peut alors être élevé à des taux de ventilation plus importants (à condition de dimensionner le système en conséquence), permettant de ventiler le bâtiment avec de l'air frais et d'en extraire les excédents thermiques (du moins si ces derniers ne sont pas excessifs). Les résultats numériques ont mis aussi en évidence la longueur de gaine nécessaire pour atteindre le flux thermique maximal : celle-ci augmente avec le débit d'air et diminue avec le diamètre de la gaine.

6. BIBLIOGRAPHIE

Duchaufour P. (2001). *Introduction à la science du sol*. Paris, Dunod

EN ISO 13790 (2005) : *Performance thermique des bâtiments — Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage et le refroidissement des locaux*.

Hollmuler P. (2002). *Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments*. Thèse de doctorat, Université de Genève.

Klein S. A. et al. (1996). *TRNSYS, Version 14.2. User manual*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin

Kumar R., Ramesh S., Kaushik S.C. (2003). Performance evaluation and energy conservation potential of earth-air-tunnel system coupled with non-air-conditioned building. *Building and Environment*, vol. 38, n° 6, p. 807-813.

De Paepe M., Janssens A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, vol. 35, n° 4, p. 389-397.