

Simulation de l'efficacité énergétique d'un bâtiment sur fondations géothermiques

Vincent Partenay, Peter Riederer, Sandrine Pincemin

CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
290 route des Lucioles 06904 Sophia Antipolis
vincent.partenay@cstb.fr

RESUME.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet COFOGE (COncEption de FOndations GEothermiques), dont l'objectif est de faciliter l'introduction des installations de fondations géothermiques en France en identifiant les freins et les moteurs à leur développement. Le but ici est d'analyser le comportement énergétique d'une telle installation pour différentes configurations et d'identifier les cas pour lesquels elle pourrait être adaptée. Le système est simulé pour un bâtiment de bureaux type de 5000 m² pour deux types de chauffage : pompe à chaleur seule et pompe à chaleur combinée avec une chaudière à gaz. Deux modes d'émission dans le bâtiment sont également étudiés : ventilo-convecteurs et plafonds rayonnants. Les climats de Trappes et Nice sont utilisés pour effectuer les simulations. Enfin, 12 types de sol différents sont appliqués au système, prenant en compte ou non des écoulements souterrains. Le système est simulé dans l'environnement Trnsys et utilise les besoins horaires du bâtiment sur l'année obtenus au préalable et de manière indépendante. Les résultats sont principalement analysés sur des simulations annuelles mais les effets à plus long terme sont également abordés.

MOTS-CLÉS : Stockage thermique, Pieux énergétiques, Géothermie.

ABSTRACT.

This study has been carried out in the frame of the COFOGE project which aims to encourage the introduction of heat exchanger piles in France, identifying the pros and cons of this technology. The main objective is to analyse the energetic and thermal behaviour of this kind of system for different configurations and to identify in which cases its use could be appropriate. The installations are simulated for a 5000 m² office building equipped with two heating systems: heat pump only or heat pump combined with a gas boiler as backup system. The building is also equipped with two emitters: fan-coils and radiant ceilings. Climates from Trappes and Nice are used to run simulations. Finally, 12 different geological properties characterise the soil, including or not a groundwater flow. The system is simulated in Trnsys environment and uses the hourly loads of the building calculated independently. This study presents mainly simulations over one year but long-term effects are also covered

KEYWORDS : Thermal storage, Heat Exchanger Piles, Geothermal energy

1. INTRODUCTION

Les fondations géothermiques sont des ouvrages souterrains à double fonction. La première, d'ordre mécanique, consiste à reporter les charges d'un bâtiment en profondeur afin de le stabiliser. La seconde tire parti de l'enfouissement dans le sol en faisant circuler un fluide caloporteur dans un réseau de tubes situé à l'intérieur des fondations pour échanger de l'énergie thermique avec le terrain. Couplé à des pompes à chaleur, ce procédé peut s'avérer être une solution adaptée aux problèmes de consommations énergétiques des bâtiments, tant en chauffage qu'en refroidissement.

Le but de ce travail est d'évaluer, par le biais de la simulation, les performances énergétiques et l'impact environnemental des fondations géothermiques, en comparaison à un système de chauffage/refroidissement plus « conventionnel ».

2. DESCRIPTION DU BATIMENT

Le bâtiment est issu d'une typologie définie dans le cadre du projet « Objectif 100 » du Prebat. Il s'agit d'un bâtiment de bureaux de 5000 m², divisé en 5 étages avec une hauteur sous plafond de 3 m. La description générale d'un étage est présentée par la Figure 1 et dans le Tableau 1. Un étage est constitué de 5 zones dont les deux façades exclusivement de bureaux. Le long du centre du bâtiment se trouvent les salles de réunions, sanitaires et couloirs.

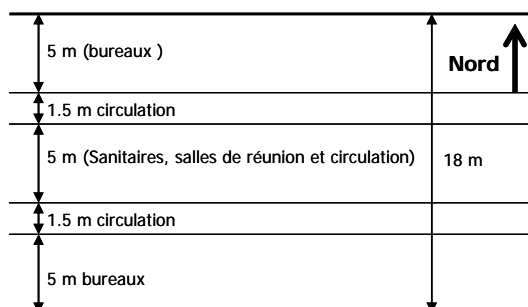


Figure 1 : Représentation schématique d'un étage courant

Ubat [W/(m.K)]	0,6 (parois opaques), 3 (baies), 0,3 (toitures)
Renouvellement d'air [m ³ /(h.personne)]	25 (bureaux), 30 (salle de réunion) 8h-20h la semaine - Arrêt le WE
Température de consigne [°C]	20 (hiver)-25(été), 15 en réduit de chauffage Arrêt climatisation hors occupation

Tableau 1 : Caractéristiques thermiques du bâtiment

Les caractéristiques thermiques principales du bâtiment sont résumées dans le Tableau 1 où sont listés les coefficients de déperditions utilisés ainsi que quelques informations sur le traitement d'air et consignes de chauffage/refroidissement.

3. CLIMATS

Le bâtiment a été simulé pour deux villes françaises aux climats distincts, Trappes et Nice, en utilisant les fichiers Meteonorm. Les besoins énergétiques du bâtiment calculés pour les deux villes sont présentés dans le Tableau 2.

Climat	Besoins énergétiques [kWh/m ² /an]					Répartition en pourcentage [%]			
	Chaud	Froid	Gains radiatifs	Gains convectifs	Total	Chaud	Froid	Gains radiatifs	Gains convectifs
Trappes	31,16	6,87	11,55	48,8	98,38	32	7	12	50
Nice	5,51	20,4	11,54	48,34	85,79	6	24	14	56

Tableau 2 : Détermination des besoins en chauffage et en refroidissement du bâtiment

Les puissances horaires issues de ce calcul sont ensuite utilisées en données d'entrée des différentes configurations de système de chauffage/refroidissement décrites ci-après.

4. SYSTEMES DE CHAUFFAGE/REFROIDISSEMENT SIMULES

4.1. CONFIGURATIONS

Deux configurations distinctes de fondations géothermiques sont simulées :

La première (PAC seule) n'utilise qu'une pompe à chaleur réversible, dimensionnée pour couvrir la totalité des besoins du bâtiment en chauffage et refroidissement. Lorsque la « capacité énergétique » des fondations est insuffisante, des sondes verticales supplémentaires sont ajoutées au système.

Dans la deuxième configuration un appoint de chauffage, de type chaudière à gaz, est placé en parallèle de la pompe à chaleur (PAC + Appoint) et fournit l'énergie supplémentaire nécessaire pour couvrir les besoins énergétiques du bâtiment.

Ces deux configurations sont comparées à une solution de référence composée d'une chaudière à gaz pour le chauffage et d'un groupe froid sur air extérieur pour le refroidissement.

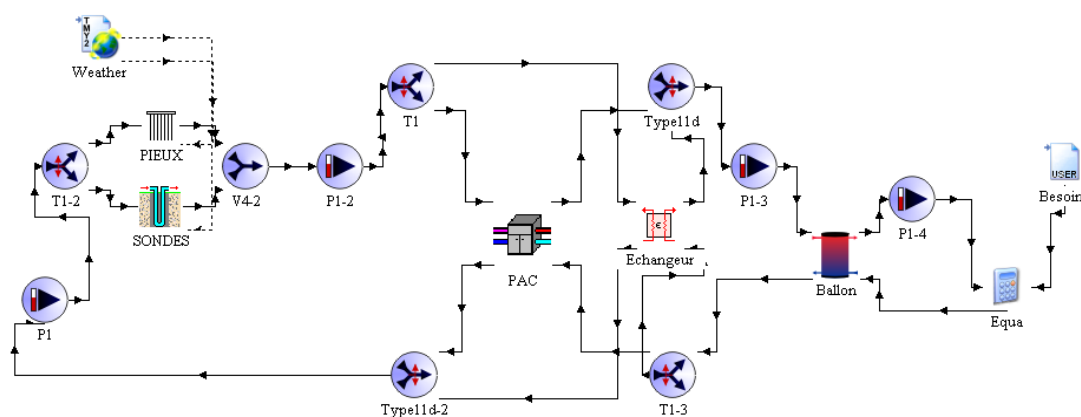


Figure 2 : Schéma de principe du système simulé avec TRNSYS – « PAC seule »

4.2. MODELES DE SIMULATION

Pour les pieux énergétiques c'est la version TRNVDSTP issue du « Duct Storage Model » (DST) qui a été utilisée [1]. Les phénomènes thermiques dans le sol sont décomposés en un problème global qui prend en compte le flux de chaleur dans la zone de stockage et un problème local qui calcule le transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et la zone de stockage. L'influence d'un écoulement est prise en compte de la même manière : en une composante globale et une locale. La première est une correction de température sur les couches de la zone de stockage et la seconde agit directement sur la température à la paroi de l'échangeur géothermique. L'influence d'un écoulement en dehors de la zone de stockage n'est pas prise en compte.

Les sondes verticales ont été simulées avec le type 557 de la bibliothèque TESS de TRNSYS, modèle également issu de l'algorithme DST.

Le "type" permettant de modéliser la pompe à chaleur a été créé à partir du modèle REFLIQ [5]. Il permet notamment la prise en compte du fonctionnement à charge partielle du compresseur, ainsi que

le fonctionnement du groupe hors des conditions nominales de températures, et ce, à partir de la donnée de différents points de fonctionnement (Tableau 3). Ce modèle de pompe à chaleur adapte sa puissance par rapport à une consigne qui se fait sur la température de sortie du condenseur en chauffage et sortie de l'évaporateur en refroidissement. En entrée du modèle, on dispose d'un signal de marche / arrêt de la PAC (l'arrêt étant caractérisé par des puissances délivrées / prélevées nulles coté condenseur/évaporateur tout en conservant les débits imposés). On dispose aussi d'un signal gérant la marche en chauffage / refroidissement, le modèle intègre donc la gestion de vannes liée à une marche réversible de PAC.

Régime de températures	Puissances Trappes [kW]			Puissances Nice [kW]		
	Chauffage	Refroidissement	Electrique	Chauffage	Refroidissement	Electrique
5/10°C (evap) 30/35°C (cond)	304	242	62	336	269	67
9/14°C (evap) 20/25°C (cond)	314	262	52	390	334	56
5/10°C (evap) 50/55°C (cond)	284	188	96	312	209	103

Tableau 3 : Régimes de température pour les deux émetteurs et les différentes solutions

4.3. STRATEGIES DE CONTROLE

4.3.1. Configuration "PAC seule"

Dans cette configuration, la PAC assure seule les besoins du bâtiment. Les fondations géothermiques ne pouvant assurer totalement ces besoins, des sondes verticales (d'une longueur fixe de 100 mètres) sont ajoutées à l'installation. La régulation se fait sur la température du fluide en sortie de PAC coté bâtiment. Cette température n'est évidemment atteinte que si la puissance requise par le bâtiment est inférieure à la puissance que peut fournir la PAC au régime de températures auquel elle fonctionne. Dans ce cas, il s'agit d'une modulation de puissance de la PAC, dans le cas contraire, la PAC marche à pleine puissance. Pour le refroidissement, un contrôle permanent de la température de sortie des pieux conditionne le basculement du système en freecooling lorsqu'elle devient inférieure à la température de consigne. La PAC est alors arrêtée, le fluide passe par un circuit parallèle et assure donc directement le refroidissement.

4.3.2. Configuration "PAC + Appoint"

L'appoint est placé en parallèle de la PAC et vient se substituer aux sondes verticales supplémentaires de la solution "PAC seule". Tant que cette dernière peut assurer la température de consigne, le fonctionnement est le même que pour la configuration "PAC seule". Dans le cas contraire, l'appoint est sollicité en parallèle de la PAC. La régulation de l'appoint est de type proportionnel-intégral. A cela s'ajoute une autre condition sur la température de fluide dans les pieux : en sortie de pieux, si le fluide est à une température inférieure à 2 °C, la PAC est automatiquement arrêtée et l'appoint seul assure le chauffage. Ceci afin d'éviter d'entrer dans des conditions de gel du sol. Comme pour la solution sans appoint le refroidissement peut se faire en freecooling ou de façon active.

4.4. EMISSION

Deux systèmes d'émission dans le bâtiment sont également prévus : ventilo-convecteurs et plafonds rayonnant. Les besoins énergétiques étant calculés par une simulation au préalable, la différence se fera uniquement par rapport aux régimes de température d'eau suivant le type d'émetteurs. Ces niveaux sont définis dans le Tableau 4.

Type d'émetteur	VCV	Plafond rayonnant
Eau chaude [°C]	80/60 (ref) – 50/45 (géothermie)	80/60 (ref) – 50/45 (géothermie)
Eau glacée [°C]	7/12 (ref et géothermie)	18/21 (ref et géothermie)

Tableau 4 : Régimes de température pour les deux émetteurs et les différentes solutions

5. TYPE DE SOL

Trois types de sol ont été retenus pour l'étude paramétrique. Pour chacun de ces types, un terrain de surface représente les premiers 10 mètres de profondeur. Ensuite, on rencontre soit une couche de sable fin, soit du gravier dense, soit du rocher altéré. Enfin, plusieurs types d'écoulements dans le sol (cas dit saturé) sont caractérisés par les propriétés thermiques de l'eau et les vitesses de Darcy suivantes : 0 m/j, 0.1 m/j et 0.5m/j (valeurs fournies par le BRGM). La valeur maximale de 0.5m/j peut être interprétée comme la limite entre recharge artificielle (cas du stockage) et recharge naturelle [7].

Les caractéristiques des sols sont listées dans le Tableau 5 :

Profondeur	Type de sol	Conductivité thermique [W/(m.K)]		Capacité calorifique [kJ/(m3.K)]	
		Sec	Saturé	Sec	Saturé
0 – 10 m	Silts ou argiles	0,2 – 0,3	1,2 – 2,5	300 – 600	2100 – 3200
10 – 18 m	Sables fins	0,3 – 0,4	2,0 – 3,2	1000 – 1300	2200 – 2400
10 – 14 m	Graviers	0,3 – 0,4	2,0 – 3,3	1200 – 1600	2200 – 2400
10 – 12 m	Calcaire	2,8 – 3,3	2,8 – 3,3	2200 – 2400	2200 – 2400

Tableau 5 : Propriétés des sols retenus

A partir des 10m de la première couche, une profondeur est associée au type de sol. Ainsi, les fondations sont ancrées sur une profondeur de 8m pour le sable fin, 4m pour le gravier dense et 2m pour le calcaire. Ces pieux sont au nombre de 50, avec un diamètre de 60cm, répartis sur approximativement 1000m² de surface au sol. Pour la configuration « PAC seule », le nombre de sondes supplémentaires (dont la longueur est fixée à 100m) est calculé par estimation des différences entre les besoins du bâtiment et puissances d'extraction/injection des pieux (estimées en prenant 50W/m pour le chauffage et 30W/m pour le refroidissement). On obtient, selon le type de sol, de 3 à 6 sondes pour Trappes et de 19 à 21 sondes pour Nice.

6. RESULTATS DE SIMULATION

6.1. COP ET ENERGIE PRIMAIRE

Les deux indicateurs de performances énergétiques des installations simulées présentés sont le COP annuel et la consommation d'énergie primaire. Le COP annuel se décline sous trois formes, une pour le chauffage, une pour le refroidissement (en général appelé EER) et une globale pour les deux réunis. De manière générale nous utilisons ici l'expression COP pour ces cas. Le COP a la forme suivante :

$$COP = \frac{\text{Energie thermique délivrée [kWh]}}{\text{Energie fournie [kWh]}}$$

Pour le chauffage, l'énergie thermique est la somme de l'énergie délivrée par la PAC (ou par la chaudière pour la solution de référence) et par l'éventuel appoint (solution « PAC+Appoint »). L'énergie fournie désigne quant à elle la consommation électrique de la PAC ou groupe froid et des auxiliaires de circulation dans les fondations géothermiques (dont le ventilateur dans le cas du groupe froid) et/ou l'énergie « fossile » à fournir pour faire fonctionner la chaudière gaz (référence ou

appoint). Pour le refroidissement, l'énergie thermique est la somme de l'énergie délivrée par la PAC (ou le groupe froid pour la référence) et de l'énergie obtenue par freecooling. Le COP global est le rapport de la somme des énergies thermiques délivrées par la somme des énergies fournies (pour le chauffage et le refroidissement).

Les consommations d'énergie primaire sont obtenues en utilisant les facteurs de conversion suivants : 2,58 pour l'énergie électrique et 1,0 pour l'énergie fossile [3].

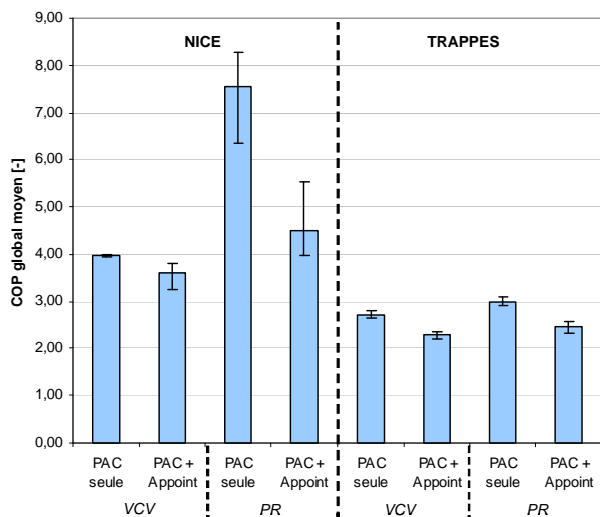


Figure 3 : Valeurs moyennes, minimales et maximales de COP global (sols non secs)

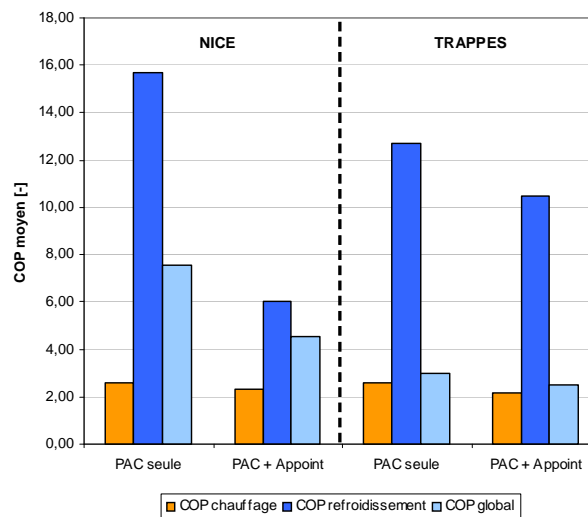


Figure 4 : COP chauffage, refroidissement et global pour solution avec plafond rayonnant

Dans cette partie, les installations sur sol sec (Tableau 5) ne sont pas traitées.

La Figure 3 présente les valeurs moyennes, minimales et maximales de COP global pour tous les types de sols (excepté les sols secs). Ces valeurs sont obtenues en fixant les températures initiales du sol à 14°C pour Nice et 12°C pour Trappes. Pour Nice les performances calculées sont très bonnes puisqu'on atteint dans le cas du plafond rayonnant (PR) un COP global de 7,6 pour la solution PAC seule et de 4,5 pour PAC + Appoint. C'est pour ces deux cas qu'on observe une influence des caractéristiques du sol plus prononcée : c'est surtout la variation de vitesse d'écoulement qui crée ces écarts. Comme le montre la Figure 4, le COP en refroidissement atteint des valeurs considérables pour les deux villes. Les besoins en refroidissement pour Nice étant très majoritaires par rapport aux besoins de chauffage (Tableau 2), l'influence des bonnes performances en refroidissement dans le COP global est plus prononcée que pour Trappes, surtout dans le cas de plafonds rayonnants. La solution PAC seule est composée de sondes supplémentaires : en moyenne 500m de longueur active de sonde pour Trappes et 2000m pour Nice, ajoutés à la longueur totale de pieux de 700m (moyenne pour les trois types de sol). Ceci entraîne une part de fonctionnement en freecooling supérieure à la solution PAC + Appoint. On obtient donc de meilleurs COP de refroidissement.

Les faibles différences de COP de chauffage entre les différentes configurations s'expliquent par un choix de température de départ dans le circuit d'émission identique entre VCV et plafonds rayonnants (Tableau 4).

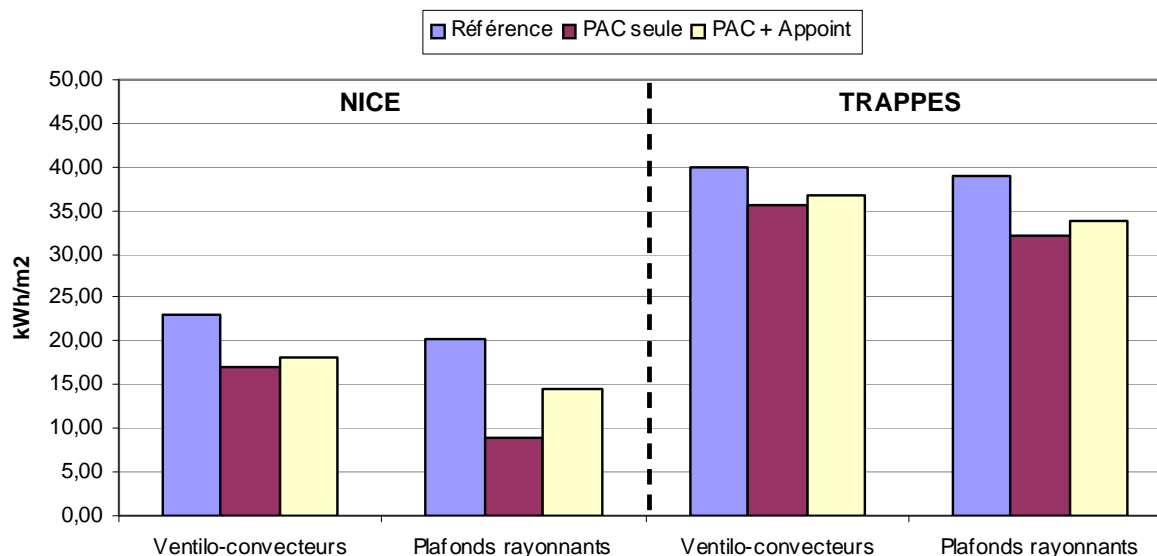


Figure 5 : Consommations d'énergie primaire (valeurs moyennes des sols non secs)

Au niveau des consommations primaires (Figure 5), on obtient dans tous les cas (toujours en excluant les sols secs) des valeurs inférieures à la solution de référence. La solution PAC seule étant la moins énergivore. On peut noter que pour Nice avec des plafonds rayonnants on a une consommation plus de deux fois inférieure à la solution de référence (9,0 kWh/m² contre 20,3 kWh/m²).

6.2. COMPORTEMENT ENERGETIQUE SUR LE LONG TERME

Les besoins énergétiques d'un bâtiment en chauffage et en refroidissement ne sont qu'exceptionnellement équilibrés sur l'année. On assiste donc à une évolution de la température moyenne de stockage du sol, laquelle, pour une installation correctement dimensionnée, tend à se stabiliser au bout de quelques années, phénomène assurant le maintien des performances du système. En effet on obtient, en comparant les consommations énergétiques totales sur 1 an avec la moyenne sur 25 ans, des surplus de 1,9 à 3,7% pour Nice et de -0,8 (soit une amélioration à long terme) à 5,1% pour Trappes.

6.3. IMPACT ENVIRONNEMENTAL

L'impact environnemental est évalué en termes d'émission équivalent CO₂. Les facteurs d'émission établis par l'Ademe [4] sont listés dans le Tableau 6 :

Electricité (saison de chauffage)	180 g/kWh
Electricité (saison de refroidissement)	40 g/kWh
Gaz (sur kWh PCI)	206 g/kWh

Tableau 6 : Facteurs d'émission équivalent CO₂

Les valeurs ci-dessus tiennent compte des émissions de gaz à effet de serre occasionnées pendant l'extraction, le traitement et le transport de ces énergies.

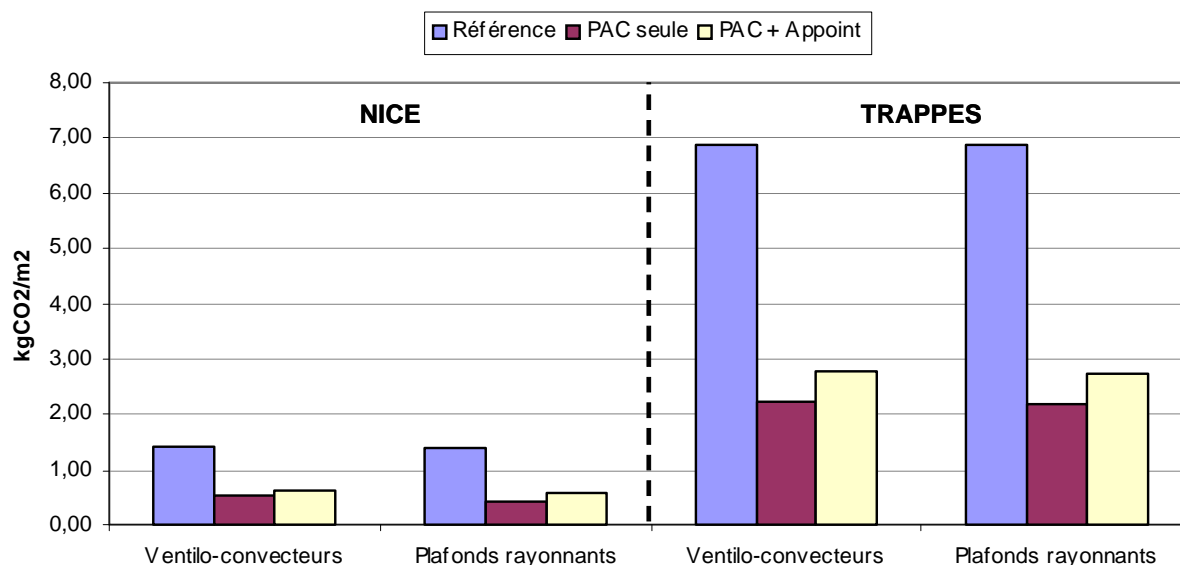


Figure 6 : Emissions CO₂ (valeurs moyennes des sols non secs)

Que ce soit dans la configuration « PAC seule » ou « PAC + Appoint » les émissions de CO₂ sont réduites de façon significative avec un facteur compris entre 2,5 et 3 par rapport à la solution de référence (Figure 6).

6.4. CAS DES SOLS SECS

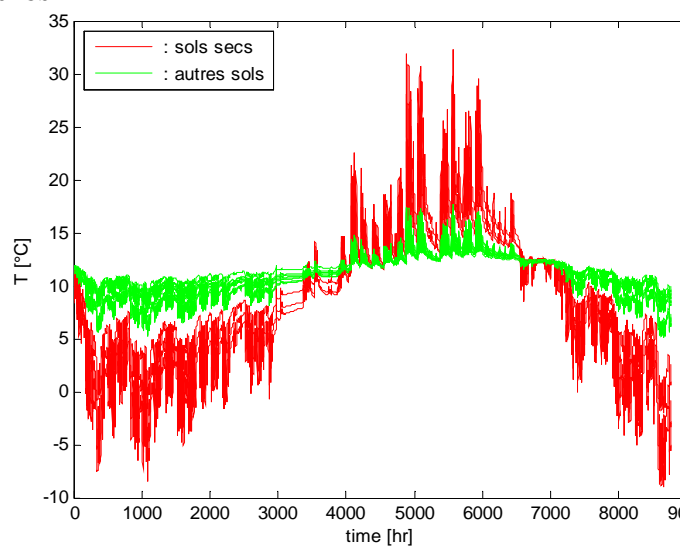


Figure 7 : Température au voisinage des pieux pour Trappes avec VCV sans appoint

Quelque-soit le type d'installation simulé, pour les 2 climats, on observe pour les sols secs des dérives de températures très importantes au voisinage des fondations géothermiques, ceci aboutissant à des valeurs de COP très faibles (pour Nice en VCV on observe même de valeurs de COP inférieures à 1). D'autre part on a un large dépassement des conditions de non gel (Figure 7) des fondations dans le cas de la ville de Trappes. Un sol sec, « thermiquement trop pauvre », est donc un facteur très défavorable aux systèmes sur fondations géothermiques. Le dimensionnement dans ce cas doit être fait avec une attention particulière pour s'assurer du bon fonctionnement.

7. CONCLUSION

Cette étude de bâtiment sur fondations géothermiques identifie et évalue l'influence de certains paramètres sur la rentabilité énergétique de tels systèmes. Excepté dans le cas d'un sous-sol trop sec, facteur compliquant la mise en place de ce procédé quelque-soit la configuration choisie, les performances des fondations géothermiques permettent d'assurer le chauffage/refroidissement à long terme d'un bâtiment de bureau en concurrençant l'association chaudière à condensation – groupe froid du point de vue énergétique. Le bénéfice en termes de consommations d'énergie primaire est très net avec l'utilisation de plafonds rayonnants. Les simulations ont présenté le climat de Nice comme étant plus favorable, ceci en raison de l'optimisation de fonctionnement par freecooling. Enfin, les émissions CO₂ se voient considérablement réduites par rapport à la solution de référence. A la vue des différences notables de résultats obtenus entre les deux climats choisis, il serait intéressant d'en étudier un panel plus large et ce pour d'autres types de bâtiments. L'association de cette technologie avec l'énergie solaire peut également être envisagée.

8. REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements aux partenaires du projet (BRGM, SOLETANCHE, ALTO, LOCIE) pour avoir fourni des informations nécessaires à cette étude.

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Pahud D., Fromentin A., Hadorn J-C. (1996). *The Duct Ground Heat Storage Model (DST) for TRNSYS used for the simulation of Heat Exchanger Piles, user Manual.*
- [2] Hellström G. (1991). *Ground heat Storage, Thermal Analyses of Duct Storage Systems. 1. Theory*, Thesis, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden.
- [3] RT2005 (2005). *Réglementation thermique CSTB*
- [4] ADEME (2006) : *Bilan Carbone®* : Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées.
- [5] Morisot O., Marchio D. (2002) *REFLIQ Groupe frigorifique de production d'eau glacée à condensation à air ou à eau*, Ecole des Mines de Paris, Centre énergétique
- [6] Roujol S., Marchio D. (2002) *PREPAC Utilitaire de détermination des caractéristiques des groupes frigorifiques fonctionnant en pompe à chaleur*, Ecole des Mines de Paris, Centre énergétique
- [7] Joliquin P., Parriaux A. (2002) *Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques – Méthodologie de détermination des zones potentielles*, EPFL