

MISE AU POINT D'UN SYSTÈME DE DÉNEIGEMENT DES ROUTES PAR CHALEUR EMMAGASINÉE EN SOUS-SOL SUR UNE LONGUE DURÉE

Etsuhiro Isobe, Kazuyuki Minda, Tsukuru Keino and Minoru Yamamoto

Division de l'environnement et de l'eau potable, Nippon Steel Corporation

Téléphone: +81-3-3275-7047 Télécopie: +81-3-3275-6781

E-mail : Adresse électronique: isobe.etsushiroh@eng.nsc.co.jp

1. Résumé

61% du territoire japonais, un archipel s'étendant en longueur du nord au sud, est occupé par des régions froides enneigées en hiver. Parallèlement au désenclavement rapide grâce à l'extension des circuits de distribution, l'on assiste à une demande croissante de moyens de déneigement des routes sans arrosage qui s'explique par la nouvelle nécessité d'assurer la mobilité même en hiver et de préserver un cadre de vie sécurisant dans les régions montagneuses, très froides ou de fort enneigement. Partant de ce constat, les auteurs poursuivent depuis plus de vingt ans des recherches sur une utilisation efficace de l'énergie naturelle dans un système de déneigement sans arrosage afin de réduire le coût d'exploitation et de protéger l'environnement et est finalement parvenue à mettre au point un nouveau système qui consiste à accumuler en sous-sol l'énergie thermique solaire estivale et à stocker cette énergie sur une longue durée (plusieurs mois) jusqu'à l'hiver. Parmi les différentes énergies naturelles que nous aurions pu exploiter, nous avons opté pour l'énergie thermique solaire en raison de sa présence quasi-uniforme dans les différentes régions du pays. Les principales caractéristiques de notre système de déneigement sont les suivantes : (1) En été, les tubes de radiation enterrés en dessous de la chaussée servent de collecteurs de chaleur solaire, et l'eau circulant dans les tubes de radiation évacue la chaleur dans le sol qui l'accumule. En hiver, la chaleur accumulée dans le sol est évacuée par les tubes de radiation pour faire fondre la neige. (2) L'accumulation de chaleur dans le sol est assurée par des forages qui sont un procédé peu coûteux à réaliser et peu exigeant en matière d'emplacement. Un tube d'échange thermique est inséré dans chaque forage pour assurer l'échange thermique entre le sol et l'eau circulant à l'intérieur de ce tube. (3) L'espace entre le tube d'échange thermique et la paroi du forage est rempli d'un coulis à haute conductivité thermique (coulis mélangé à de la poudre de charbon ou de fer) dans le but d'améliorer le rendement d'échange thermique entre le sol et le tube. Nous avons conduit une série d'essais de performance de ce système et nous avons obtenu les résultats mentionnés ci-dessous.

- (1) La quantité de chaleur solaire collectée par une chaussée bitumée est de 3,4 MJ/m²/jour en août, de 1,2 MJ/m²/jour en septembre et de -0,2 MJ/m²/jour en octobre. Nous avons pu constater d'autre part que la chaleur solaire collectée correspond à 20% environ du rayonnement solaire global.
- (2) Le rendement de récupération thermique d'un forage varie en fonction de la température de l'eau entrant dans le tube d'échange thermique, mais il est stable à long terme.
- (3) L'utilisation d'un coulis à haute conductivité thermique permet d'améliorer le rendement d'échange thermique avec le sol. Le coulis à poudre de charbon est environ 1,16 fois plus efficace que le coulis normal et le coulis à poudre de fer environ 1,43 fois plus.

2. Introduction

Parmi les plus courantes des installations conventionnelles de déneigement des routes sans arrosage, l'on distingue deux types : le type à chauffage électrique, procédé qui consiste à chauffer la chaussée au moyen d'éléments chauffants, et le type à circulation d'eau chaude, procédé qui consiste à faire circuler de l'eau chaude dans des tubes de radiation enterrés. Or, comme on le sait, les systèmes à chauffage électrique consomment énormément d'électricité ce qui augmente d'autant leur coût d'exploitation, tandis que les systèmes à circulation d'eau chaude qui utilisent des combustibles fossiles posent des problèmes d'environnement en raison des émissions de CO₂, NO_x, etc. D'ailleurs, à la troisième session de la Conférence des Parties sur la prévention contre le réchauffement climatique qui s'est tenue à Kyoto, un protocole de réduction de consommation des combustibles fossiles, principale cause des émissions de gaz à effet de serre, a été adopté.

De son côté, Nippon Steel Corporation s'est attaquée au problème du déneigement des voies ferrées et routières depuis 1978 dans l'objectif de désenclaver les régions froides enneigées et compte déjà à son actif bon nombre de systèmes de déneigement écosympatiques et écoénergétiques. Aujourd'hui, c'est en prenant appui sur cette longue expérience que nous présentons un système de déneigement utilisant l'énergie thermique solaire, une énergie dont l'abondance fluctue peu d'une région à l'autre.

Le but du présent rapport est de présenter le nouveau système de déneigement ainsi que les résultats des essais in situ conduits en vue de l'évaluation de l'efficacité du système.

3. Système de Déneigement des Routes par Chaleur Emmagasinée en Sous-sol sur une Longue Durée

3.1 Choix D'une Énergie Naturelle

Parmi les différentes énergies naturelles, dont le vent, les cours d'eau et le soleil, nous avons jeté notre dévolu sur l'énergie thermique solaire car cette énergie dépend peu des caractéristiques régionales. Toutefois, cette énergie pose un problème de variation périodique. En effet, si elle est très abondante en été, elle se fait rare en hiver. Il est donc évident que si l'on veut utiliser cette énergie pour le déneigement des routes en hiver, il faut trouver un moyen de la stocker durant une période prolongée, c'est-à-dire de plusieurs mois.

Parmi les diverses techniques d'emmagasinage de longue durée de la chaleur, la technique de stockage en sous-sol est la plus couramment appliquée tant aux États-Unis qu'en Europe. Par ailleurs, l'on distingue divers modes d'emmagasinage, à savoir : le stockage dans la couche aquifère, le stockage dans le sol à travers des forages, le stockage dans la roche, etc. ^[1 et 2] Pour notre part, nous avons opté pour le stockage dans le sol à travers des forages en raison du faible coût de réalisation des installations de ce type et de la grande liberté de choix des emplacements. Cette technique consiste à réaliser des forages verticaux, à insérer à l'intérieur de chaque forage un tube d'échange thermique, à accumuler dans le sol la chaleur solaire collectée ou la chaleur perdue d'un système de climatisation et à récupérer au moment voulu la chaleur stockée dans le sol. L'espace vide entre la paroi du forage et le tube d'échange thermique est rempli de coulis de mortier, de bentonite ou bien de terre excavée ou de sable. Il convient toutefois de noter que le mortier et la bentonite, s'ils bouchent bien l'espace vide, présentent une mauvaise conductivité thermique.

3.2 Configuration du Système

La configuration schématique de notre nouveau système de déneigement des routes par chaleur emmagasinée en sous-sol sur une longue durée est représentée à la figure 3.1. Dans ce système, l'on

utilise comme collecteurs de chaleur des tubes de radiation enterrés sous la chaussée qui serviront au déneigement en hiver et l'on fait circuler à l'intérieur de ces tubes de radiation de l'eau pour accumuler la chaleur dans le sol. En hiver, l'on récupère la chaleur stockée dans le sol pour faire fondre la neige via les tubes de radiation.

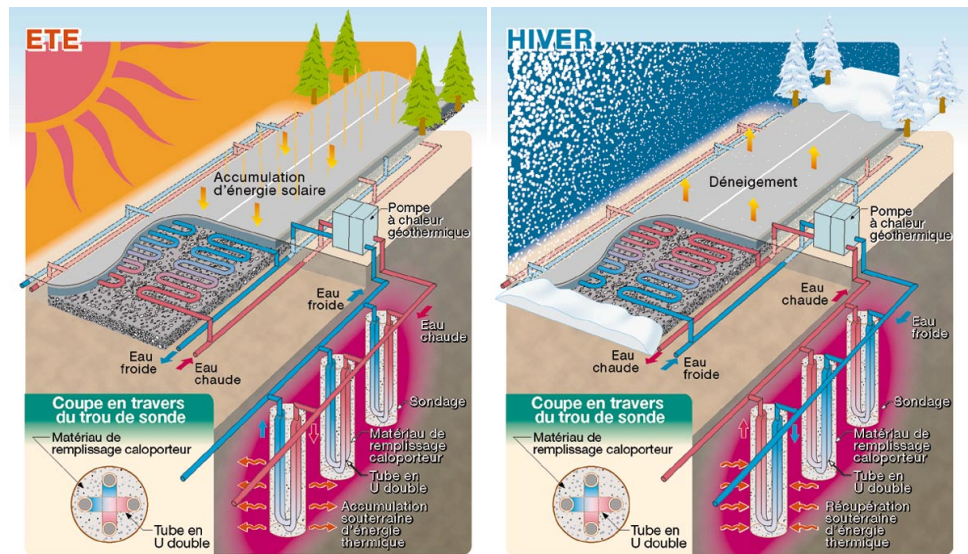


Figure 3.1 Système de Déneigement des Routes par Chaleur Emmagasinée en Sous-sol sur une Longue Durée

Dans ce système, pour améliorer les échanges thermiques sol-eau dont le faible rendement est le grand problème de toutes les applications basées sur l'emmagasinage de la chaleur dans le sol à travers des forages, l'espace vide entre la paroi du forage et le tube d'échange thermique est rempli d'un matériau thermoconducteur (coulis mélangé avec de la poudre de charbon ou de fer). Ce matériau de remplissage se doit de présenter une fluidité suffisante pour bien boucher l'espace entre la paroi et le tube et une conductivité thermique élevée pour assurer son rôle de matériau thermoconducteur. Pour cela, il convient de définir la teneur en poudre de charbon ou de fer qui améliore de manière optimale la conductivité thermique du coulis de base (mortier, bentonite, eau).

Afin de vérifier la validité de notre système, nous avons effectué des essais en extérieur sur une unité de déneigement construite à cet effet.

4. Présentation Sommaire des Essais

4.1 Unité de Déneigement D'essai

4.1.1 Principaux Composants de L'unité

Nous avons installé l'unité de déneigement d'essai dans l'enceinte du Centre d'études techniques de Futtsu de Nippon Steel Corporation. Le schéma de principe de cette unité d'essai est représenté à la figure 4.1. Cette unité se compose principalement de forages en vue de l'emmagasinage de chaleur dans le sol, d'une chaussée qui collecte la chaleur solaire en été, d'une pompe à chaleur (refroidie par eau) et d'un aérorefrigérant qui en hiver évacuent la chaleur puisée dans le sol.

La chaussée, qui est revêtue d'un enrobé drainant, présente une superficie de 10 m² (4 m x 2,5 m) et

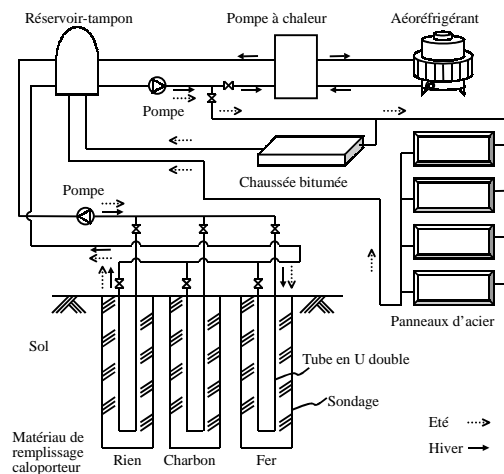


Figure 4.1 Schéma de Principe de cette Unité d'essai

une épaisseur de 150 mm en trois couches et comporte à 80 mm de profondeur des tubes de radiation en acier (SGP.PIC 15 A) espacés de 200 mm. Des panneaux d'acier sont également utilisés, en sus de la chaussée, pour la collecte de la chaleur solaire en été.

4.1.2 Forages

Nous avons creusé trois forages de 150 mm de diamètre et de 31 m de profondeur disposés en triangle équilatéral de 5 m de côté. La nature du sol étant un sable fin dont la valeur N à 20 m de profondeur est de 50, les forages ont été réalisés à l'aide d'un foret roto-percutant. Les tubes d'échange thermique installés dans les forages sont des tubes en double U de 16 mm d'alésage (22 mm de diamètre extérieur et 2,4 mm d'épaisseur de paroi) et de 30 m de longueur.

4.1.3 Matériau de Remplissage Thermoconducteur

Pour le remplissage des forages, nous avons utilisés trois matériaux différents, à savoir : 1) coulis seul (Rien), 2) coulis à poudre de charbon (Charbon) et 3) coulis à poudre de fer (Fer). Nous avons confectionné le coulis avec de l'eau, du ciment et de la bentonite. Pour améliorer la conductivité thermique du matériau de remplissage, il convient d'ajouter de la poudre de charbon ou de fer en quantité importante, mais pas au point de faire perdre sa fluidité au matériau de remplissage qui dès lors ne pourrait plus assurer sa fonction première qui est de bien colmater l'espace vide entre le tube d'échange thermique et la paroi du forage. Nous avons donc vérifié au préalable jusqu'à quelles doses de poudre de charbon et de poudre de fer le matériau de remplissage garde une fluidité suffisante pour assurer un bon colmatage. D'après nos essais ^[3], la conductivité thermique est de 1) Rien ; 0,19 W/m.K, de 2) Carbon ; 1,13 W/m.K et de 3) Fer ; 1,14 W/m.K.

4.2 Procédure D'essai

4.2.1 Mesures

Le programme général des essais est indiqué au tableau 4.1. Ce sont : la température et le débit en différents points ainsi que la consommation électrique des différents équipements et machines. En raison d'une panne du collecteur de données, nous ne disposons pas de données d'essai pour la période comprise entre le 15 et le 26 mars 2001.

4.2.2 Essais de Collecte de Chaleur Solaire et D'emmagasinage de la Chaleur en Sous-sol

Au cours des essais de collecte de la chaleur solaire, nous avons changé la durée de collecte en tenant compte de la durée d'ensoleillement (de 05h00 à 17h00, de 05h00 à 19h00 et de 0h00 à 24h00) ainsi que le débit d'écoulement de la solution d'antigel dans les tubes de radiation (10 l/minute, 12 l/minute et 15 l/minute).

Cependant, pour les essais d'emmagasinage de la chaleur en sous-sol, le débit de la solution d'antigel a été maintenu à 15 l/minute. Par ailleurs, nous avons observé tous les jours une durée d'emmagasinage de chaleur égale à la durée de collecte.

4.2.3 Essais de Récupération de la Chaleur Emmagasinée en Sous-sol

Les conditions des essais de

Tableau 4.1 Programme Général des Essais

Rubrique	Période	Durée
Récupération de la chaleur du sol la première année	du 21/01/2000 au 31/03/2000	71
Suspension	du 01/04/2000 au 29/07/2000	120
Emmagasinage de la chaleur dans le sol la première année	du 30/07/2000 au 17/10/2000	80
Suspension	du 18/10/2000 au 29/12/2000	73
Récupération de la chaleur du sol la seconde année	du 30/12/2000 au 06/04/2000	98

récupération de la chaleur sont indiquées dans le tableau 4.2. Nous avons effectué dans ce cadre, deux séries d'essais de fonctionnement en continu, consistant à récupérer la chaleur via les forages de manière continue pendant un temps déterminé, et deux séries d'essais de fonctionnement intermittent, consistant à récupérer la chaleur pendant une certaine durée, dans la journée, tous les deux jours. Pour chaque série d'essais, la température de la solution d'antigel s'écoulant vers les tubes d'échange thermique était différente. Cette température était élevée pour les séries d'essais de fonctionnement en continu (soit 8,7°C la première année et 9,1°C la seconde) tandis qu'elle était basse pour les séries d'essais de fonctionnement intermittent (soit -0,1°C la première année et 1,8°C la seconde).

Tableau 4.2 Conditions des Essais de Récupération de Chaleur

	1 ^{ère} année		2 ^{ème} année	
Période	du 21/01/2000 au 06/03/2000	du 07/03/2000 au 31/03/2000	du 30/12/2000 au 04/02/2001	du 05/02/2001 au 06/04/2001
Mode de fonctionnement	continu	Intermit	continu	Intermit
Température de l'antigel à l'entrée du tube	Haute (8,7°C)	Basse (-0,1°C)	Haute (9,1°C)	Basse (1,8°C)

5. Résultats des Essais et Analyse des Résultats

5.1 Essais de Collecte de la Chaleur Solaire et Essais D'emmaganage de la Chaleur en Sous-sol

5.1.1 Quantité de Chaleur Solaire Collectée

Les quantités journalières de chaleur solaire collectée par la chaussée bitumée sont indiquées sous forme de schéma à la figure 5.1. Sur la même figure est également indiqué le rayonnement solaire pour les mêmes jours publié dans les bulletins mensuels de l'Agence météorologique japonaise, pour l'observatoire météorologique de Tokyo, qui est le plus proche du site des essais. Nous avons en outre calculé la proportion de chaleur solaire collectée par la chaussée bitumée par rapport au rayonnement solaire et nous avons fait figurer les résultats sur la même figure en tant que « taux de collecte de chaleur de la chaussée bitumée ».

La plus forte quantité de chaleur collectée par la chaussée bitumée est observée en août, le mois le plus ensoleillé, et est de 3,4 MJ/m²/jour en moyenne mensuelle. En septembre, la moyenne mensuelle est de 1,2 MJ/m²/jour, soit seulement 35% de celle observée en août. En octobre, la quantité moyenne de chaleur collectée par la chaussée est passée à -0,2 MJ/m²/jour, autrement dit la chaussée a perdu plus de chaleur qu'elle n'en a reçu. En terme de taux de collecte de chaleur de la chaussée bitumée,

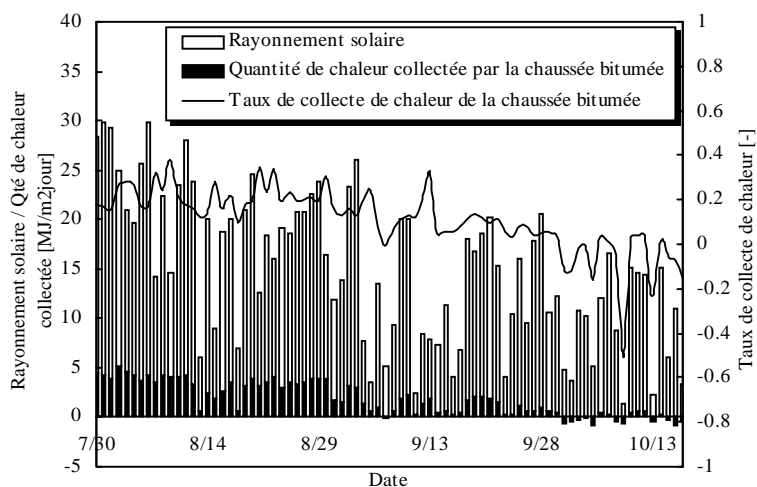


Figure 5.1 Quantité de chaleur collectée par la chaussée bitumée

l'on a pu constater qu'il est d'environ 20% jusqu'à la mi-septembre, mais qu'il s'affaiblit au-delà en raison 1) de la baisse du rayonnement solaire et 2) du phénomène de rayonnement thermique de la chaussée.

Bien que ces essais aient été menés dans une période d'août à octobre, dans le Hokkaïdo et la région du Tohoku, où le déneigement des routes est

une nécessité vitale, le rayonnement solaire atteint son pic en mai ou en juin. Il conviendra donc de commencer à emmagasiner la chaleur dès mai-juin lorsque notre système y sera appliqué.

Les données obtenues le 23 août 2000 sont représentées sous la forme d'un graphique à la figure 5.2. Plus précisément, ces données sont : la quantité de chaleur collectée par la chaussée bitumée, le rayonnement solaire, la température ambiante, et la température de la solution d'antigel à l'intérieur du réservoir tampon. Ce jour-là, nous avons emmagasiner la chaleur, de 00h00 à 24h00 sans interruption. Ce jour-là, l'ensoleillement a débuté à 05h30 et s'est poursuivi jusqu'à 19h30. Le système a commencé à collecter la chaleur solaire à 07h30 et a continué de la collecter jusqu'à 24h00, soit bien après la fin de l'ensoleillement en raison de la grande capacité calorifique de la chaussée bitumée. En effet, le système n'a pas pu commencer à collecter la chaleur solaire tant que la chaussée n'était pas chauffée, mais a pu continuer de collecter la chaleur accumulée dans la chaussée longtemps après le coucher du soleil. L'on peut déduire de cette observation que l'automatisation du fonctionnement du système en fonction du rayonnement solaire ou de la température de la chaussée devrait rehausser l'efficacité de la collecte de la chaleur.

5.1.2 Quantité de Chaleur Emmagasinée Dans le Sol

Le rendement de transfert thermique au sol de chacun des trois différents matériaux de remplissage thermoconducteurs ainsi que la quantité totale de chaleur emmagasinée dans le sol à travers les trois forages sont indiqués à la figure 5.3. Par « rendement de transfert thermique au sol » l'on entend la quantité de chaleur cédée au sol (c.-à-d. la quantité de chaleur emmagasinée dans le sol) par unité de longueur (le mètre) d'un forage (ou d'un tube d'échange thermique). Le matériau de remplissage présentant le plus haut rendement de transfert thermique au sol s'est avéré être le coulis contenant de la poudre de charbon, puis vient le coulis seul et, en dernier, le coulis contenant de la poudre de fer. La quantité totale de chaleur emmagasinée dans le sol durant la première période d'essais a été de 12132 MJ.

5.2 Essais de Récupération de la Chaleur Emmagasinée Dans le Sol

5.2.1 Quantité de Chaleur Récupérée du Sol

La quantité journalière et la quantité totale de chaleur récupérée du sol pendant la première année et la seconde année des essais sont indiqués aux figures 5.4, et 5.5.

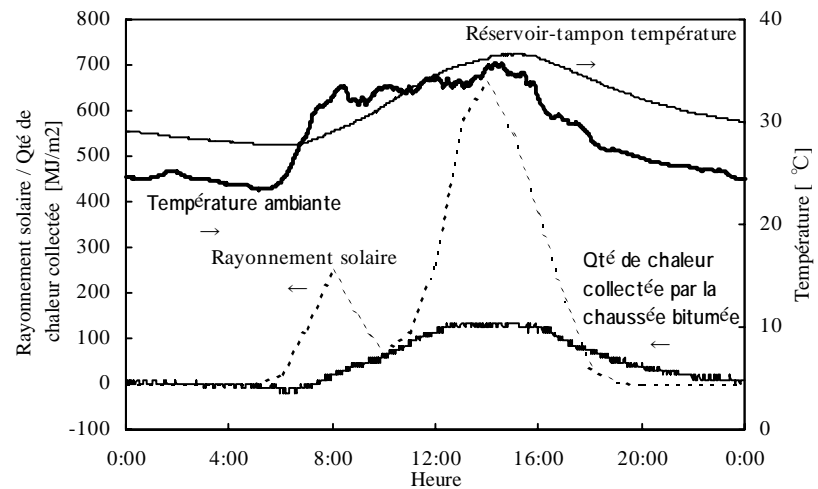


Figure 5.2 Données D'Essais Pour la Journée du 23 Août 2000

La quantité journalière de chaleur récupérée du sol est relativement stable pendant le fonctionnement en continu, mais varie d'un jour à l'autre en fonctionnement intermittent. L'on peut toutefois constater, à l'examen des moyennes des deux périodes de fonctionnement, que les quantités journalières de chaleur récupérée sont sensiblement identiques pour les deux modes de fonctionnement (cf. tableau 5.1). D'après nos essais, la quantité journalière moyenne de chaleur récupérée du sol est de 50,1 MJ/jour pour la première année et de 51,2 MJ/jour pour la seconde année. La quantité totale de chaleur récupérée du sol a été de 9173 MJ pour la première année et de 15494 MJ pour la deuxième année. Etant qu'en première année la chaleur solaire n'avait pas été artificiellement emmagasinée l'été précédent, la chaleur récupérée est la chaleur naturellement stockée dans le sol. Par contre, dans le cas de la deuxième année, la chaleur ayant été artificiellement emmagasinée l'été précédent (12132 MJ), la quantité de chaleur récupérée comprend une part de chaleur qui a été stockée plusieurs mois dans le sol. Bien que les données des deux années ne se prêtent pas à une comparaison poussée en raison de la différence de durée et des conditions de récupération de la chaleur, les essais que nous avons conduit nous permettent néanmoins d'affirmer que l'emmagasinage de la chaleur sur une longue durée permet d'accroître la quantité de chaleur prélevée du sol en hiver.

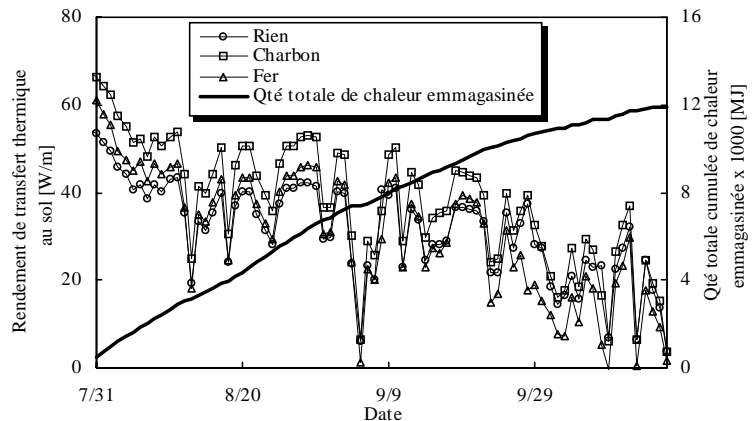


Figure 5.3 Rendement de Transfert Thermique au Sol et Quantité Totale Cumulée de Chaleur Emmagasinée

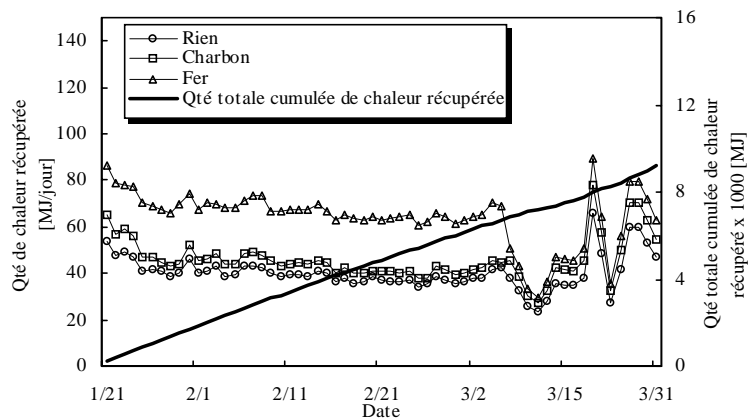


Figure 5.4 Récupération de la Chaleur du Sol La 1ère Année

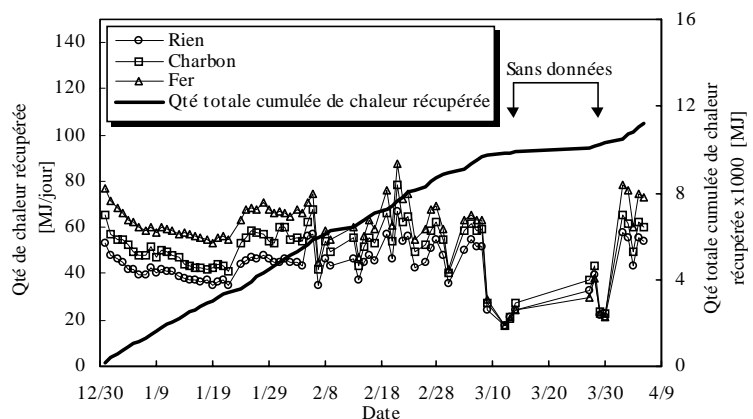


Figure 5.5 Récupération de la Chaleur du Sol La 2ème Année

5.2.2 Rendement de Récupération Thermique

Les rendements de récupération thermique des différents matériaux de remplissage sont indiqués aux figures 5-6 et 5.7. Par « rendement de récupération thermique » l'on entend la quantité de chaleur prise au sol par unité de longueur (le mètre) d'un forage (ou d'un tube d'échange thermique).

Tant en première année qu'en deuxième année, les rendements de récupération thermique sont faibles en mode de fonctionnement en continu et élevés en mode de fonctionnement intermittent. Ceci s'explique du fait que le rendement de récupération thermique varie en fonction de la température de la solution d'antigel pénétrant dans le sol (le tube d'échange thermique), autrement dit, plus la température de la solution est basse et plus le rendement est élevé.

Dans le tableau 5.1 sont indiquées les températures de la solution d'antigel à l'entrée des tubes d'échange thermique et les rendements de récupération thermique. Un examen des valeurs moyennes des trois différents matériaux de remplissage en mode de fonctionnement continu nous permet de constater que les rendements de récupération thermique de la première et de la deuxième années sont pratiquement identiques, car la température de la solution d'antigel à l'entrée des tubes d'échange thermique est sensiblement la même. En revanche, en mode de fonctionnement intermittent, la température de la solution était de $-0,1^{\circ}\text{C}$ en première année et de $1,8^{\circ}\text{C}$ en deuxième année, ce qui s'est traduit par une différence nette des rendements de récupération, soit $81,8\text{ W/m}$ pour la première année et $43,9\text{ W/m}$ pour la deuxième année. Il convient toutefois de souligner que, bien que le rendement de récupération thermique varie en fonction de la température de la solution d'antigel à son entrée dans les tubes d'échange thermique, ce rendement est pratiquement stable pour une même série d'essais tant en mode de fonctionnement continu qu'en mode de fonctionnement intermittent. En effet, vu que le rendement de récupération thermique ne se dégrade pratiquement pas même après un mois et demi de récupération de la chaleur du sol, l'on peut en déduire qu'il est possible de récupérer du sol une certaine quantité de chaleur de manière stable pendant une durée considérablement longue.

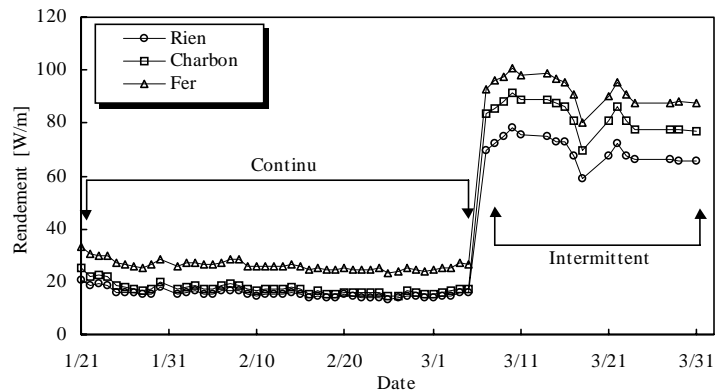


Figure 5.6 Rendement de Récupération Thermique la 1^{ère} Année

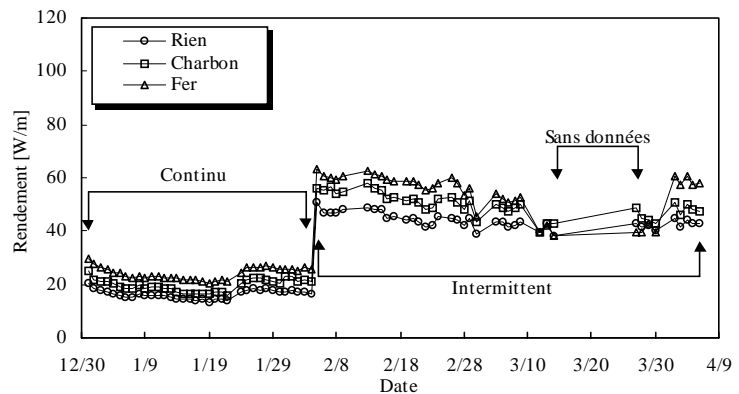


Figure 5.7 Rendement de Récupération Thermique la 2^{ème} Année

Tableau 5.1 Température de la Solution D'Antigel à L'Entrée des Tubes D'Echange Thermique, Rendement de Récupération Thermique et Quantité de Chaleur Récupérée

Matériau de remplissage thermoco nducteur	Récupération de chaleur en 1 ^{ère} année						Récupération de chaleur la 2 ^{ème} année					
	Temp. d'antigel à l'entrée du tube d'échange thermique (°C)		Rendement de récupération thermique (W/m)		Qté de chaleur récupérée (MJ/jour)		Temp. d'antigel à l'entrée du tube d'échange thermique (°C)		Rendement de récupération thermique (W/m)		Qté de chaleur récupérée (MJ/jour)	
	Continu	Intermit.	Continu	Intermit.	Continu	Intermit.	Continu	Intermit.	Continu	Intermit.	Continu	Intermit.
Rien	8.6	-0.2	15.5	44.0	40.1	40.1	9.1	1.7	16.3	44.0	42.3	44.7
	6.2		30.6		40.3		5.3		30.7		43.5	
Charbon	8.8	-0.0	17.4	49.9	45.1	48.3	9.2	1.9	19.7	49.9	51.0	51.0
	6.32		35.6		46.0		5.4		35.4		51.0	
Fer	8.5	-0.2	26.2	54.2	68.0	54.2	9.0	1.9	24.1	54.2	62.5	56.2
	6.1		44.8		64.2		5.4		39.8		59.2	
Moyenne	8.7	-0.1	19.7	49.3	51.1	47.7	9.1	1.8	20.0	49.3	51.9	50.6
	6.2		37.0		50.1		5.4		35.3		51.2	

5.2.3 Matériau de Remplissage Thermoconducteur

Si l'on compare les rendements de récupération thermique des trois forages, l'un rempli de coulis seul, le second de coulis mélangé à de la poudre de charbon et le troisième de coulis mélangé à de la poudre de fer, indiqués aux figures 5.6 et 5.7, l'on constate que, malgré les variations journalières, le forage rempli de coulis contenant de la poudre de fer présente systématiquement le meilleur rendement de récupération thermique, suivi par le forage rempli de coulis contenant de la poudre de charbon et vient en dernier le forage rempli de coulis seul. Cette tendance ne change pas que le mode de fonctionnement soit continu ou intermittent et est observée aussi bien au cours de la première année que de la seconde. L'on peut donc en conclure que l'incorporation de poudre de fer ou de charbon au coulis améliore la conductivité thermique sol/eau. D'autre part, cette amélioration est aussi immédiate que durable et est observée indépendamment des fluctuations du rendement de récupération thermique causées par des variations de la température de la solution d'antigel à son entrée dans les tubes d'échange thermique.

Les taux d'amélioration des rendements de récupération thermique sont donnés dans le tableau 5.2. Les valeurs apparaissant dans ce tableau correspondent aux taux d'amélioration observés pour les forages remplis de coulis contenant de la poudre de fer ou de charbon par rapport au forage rempli de coulis seul dont le rendement est arbitrairement fixé à « 1 ».

Les essais ont mis en évidence que l'ajout d'une dose appropriée d'une substance présentant une bonne conductivité thermique au matériau de remplissage se traduit par une amélioration du rendement de

Tableau 5.2 Taux D'Amélioration du Rendement de Récupération Thermique

Matériau de remplissage thermoconducteur	Récupération de chaleur la 1 ^{ère} année		Récupération de chaleur la 2 ^{ème} année	
	Continu	Intermit.	Continu	Intermit.
Charbon	1.12	1.19	1.20	1.13
	1.15		1.17	
Fer	1.70	1.33	1.48	1.23
	1.51		1.35	

récupération thermique.

A titre d'information, le rendement énergétique moyen de la pompe à chaleur que nous avons utilisée pour les essais a été de 4,8 pour les deux années.

6. Conclusion

Afin de vérifier la validité de notre système de déneigement des routes par chaleur emmagasinée en sous-sol sur une longue durée, nous avons construit une unité de déneigement expérimentale et nous avons effectué des essais in situ de collecte de la chaleur solaire par la chaussée et d'emmagasinement de cette chaleur dans le sol à travers des forages. Nous avons également vérifié l'amélioration du rendement d'échange thermique eau/sol par l'utilisation de matériaux de remplissage thermoconducteurs contenant de la poudre de charbon ou de fer. Les résultats de ces essais sont reportés ci-dessous.

- (1) La quantité de chaleur solaire collectée par la chaussée bitumée a été de 3,4 MJ/m²/jour en août, de 1,2 MJ/m²/jour en septembre et de -0,2 MJ/m²/jour en octobre. Environ 20% du rayonnement solaire a été emmagasiné sous forme de chaleur par la chaussée.
- (2) La chaussée bitumée emmagasine d'elle-même de la chaleur solaire qu'il est possible de collecter même après le coucher du soleil.
- (3) L'emmagasinement de la chaleur dans le sol à travers des forages permet de stocker longtemps la chaleur.
- (4) Le rendement de récupération thermique varie en fonction de la température de la solution d'antigel à son entrée dans les tubes d'échange thermique, mais est stable à long terme.
- (5) L'utilisation d'un matériau de remplissage thermoconducteur permet d'améliorer le rendement d'échange thermique sol/eau. Par rapport au matériau de remplissage conventionnel, celui à poudre de charbon est environ 1,16 plus conducteur et celui à poudre de fer environ 1,43 fois plus.

Les travaux qu'il nous reste à effectuer sont les suivants:

- (1) Etude des conditions de fonctionnement du système en vue d'améliorer l'efficacité de la collecte de chaleur de la chaussée
- (2) Vérification du rendement de récupération thermique en régime continu et à long terme avec une solution d'antigel à basse température
- (3) Détermination des critères de conception applicables aux systèmes d'emmagasinement de la chaleur en sous-sol à travers des forages.

Bibliographie

- [1] Burkhard, S., et al., 2000, IEA ECES Annex 12 High Temperature Underground Thermal Energy Storage, Compte rendu de la 8^{ème} Conférence internationale sur l'emmagasinement d'énergie thermique (TERRASTOCK 2000), pages 17 à 23
- [2] Oolof, A., 2000, Guidelines and areas for further research and development for UTES applications, Compte rendu de la 8^{ème} Conférence internationale sur l'emmagasinement d'énergie thermique (TERRASTOCK 2000), pages 25 à 28
- [3] Isobe, E., et al., 2000, Système de déneigement des routes par chaleur emmagasinée sur une longue durée dans un réservoir de stockage thermique sous-terrain, 14^{ème} Symposium des techniques d'hiver, pages 699 à 706