

Coll. Récents progrès en génie des procédés, n° 104

Les sciences du génie des procédés pour une industrie durable

XIV^e congrès SFGP 2013

8 au 10 octobre 2013, Lyon



Date de parution : 12-2013

Support : **CD-ROM**

Langue : Français

ISBN : 9782910239787

Société Française de Génie des Procédés

Le congrès 2013 de la SFGP, "les sciences du génie des procédés pour une industrie durable", est un lieu privilégié d'échanges autour de ces problématiques liées aux grands enjeux industriels et sociétaux des années à venir, ainsi qu'un espace de réflexion sur l'évolution de la discipline scientifique qu'est le génie des procédés. À ce titre, le congrès SFGP 2013 développera 3 grandes thématiques :

- produire autrement
- industrie, société et territoire
- sciences et méthodes

La croissance démographique, associée au développement économique rapide des pays émergents, tend à ce que plus de deux milliards d'êtres humains aspirent à un niveau de vie meilleur.

La simple extension de notre modèle industriel et de nos technologies engendrerait une consommation de ressources et des impacts environnementaux difficilement soutenables.

L'industrie des procédés a donc un rôle majeur à jouer dans ce contexte. Pour rendre son développement durable, elle va devoir opérer une révolution sans précédent dans les trois ou

quatre décennies à venir. Demain, elle se devra de posséder des usines plus performantes du point de vue de leurs consommations d'énergie et de matières premières. Les produits fabriqués et l'organisation de leur distribution devront aussi présenter une empreinte environnementale réduite.

Pour relever ces défis, des progrès conséquents doivent être réalisés, ainsi que des ruptures importantes dans la connaissance, les sciences et les technologies des procédés.

Conference SFGP indexation

<http://www.sfgp.asso.fr/publications/collection-recents-progres-en-genie-des-procedes/>

https://diffusion.lavoisier.fr/recherche.asp?query=R%C3%A9cents%20progr%C3%A8s&facet=ouvrage_collection_treatise:R%C3%A9cents%20progr%C3%A8s%20en%20g%C3%A9nie%20des%20proc%C3%A9d%C3%A9s¤t_page=1&page=0&version=0&rows=20&noq=

[Les sciences du génie des procédés pour une industrie durable
XIVème congrès SFGP 2013, du 8 au 10 octobre 2013, Cité - Centre de Congrès de
Lyon - CD-Rom](#)

[Coll. Récents progrès en génie des procédés, Vol. 104](#)

Langue : Français

12-2013 — CD —

ISBN : 9782910239787 — societe francaise genie procesdes

Le congrès 2013 de la SFGP, "les sciences du génie des procédés pour une industrie durable", est un lieu privilégié d'échanges autour de ces problématiques liées aux grands enjeux industriels et...

Disponible chez l'éditeur (délai d'approvisionnement : 10 jours).

80,00 € 



**Les sciences du génie des procédés pour une industrie durable
XIVème congrès SFGP 2013, du 8 au 10 octobre 2013, Cité - Centre de Congrès de Lyon -
CD-Rom**

Coll. *Récents progrès en génie des procédés*, Vol. 104

Langue : Français

12-2013 — CD —

ISBN : 9782910239787 — societe francaise genie procesdes

Le congrès 2013 de la SFGP, "les sciences du génie des procédés pour une industrie durable", est un lieu privilégié d'échanges autour de ces problématiques liées aux grands enjeux industriels et...

Disponible chez l'éditeur (délai d'approvisionnement : 10 jours).

80,00 € 

Optimisation d'une pompe à chaleur géothermique à expansion directe(DX) par la méthode Taguchi

Fannou Jean-Louis^{a*}, Rousseau Clément^a, Lamarche Louis^a, Kajl Stanislaw^a,

^aEcole de Technologie Supérieure, Centre de Technologie Thermique, Département du Génie mécanique, 1100, rue Notre-Dame Ouest Montréal (Québec) H3C 1K3, jean_fannou@yahoo.fr

Résumé

Dans ce travail, nous réalisons une optimisation des paramètres contrôlables d'un type de pompe à chaleur géothermique à expansion directe(DX) dans un processus de chauffage domestique en appliquant la méthode de Taguchi. Les paramètres étudiés sont : la température d'entrée et le débit de l'eau au condenseur et la longueur des puits géothermiques, chacun ayant trois niveaux. Afin de déterminer les conditions optimales de fonctionnement et les effets de ces paramètres sur le coefficient de performance du système et sur la puissance extraite au condenseur, la méthode du plan d'expérience et l'analyse des données proposées par Genichi Taguchi ont été utilisées. L'analyse révèle que le paramètre le plus influant sur les réponses étudiées est la longueur de l'échangeur souterrain suivi par le débit d'eau et la température d'entrée de l'eau au condenseur. L'étude prouve par ailleurs que lorsque la température d'entrée de l'eau au condenseur augmente, le COP diminue et n'est pas une fonction croissante de la longueur de l'échangeur souterrain comme on pourrait l'imaginer. Les paramètres optimaux identifiés ont été testés expérimentalement. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux prédits par la méthode de Taguchi. Des expressions simplifiées de dimensionnement de la pompe à chaleur DX ont été proposées par analyse de régression des données expérimentales.

Mots-clés : Géothermie, pompe à chaleur, expansion directe(DX), méthode Taguchi, fonctionnement optimal, coefficient de performance(COP), chauffage.

Nomenclature

COP	Coefficient de performance	W_{comp}	Puissance au compresseur (W)
$T_{\text{eau_in}}$	Température eau entrée condenseur (°C)	n	Le nombre de mesure par essai
$T_{\text{eau_out}}$	Température eau sortie condenseur (°C)	SB	Signal/Bruit
C_{p_e}	Capacité thermique de l'eau (J/Kg.K)	σ	Ecart type des valeurs mesurées
D_e	Débit d'eau au condenseur (kg/s)	Q_{Ch}	Puissance extraite au condenseur (W)
L_{Ch}	Longueur des puits géothermiques (m)	Y	Valeur d'une mesure

1. Introduction

Les pompes à chaleur (PAC) géothermiques ont un regain d'intérêt depuis cette dernière décennie à cause de leurs performances et des économies qu'elles procurent à long terme d'utilisation. En général les pompes à chaleur géothermiques disponibles dans le commerce sont souvent à boucle secondaire (SL) (voir figure 1). Une autre catégorie, objet de cette étude, élimine la boucle secondaire côté sol afin de réaliser encore plus d'économies. Elle est classée dans la catégorie des pompes à chaleur à expansion directe (DX) car elle a la particularité que l'un des composants enterré au sol joue directement le rôle de condenseur ou d'évaporateur selon le mode d'opération (voir figure 2). De ce fait, il présente donc des avantages par rapport aux systèmes conventionnels à boucle secondaire : Réduction de coût par élimination de la boucle secondaire côté sol : pas d'échangeur de chaleur ni de pompe de circulation, faible consommation d'énergie pour son fonctionnement, diminution des coûts de maintenance, diminution des pertes de chaleur due au contact directe entre l'échangeur souterrain et le sol, amélioration des conditions de transfert au sol due au matériau de fabrication de l'échangeur souterrain : cuivre de forte conductivité thermique par rapport au plastique utilisé dans les systèmes à boucle secondaire. Comme principaux

inconvenients, les coûts initiaux d'investissement restent élevés, le problème de retour d'huile et la présence de réfrigérants dans le sol.

La revue de littérature révèle une insuffisance de recherche et publication scientifique sur les systèmes de pompe à chaleur géothermique à expansion directe (DX). Ainsi, aussi bien sur les plans de la modélisation que sur ceux des résultats expérimentaux, l'information disponible ne permet pas de disposer de connaissance scientifique suffisante à l'égard de cette technologie (Hughes 2008). Cependant, on note depuis cette dernière décennie, quelques travaux sur les pompes à chaleur DX. Ainsi Xiaotao et al (Wang, Ma et al. 2009) ont procédé à une étude expérimentale sur une pompe à chaleur DX au R134a en mode chauffage, constituée de trois puits verticaux de 30 m de profondeur chacun durant une période de 20 jours en hiver en Chine. D'après les résultats obtenus, le COP de tout le système est de 2,28 pour des températures d'évaporation et de condensation de 3,14°C et de 53,4°C respectivement. La capacité moyenne de chauffage obtenue a atteint 6.43 kW. Ils ont mis en évidence le problème de mauvaise répartition de débit dans les évaporateurs géothermiques. Wang H. (Wang, Zhao et al. 2013) a réalisé une étude expérimentale sur une pompe à chaleur DX en mode chauffage constituée de quatre puits verticaux de 20 m chacun sur lequel a été développé un système spirale de cuivre facilitant le retour d'huile. La capacité de chauffage a atteint 6,41 kW avec un COP de 2,88. Une étude technico-économique a été réalisée par Guo (Guo, Zhang et al. 2012) pour comparer les systèmes DX avec les systèmes SL en mode climatisation. Les auteurs sont arrivés à la conclusion que les systèmes DX sont plus performants et plus économiques que les systèmes SL. Austin et Sumathy (Austin and Sumathy 2011) ont réalisé une étude paramétrique sur la performance d'une pompe à chaleur DX au CO₂ dans un cycle transarctique. Un modèle numérique a été développé et une optimisation des paramètres de la pompe à chaleur a permis d'améliorer la performance de 18% par rapport au modèle de référence.

Par ailleurs, le défi majeur pour cette nouvelle technologie, serait d'atteindre tout au moins les performances des systèmes géothermiques traditionnels (voir figure 1) ou de s'en approcher. Il faut alors proposer, non seulement les outils de dimensionnement de cette pompe à chaleur pour les besoins de chauffage et de climatisation souhaités mais aussi déterminer les conditions optimales de fonctionnement une fois installée. L'étude ici présentée s'inscrit bien dans cette optique et vise donc, à partir d'un plan expérimental construit sur la base de la méthode Taguchi, à obtenir les paramètres qui maximisent le coefficient de performance (COP) et la capacité de chauffage (Q_{Ch}) d'une pompe à chaleur DX et à élaborer des corrélations simplifiées de dimensionnement.

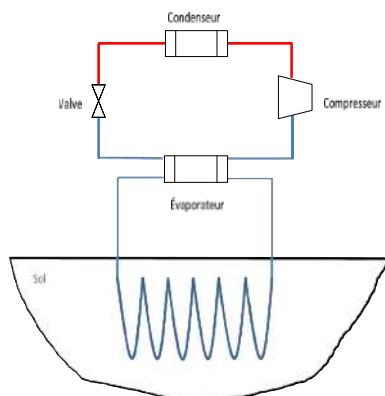


Figure 1: Schéma d'une PAC géothermique traditionnelle

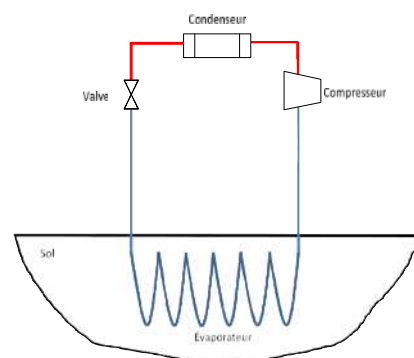


Figure 2: Schéma d'une PAC géothermique à expansion directe (DX)

La méthode Taguchi est basée sur l'élaboration des plans d'expérience construits à partir de la matrice orthogonale d' Hadamard dont l'objectif est de recueillir et d'analyser les données issues des essais afin non seulement de déterminer parmi les paramètres d'influence d'un procédé, ceux qui le sont le plus mais aussi de déterminer dans le domaine expérimental le niveau optimal des paramètres permettant d'atteindre le degré de qualité souhaitée (maximum, minimum, nominal). La particularité de cette méthode est que

l'optimisation est basée sur la minimisation de la variabilité des réponses autour de la cible (Çomakli, Çelik et al. 1999). Cette méthode est utilisée dans divers systèmes d'ingénierie mais son application dans le domaine des pompes à chaleur remonte vers l'année 1999 avec les travaux de (Çomakli, Çelik et al. 1999) qui ont déterminé les conditions optimales de fonctionnement d'une pompe à chaleur utilisant les mélanges azéotropiques. Par la suite, (Çomakli, Simsek et al. 2009) ont utilisé la méthode Taguchi pour déterminer les conditions optimales de fonctionnement d'une pompe à chaleur utilisant comme réfrigérant R22 et R404A et leur mélange. Çomakli et Hertel (Çomakli, Hertel et al. 2010) ont exploité la même méthode pour analyser une pompe à chaleur fonctionnant avec des mélanges de fluides zéotropiques. En 2012, les auteurs (İoşkun, Motorcu et al. 2012) se sont servis de la méthode Taguchi pour évaluer l'effet des paramètres de régulation sur la performance d'un système dans le domaine de la récupération de chaleur à l'aide d'une pompe à chaleur.

Nous savons que les paramètres qui pourraient influencer la performance d'une pompe à chaleur géothermique à expansion directe sont très nombreux : position des puits, la nature du sol, interaction entre les puits, les conditions d'entrée du fluide (température, débit) de la boucle secondaire côté bâtiment, la longueur des puits, la vitesse de rotation du compresseur, la nature du fluide frigorigène, la dynamique des valves de détente, l'utilisation de la pompe, etc. Dans cette étude, une des premières dans ce domaine pour la pompe à chaleur DX, nous retenons les paramètres ci-après : la température d'entrée et le débit du fluide secondaire du condenseur et la longueur des puits, chacun ayant trois niveaux.

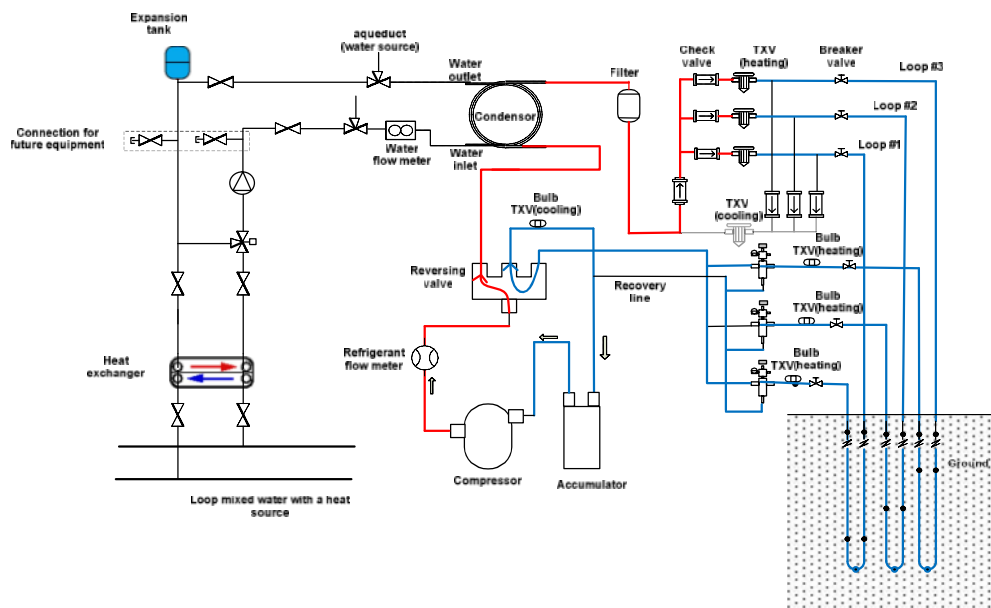


Figure 3. Schéma du dispositif expérimental en mode chauffage

2. Méthodologie

2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental (voir figure 3) est une pompe à chaleur géothermique d'une puissance nominale de 10KW avec R22 comme réfrigérant. Elle est constituée de trois puits souterrains en parallèle d'une longueur de 30 m chacun et incliné d'un angle de 30° par rapport à la verticale. La pompe peut fonctionner en mode chauffage comme en mode de climatisation grâce à une valve d'inversion de cycle. En mode de chauffage, les valves de coupe-circuit installées sur chacun des puits géothermiques (condenseur) permettent de faire fonctionner manuellement, un ($L_{\text{ch}} = 30$ m), deux ($L_{\text{ch}} = 60$ m) ou trois puits ($L_{\text{ch}} = 90$ m) selon les besoins des essais. Chaque puits est muni de sa valve de détente assurant ainsi un réglage indépendant de débit du réfrigérant. En mode de climatisation, le système de régulation sélectionne de façon automatique le nombre de puits (évaporateur) convenable au bon fonctionnement de

la pompe DX. Des capteurs de pression et de température, calibrés, sont installés convenablement dans le circuit (voir figure 3). L'ensemble du système de commande, d'acquisition, d'enregistrement des données est géré dans l'environnement du logiciel Labview.

Nous faisons fonctionner le système pendant environ une heure afin d'assurer que le régime quasi permanent est atteint. Les valeurs retenues pour le traitement des données sont les moyennes des dix dernières minutes.

Le circuit de distribution est muni d'une valve de mélange dont le signal d'ouverture est entièrement contrôlé par le système d'acquisition et permet de réguler la température d'entrée de l'eau dans le condenseur.

Tableau 1. Les niveaux des paramètres de l'étude

Paramètres	Désignation	Unité	Niveaux		
			1	2	3
$T_{\text{eau_in}}$	A	°C	29	31	35
D_e	B	kg/s	0,19	0,38	0,63
L_{Ch}	C	m	30	60	90

Tableau 2. Résultats expérimentaux

N° des essais	Ordre des essais	$T_{\text{eau_in}}$ (°C)	D_e (kg/s)	L_{Ch} (m)	COP_1	COP_2	Q_{Ch1} (W)	Q_{Ch2} (W)
1	9	29	0,19	30	2,20	2,17	4635,40	4715,41
2	1	29	0,38	60	2,78	2,87	6941,66	7631,33
3	7	29	0,63	90	2,93	3,06	8646,43	9403,38
4	8	31	0,19	60	2,50	2,46	6522,50	6929,82
5	2	31	0,38	90	2,80	2,93	8285,20	8795,86
6	6	31	0,63	30	2,19	2,36	4577,10	5217,96
7	4	35	0,19	90	2,35	2,15	7827,85	7636,80
8	3	35	0,38	30	2,25	2,27	4925,25	5114,31
9	5	35	0,63	60	2,79	2,75	7125,66	7422,25

2.2. Matrice expérimentale de Taguchi

Le tableau 1 montre les différents niveaux des paramètres pris en compte dans cette étude. Les réponses étudiées sont le coefficient de performance COP et la puissance extraite du condenseur Q_{Ch} .

En négligeant les interactions entre les paramètres, le plan orthogonal de Taguchi L9 (3*3) a été choisi pour conduire les essais avec une répétition. Au total, nous avons exécuté 18 essais dans un ordre aléatoire. Le tableau 2 présente la matrice d'expérience de Taguchi.

2.3. Expression des réponses et critère d'optimisation de Taguchi

Le COP thermodynamique est évalué par :

$$COP = \frac{Q_{\text{Ch}}}{W_{\text{Comp}}} \quad (1)$$

$$Q_{Ch} = D_e C p_e (T_{eau_in} - T_{eau_out}) \quad (2)$$

Les critères d'optimisation sont basés sur l'évaluation du ratio signal/bruit (SB) selon que l'on souhaite maximiser, minimiser la réponse étudiée ou atteindre une valeur nominale donnée :

$$\text{Pour maximiser, } SB = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (3)$$

$$\text{Pour minimiser, } SB = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (4)$$

$$\text{Pour atteindre une valeur nominale, } SB = -10 \log(\sigma^2) \quad (5)$$

Dans cette étude, c'est le critère de maximisation qui est retenue.

3. Analyse des résultats

Les résultats des essais obtenus avec une répétition sont consignés dans le tableau 2 (les indices 1 et 2 correspondent aux mesures 1 et 2 respectivement).

L'analyse des données se présente en deux volets : l'analyse du rapport signal/bruit ou coefficient de performance (SB) pour non seulement déterminer les paramètres les plus influents mais surtout de déterminer les niveaux optimaux des paramètres (Comakli, et al, 1999) et l'analyse de régression (Coşkun, Motorcu et al. 2012) pour établir un modèle de prédiction des résultats. Le traitement statistique de données est effectué dans l'environnement du logiciel Minitab 15.

3.1. Analyse du rapport signal/bruit (SB)

Le critère d'optimisation pour les réponses étudiées étant de maximiser les réponses, le choix du meilleur paramètre correspond à un rapport SB le plus grand selon Taguchi. La figure 4 représente le rapport SB statistique pour le coefficient de performance COP de la pompe à chaleur et la figure 5 celui de la puissance de chauffage extraite du condenseur.

Prenons le paramètre T_{eau_in} (Paramètre A) (figure 4), la valeur du rapport signal/bruit correspondant, par exemple, au premier point, celui dont la température est de 29°C (niveau 1), est la moyenne des rapports SB, calculée avec l'équation (4) de toutes les expériences dans lesquelles le niveau 1 apparaît, c'est-à-dire les expériences 1, 2 et 3 (Tableau 2). De même pour le paramètre D_e (Paramètre B), la valeur du rapport signal/bruit correspondant par exemple au deuxième point (celui dont le débit est de 0,38 kg/s (niveau 2)), est la moyenne des rapports SB, calculée avec l'équation (4), de toutes les expériences dans lesquelles le niveau B apparaît pour ce paramètre, c'est-à-dire les expériences 2, 5 et 8 (voir tableau 2). Et ainsi de suite pour tous les paramètres, pour tous les points et pour les deux réponses étudiées.

La figure 4 montre les variations du rapport SB en fonction des niveaux de chaque paramètre. Les tendances observées permettent de conclure que le COP baisse en fonction de la température d'entrée au condenseur, augmente avec le débit du condenseur mais atteint un maximum puis baisse légèrement avec la longueur des puits géothermiques. De même, la puissance extraite baisse légèrement avec la température d'entrée mais augmente avec le débit et la longueur des échangeurs souterrains. En effet une augmentation de la température d'entrée de l'eau au condenseur, réduit le transfert de chaleur entre le réfrigérant et l'eau entraînant ainsi une augmentation de la température de condensation. Ce qui a pour effet de baisser le COP du système (Wang, Ma et al. 2009). Par contre, l'augmentation de la longueur de l'échangeur géothermique augmente la surface d'échange de l'évaporateur favorisant davantage les échanges thermiques entre le sol et le réfrigérant conduisant à l'augmentation de la température et la pression du réfrigérant à la sortie d'évaporation faisant ainsi moins travailler le compresseur contribuant à une hausse du COP mais dans une pompe à chaleur DX, c'est la compresseur qui doit faire circuler le mélange réfrigérant-huile de lubrification dans le circuit, alors une augmentation de la longueur de l'échangeur souterrain augmente les forces d'ascension gravitationnelles limitant le retour d'huile de lubrification vers le compresseur et par conséquent baisse sa performance : le COP se trouve ainsi

diminué (Guo, Zhang et al. 2012). C'est pourquoi l'augmentation de la longueur de l'échangeur souterrain n'est pas souvent bénéfique pour les systèmes de pompes à chaleur DX. Lorsque la surface d'échange de l'évaporateur augmente due à une augmentation de longueur, la chaleur extraite dans ce dernier augmente et en vertu de principe de conservation de l'énergie dans le système ($Q_{ch}=W_{comp} + Q_{evap}$, Q_{cvap} étant la puissance extraite du sol), la puissance extraite du condenseur augmente.

En se basant sur le critère de SB le plus grand de Taguchi pour les paramètres et pour les deux réponses (Comakli et al.1999), on déduit (voir figures 4 et 5) par ordre croissant de grandeur d'influence : la longueur de l'échangeur souterrain, suivi du débit d'eau du condenseur et enfin la température d'entrée de l'eau au condenseur. Les niveaux des paramètres qui maximisent le COP de la pompe à chaleur DX sont : 29 °C pour la température d'entrée de l'eau, 0,63 kg/s pour le débit d'eau et 60 m pour la longueur des puits géothermiques. Ces valeurs optimales correspondent à l'expérience A1B3C2 qui, on peut le constater, n'est pas dans les essais réalisés (voir tableau 2). En faisant la même analyse, la plus grande puissance de chauffage est obtenue pour l'expérience A1B3C3. Le choix de l'expérience ou des conditions optimales de fonctionnement qui maximise les deux réponses pourrait dépendre des considérations économiques : prix du forage et coût de l'électricité. Afin de valider ces résultats, les conditions de fonctionnement optimales obtenues sont testées expérimentalement. Les résultats obtenus (moyennes de deux essais) sont comparés avec le modèle linéaire de prédiction de Taguchi (voir tableau 3). Il en ressort que les résultats expérimentaux sont bien en accord avec les prédictions et que l'approche d'optimisation de Taguchi peut être utilisée pour optimiser aussi les pompes à chaleur géothermique à expansion directe (DX).

Tableau 3. Validation des résultats

	Paramètres	COP			Q _{ch}					
		T _{eau_in} (°C)	D _e (kg/s)	L _{ch} (m)	Prédiction -	Réel -	Erreur (%)	Prédiction (W)	Réel (W)	Erreur (%)
COP	Niveau optimal	1	3	2	2,95	2,80	5,08	7561,69	7421,80	1,8
	Valeur optimale	29	0,63	60						
Q _{ch}	Niveau optimal	1	3	3	2,96	2,87	3,04	8898,74	8566,74	3,7
	Valeur optimale	29	0,63	90						

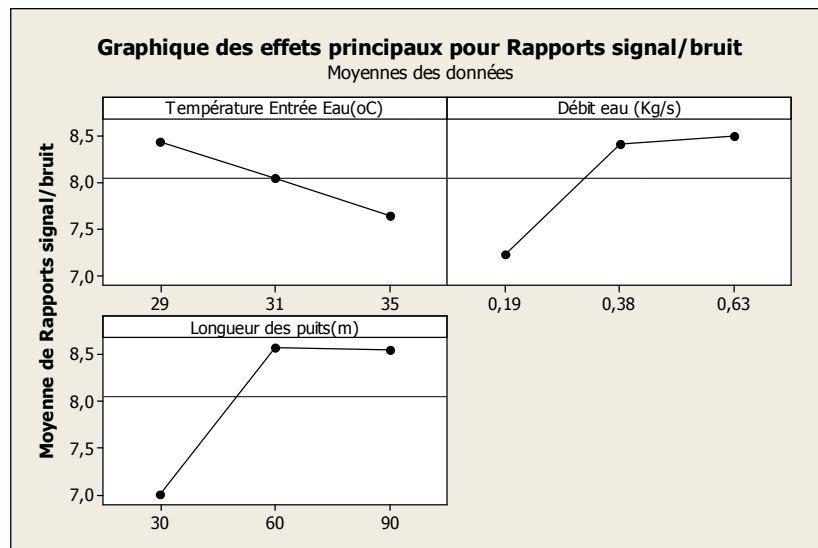


Figure 4. Moyenne des effets rapport signal/bruit pour le COP

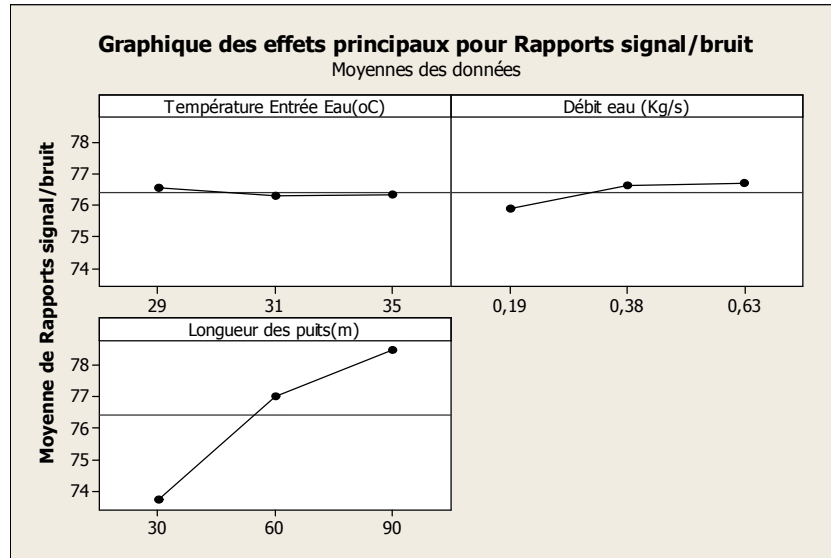


Figure 5. Moyenne des effets rapport SB pour Q_{Ch}

3.2. Analyse de la régression

Une analyse de régression du COP et de la puissance de chauffage en fonction de la température d'entrée et du débit du fluide secondaire au condenseur et de la longueur des puits géothermique a été réalisée avec les coefficients de corrélation de l'ordre de 74,1% pour le COP et 96,5% pour la puissance de chauffage. Les équations (6) et (7) présentent les modèles simplifiés de régression obtenus qui pourront servir dans une étude de préféabilité au dimensionnement de la pompe à chaleur à expansion directe DX. Le Tableau 4 montre une comparaison entre les résultats expérimentaux et les modèles de régression. Les moyennes des écarts sont de l'ordre de 5,6% pour le coefficient de performance COP et de 4,1 % pour la puissance extraite Q_{Ch} .

$$COP = 2,98 - 0,0386 * T_{eau_in} + 0,815 * D_e + 0,00772 * L_{Ch} \quad (6)$$

$$Q_{Ch} = 4127 - 47,4 * T_{eau_in} + 1506 * D_e + 59,5 * L_{Ch} \quad (7)$$

Tableau 4. Comparaison générale entre le modèle de régression et l'expérience

N° des essais	COP			Q_{Ch}		
	Réel -	Modèle -	Erreur (%)	Réel (W)	Modèle (W)	Erreur (%)
1	2,19	2,25	3,1	4675,41	4823,54	3,1
2	2,83	2,66	6,4	7286,50	6909,74	5,5
3	3,00	3,09	3,1	9024,91	9056,18	0,3
4	2,48	2,41	3,0	6726,16	6513,74	3,3
5	2,87	2,80	2,3	8540,53	8584,88	0,5
6	2,28	2,55	10,8	4897,53	5391,38	9,2
7	2,25	2,49	9,5	7732,33	8109,14	4,6
8	2,26	2,18	3,5	5019,78	4825,28	4,0
9	2,77	2,54	8,9	7273,96	6836,18	6,4

4. Incertitude de mesure

En se basant sur l'analyse statistique des données expérimentales, le COP et la puissance de chauffage sont respectivement connus à 3,14 % et 4,97%.

5. Conclusion

Cette étude, une première du genre pour les systèmes de pompe à chaleur géothermique à expansion directe nous a permis de mettre en évidence l'approche Taguchi dans l'étude et l'analyse de cette nouvelle technologie, de déterminer les conditions optimales de fonctionnement pour un chauffage domestique utilisant l'énergie gratuite du sol, de proposer des outils simplifiés de dimensionnement en accord avec les résultats expérimentaux. On peut retenir entre autre que :

- La performance d'une pompe à chaleur DX décroît avec l'augmentation de la température de l'eau dans le condenseur,
- La longueur des puits géothermiques a une forte influence sur la performance du système et que l'augmentation de la longueur de l'échangeur souterrain n'entraîne pas forcément une augmentation de performance,
- La chaleur extraite au condenseur croît avec le débit d'eau au condenseur (augmentation des transferts de chaleur) et la longueur de l'échangeur souterrain par l'augmentation de la chaleur extraite du sol.

Ces résultats obtenus sur les plans de l'analyse et du dimensionnement, constituent une contribution importante pouvant aider les concepteurs et les analystes des systèmes de pompe à chaleur DX. Cette méthode pourra donc être utilisée pour tester les pompes à chaleur DX fonctionnant avec les fluides de remplacement du R22 comme le R404A, R407C, etc.

Références

- Austin, B. T. and K. Sumathy (2011). "Parametric study on the performance of a direct-expansion geothermal heat pump using carbon dioxide." *Applied Thermal Engineering* 31(17-18): 3774-3782.
- Comakli, K., F. Simsek, et al. (2009). "Determination of optimum working conditions R22 and R404A refrigerant mixtures in heat-pumps using Taguchi method." *Applied Energy* 86(11): 2451-2458.
- Çomakli, Ö., C. Çelik, et al. (1999). "Determination of optimum working conditions in heat-pumps using nonazeotropic refrigerant mixtures." *Energy Conversion and Management* 40(2): 193-203.
- Coşkun, S., A. R. Motorcu, et al. (2012). "Evaluation of control parameters' effects on system performance with Taguchi method in waste heat recovery application using mechanical heat pump." *International Journal of Refrigeration* 35(4): 795-809.
- Guo, Y., G. Zhang, et al. (2012). "A techno-economic comparison of a direct expansion ground-source and a secondary loop ground-coupled heat pump system for cooling in a residential building." *Applied Thermal Engineering* 35(0): 29-39.
- Hughes, P. J. (2008). *Geothermal(Ground-Source) Heat Pumps: Market Status, Barriers to Adoption, and Actions to Overcome Barriers.* U. S. D. o. E. Oak Ridge National Laboratory office of Scientific and Technical Information: 40.
- Wang, H., Q. Zhao, et al. (2013). "Experimental investigation on the operation performance of a direct expansion ground source heat pump system for space heating." *Energy and Buildings* 61(0): 349-355.
- Wang, X., C. Ma, et al. (2009). "An experimental study of a direct expansion ground-coupled heat pump system in heating mode." *International Journal of Energy Research* 33(15): 1367-1383.

Optimization of a direct expansion (DX) geothermal heat pump using Taguchi method

Fannou Jean-louis^{a*}, Clément Rousseau^a, Lamarche Louis^a, Kajl Stanislaw^a.

^a Superior School of Technology, Thermal Technology Center, Department of Mechanical Engineering
1100, rue Notre-Dame Ouest Montréal (Québec) H3C 1K3.

Abstract

In this work, we perform an optimization of controllable parameters of a geothermal direct expansion (DX) heat pump in home heating process using the Taguchi method. The parameters studied were: inlet temperature of the water, the water flow rate to the condenser, and the length of geothermal wells, each with three levels. To determine the optimum working conditions and the effects of these parameters on the coefficient of performance (COP) of the system and the power extracted from the condenser, the method of experimental design and data analysis proposed by Taguchi Genichi were used. The analysis shows that the most common parameter affecting responses studied is the length of the earth loop, and then followed by the water flow to the condenser and finally the inlet temperature of the water to the condenser. When the length of the ground heat exchanger increases the COP and the power extracted from the condenser increases, but this behaviour for the COP is not in a relationship of cause and effect proportional. Similarly, the study shows that when the inlet temperature of the condenser water increases, the COP decreases. The optimal parameters have been identified experimentally tested. The results were compared with those predicted by the Taguchi method. Simplified expressions for sizing the heat pump DX were proposed by regression analysis of experimental data.

Keywords: Geothermal, heat pump, direct expansion (DX), Taguchi method, optimum performance, coefficient of performance (COP), heating.

* Corresponding author: jean_fannou@yahoo.fr (J_L Fannou)