

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

1- Introduction

Ce rapport a pour but de résumer et d'analyser les résultats suite à l'installation d'un système de climatisation géothermique.

Le projet fut réalisé suite à la fondation de CEDRO/UNDP, qui joue un rôle particulier en installant des projets démonstratifs à énergie renouvelable au Liban.

Suite à un appel d'offres, j'ai eu la chance de participer à l'installation de ce projet dont les entrepreneurs étaient EEG/KET joints.

C'est officiellement la première installation géothermique au Liban, et elle a nécessité l'assistance d'un expert géothermique Français, le directeur technique de RYB Terra. (Grand Fournisseur de sondes et d'accessoires géothermiques.)

Ce projet a eu lieu à Bejjeh, un petit village dans la casa de Jbeil, à 600m d'altitude, pour le local de la municipalité qui est en phase de construction.

Dans ce rapport, on va résumer la conception du projet et le fonctionnement d'une pompe à chaleur, l'installation et problèmes techniques, l'étude financière et le temps de retour, ainsi que l'impact environnemental.

2- Géothermie : Conception

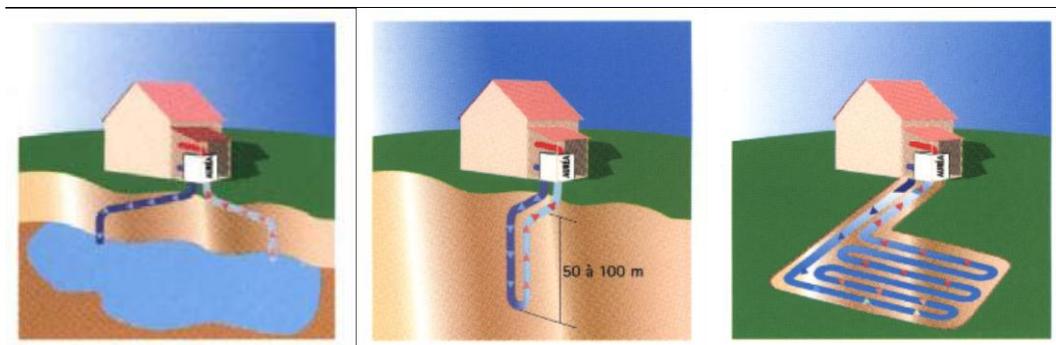
Le sol contient une importante quantité de calories issues du rayonnement solaire, des précipitations. Cette énergie emmagasinée dans les couches superficielles et dans les eaux souterraines est parfaitement exploitable grâce à :

- les pompes à chaleur eau/eau pour les eaux souterraines, les nappes phréatiques et les puits. Cette exploitation est également appelée Aquathermie. Son avantage : la température de l'eau en profondeur est quasiment constante tout au long de l'année (10/12°C) et permet un rendement très élevé. (Figure gauche)
- les pompes à chaleur eau glycolée / eau pour l'énergie stockée dans la terre ou la roche. Attention toutefois à la nature du terrain (sableux, argileux etc....) qui peut influencer sur l'apport calorifique. Ceci est fait selon deux types de capteurs verticaux (figure centrée) et horizontaux (figure droite)

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013



PRINCIPE DE LA POMPE A CHALEUR

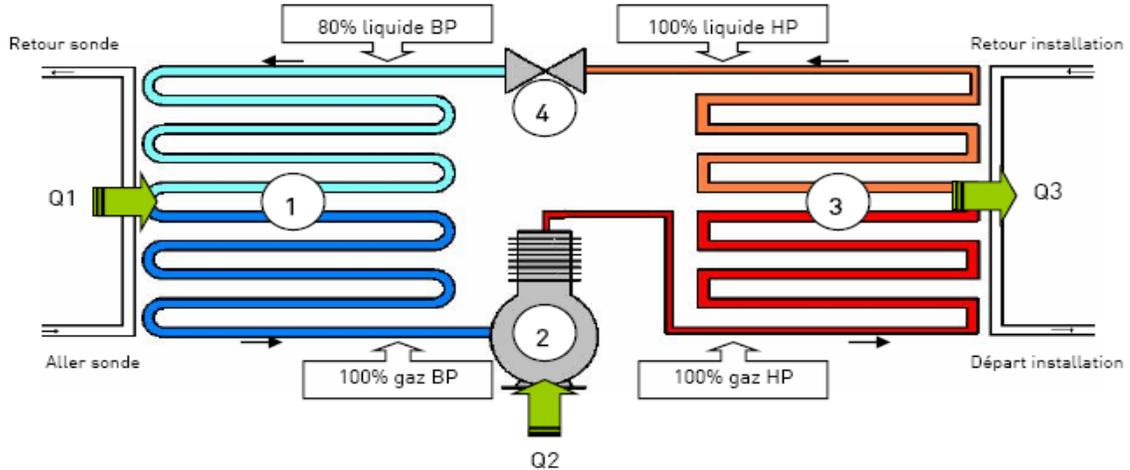
La pompe à chaleur est un système capable de capter la chaleur de notre environnement à un niveau de température relativement bas pour l'amener à un niveau supérieur utilisable par exemple pour le chauffage des locaux.

La chaleur est absorbée dans le milieu extérieur par un évaporateur **1** dans lequel un fluide frigorigène se vaporise à basse température et basse pression. Les vapeurs produites sont aspirées et comprimées par un compresseur **2** entraîné par un moteur électrique. Elles sont ensuite refoulées, à haute pression et haute température, vers le condenseur **3**. Les vapeurs, dans ce dernier, en cédant leur chaleur au réseau de chauffage repassent à l'état liquide. La liaison entre la partie « haute pression » et la partie « basse pression » est assurée par un détendeur **4** qui a pour rôle d'abaisser la pression et de ce fait la température du liquide venant du condenseur.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013



Énergie gratuite Q1 + Énergie Electrique Q2 = Énergie de Chauffage Q3

En inversant les cycles, on se servirait pour la climatisation, au lieu de chauffage.

COEFFICIENT DE PERFORMANCE

Le coefficient optimal de performance ou COP mesure l'efficacité d'une pompe à chaleur. Dans le schéma précédent, la puissance utile récupérée au condenseur **3** – puissance de chauffage - est égale à la puissance « gratuite » absorbée à l'évaporateur **1** augmentée de la puissance de compression **2**. On caractérise la performance énergétique de la pompe à chaleur par le coefficient de performance (COP) calculé comme suit :

$$\text{COP} = \frac{\text{Puissance calorifique restituée}}{\text{Puissance calorifique absorbée}}$$



Important

Mettre en œuvre une pompe à chaleur constitue une solution très performante, qui permet de diviser par 3 ou plus la consommation d'énergie du chauffage, et contribue à sa façon, à diminuer la pollution et à limiter les dégagements de CO₂ .

Il y a plusieurs types de pompes à chaleur aérothermiques (les plus répandues au marché libanais), et géothermiques (qui seraient le cas de notre évaluation).

Le fait d'adopter la géothermie, est que la variation souterraine de la température est quasiment nulle, ce qui augmente le rendement de la machine.

En se référant à section du condenseur, en mode de chauffage, le rendement augmente avec l'augmentation de la température de retour du condenseur, qui est fonction de la température du sol ou bien de l'air. Or en hiver $T_{\text{Sol}} > T_{\text{Air}} \rightarrow \text{COP}_{\text{Sol}} > \text{COP}_{\text{Air}}$

Le même scénario se répète en été, car $T_{\text{Sol}} < T_{\text{Air}} \rightarrow \text{COP}_{\text{Sol}} > \text{COP}_{\text{Air}}$

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

CARACTERISTIQUES DES POMPES A CHALEUR

Une fois le type et la puissance de la pompe à chaleur sélectionnés, le concepteur d'une installation doit pouvoir disposer des renseignements suivants :

- la puissance calorifique et frigorifique à divers points de fonctionnement.
- la puissance électrique absorbée en mode chaud et en mode froid le cas échéant.
- la puissance acoustique pondérée A.
- les pertes de charge des échangeurs selon le mode froid ou le mode chaud.
- les températures limites de fonctionnement.

(Limites de températures d'entrée/sortie d'air ainsi que d'entrée/sortie d'eau entre lesquelles la pompe à chaleur est capable de fonctionner)

- les débits minima et maxima d'air et d'eau
- les sécurités thermiques, électriques et frigorifiques
- la charge en fluide frigorigène de la machine.
- le type de système de dégivrage pour les pompes à chaleur air/eau
- les protections contre les démarrages à froid
- le poids et les moyens de levage
- l'encombrement causé lors de l'installation
- les diamètres de raccordement hydrauliques et électriques.

RECUPERATION PAR CAPTEURS VERTICAUX (SONDES GEOTHERMIQUES)

Le principe de récupération de chaleur est fait en récupérant les calories en faisant circuler un fluide caloporteur dans des tubes enterrés pour les amener à la pompe à chaleur. Dans le cas d'un captage vertical, cette chaleur provient, pour une part de la chaleur du sous sol, et d'autre part de la chaleur solaire stockée dans la couche superficielle.

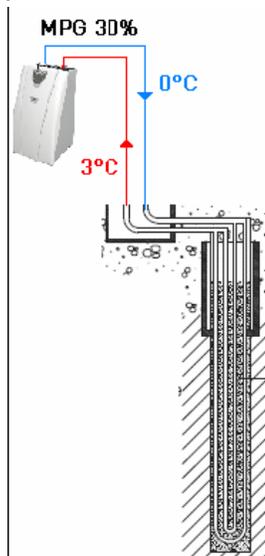
Les capteurs verticaux sont constitués de un ou deux tubes en U, descendant à une profondeur environs 100m et parcourus par un mélange eau + mono propylène glycol (saumure – 15°C).

Le capteur est placé dans un forage vertical (réalisé par un foreur professionnel). La puissance extraite est de 20 à 60 W/ml de forage ce qui correspond à un prélèvement énergétique supérieur à 100kWh/ml par an.

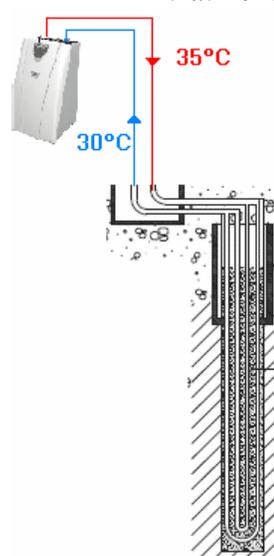
Régime de circulation d'eau : Hiver (Gauche) ; Eté (Droite)

La LETTRE

Numéro 24



Mai 2013



Les capteurs sont en tubes de Polyéthylène Haute ou Basse Densité (PEHD ou PEBT), Ø25, 32 et 40mm prévus pour une pression nominale de 12,5bar. Le capteur doit être :

- Résistant à la corrosion.
- Résistant au froid et à la chaleur.
- Résistant aux impacts.
- Prévu pour une longue durée de vie (100 ans).
- A faible perte de charge.
- Soudé avec des essais en pression.

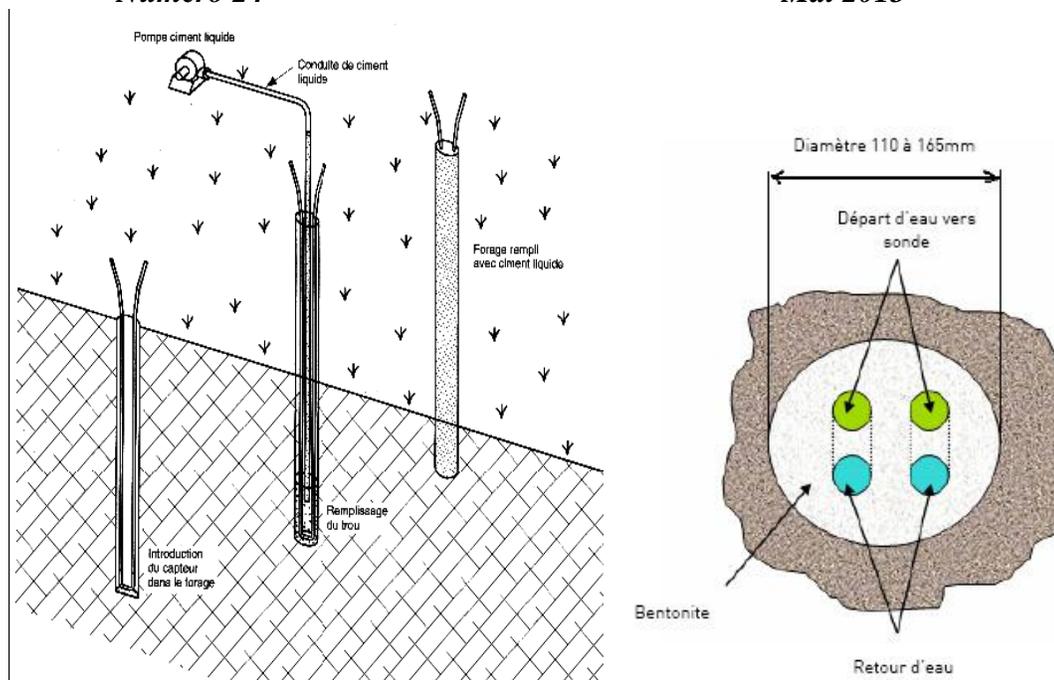
La partie inférieure du capteur (ou pied de sonde) est équipée d'un contre poids pour faciliter sa mise en place. Celle-ci terminée le forage est rempli avec un mélange de ciment et de bentonite (ou produit similaire à base de cellulose) qui stabilise le forage dans sa géométrie originelle.

Les Différentes phases de réalisation d'une sonde géothermique

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013



Conditions Climatiques Générales et Demandes de Puissance et d'Énergie

La variation de la température d'air ambiant estimée au site est comprise entre 5°C comme minimum, et 30°C pour maximum.

Dans le but de déterminer les puissances d'appoint de chauffage et de climatisation, les thermostats sont estimés à opérer à 20 et 24 °C dans les périodes froides et chaudes respectivement.

L'humidité relative atteint un maximum de 70%.

Suite à une simulation sur **E-quest**, un logiciel de simulation énergétique, les demandes de puissance calorifiques furent estimées à 35KW de chauffage et 58KW de climatisation. Par suite, les demandes énergétiques annuelles sont calculées à 38,700KWh d'énergie de climatisation et à 8,300 KWh d'énergie de chauffage. L'équivalent en pleine charge sera de 667 heures de climatisation et 237 heures de chauffage.

Sélection des Pompes à Chaleur

Deux pompes à chaleur CIAT Ageo HT120 furent sélectionnées. Les deux seront fonctionnels en été, et une seule en hiver. Chaque pompe à chaleur a les caractéristiques suivantes :

- Capacité de refroidissement : 30.1KW
- Capacité de chauffage : 36.3KW

Cette lettre a été réalisée grâce au support de l'ADEME (www.ademe.fr)
 Directeur de publication: Hassane Jaber, Rédacteur en chef: Tony Matar
 Email: alme@inco.com.lb web: www.almee.org.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

- COP Refroidissement : 4.75
- COP Chauffage : 5.67
- Triphasé
- Vanne 4 directions inclus
- Pompes primaires de condenseur inclus
- Surchauffeur inclus

Conception des forages

Les forages sont estimés à absorber 60W/ml (ml=mètre linéaire). D'où la nécessité de 1200m de forage souterrain. Donc, 12 trous on eu place, chacun de 100m de profondeur, avec deux sondes verticales dans chaque forage relatif à 4800m en total de tuyauterie dans les forages.

Sélection de la tuyauterie et des accessoires

Toute tuyauteries et accessoires ont été importé de RYB-Terra (France) ainsi que le coulis de remplissage qui favorise l'échange sonde/sol.

Synthèse Financière :

Le tableau suivant résume le financement de ce projet.

Article	Description	Unité	Qté	Prix Unité (\$)	Prix Total(\$)
1	Pompes à Chaleur	u	2	\$19,250.0	\$38,500
2	Appareillage de Contrôle	u	1	\$9,640.0	\$9,640
3	Bouteille d'eau chaude 1,000 Litres	u	1	\$7,000.0	\$7,000
4	Reservoir Tampon 1,000 Litres	u	1	\$2,500.0	\$2,500
5	Pompe Circulatrice Du Circuit des sondes	u	1	\$2,406.0	\$2,406
6	Pompe Circulatrice Du ballon d'eau chaude	u	1	\$549.0	\$549
7	Sondes Géothermiques	u	12	\$1,100.0	\$13,200
8	Poids de Lestage	u	12	\$45.0	\$540
9	Coulis de Remplissage	Kg	23,250	\$0.4	\$9,300
10	Colecteurs 12 sorties	u	2	\$1,400.0	\$2,800
11	valves et accessoires	u	1	\$5,000.0	\$5,000
12	Forage	u	12	\$8,000.0	\$96,000
13	Pompage de Coulis Géosolide	u	1	\$10,000.0	\$10,000
14	Tableau Electrique	u	1	\$3,720.0	\$3,720
15	Test de Réponse Thermique	u	1	\$5,000.0	\$5,000
16	Ventilo-Convecteurs	u	22	\$1,500.0	\$33,000
17	Tuyauterie des Ventilo-Convecteurs	u	1	\$12,000	\$12,000
Total					\$251,155

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

Il faut bien noter que ces prix ont été modifiés au cours de l'installation suite à la variation de l'euro et la variation de quelques fournisseurs.

Différentes parties de l'installation

L'installation est composée des parties suivantes :

- La station de production géothermique : située dans un local technique à l'intérieur du bâtiment, où l'on dispose des pompes à chaleur, la bouteille d'eau chaude sanitaire, le réservoir tampon, et les pompes de circulation.
- Le circuit géothermique : qui va permettre le transfert énergétique au sol.
- Le système de connexion : qui va permettre la circulation d'eau entre la chambre technique, et le circuit géothermique, et composé de pompes, tuyauterie, et tous accessoires adéquats.

3- Géothermie : Installation

L'installation du projet a débuté en fin novembre. Le forage a eu lieu au début, et a duré 15 jours de travail. Chaque jour de forage nécessite 1m³ de diesel et autour de 20m³ d'eau. Puis, l'injection de coulis de remplissage dans les trous forés pris environs une semaine.

Ensuite, l'installation des sondes et des équipements dans la chambre technique s'est déroulé en parallèle durant 5 jours, et finalement la connexion entre les deux sites pris lieu dans 2 jours.

Nous avons été confrontés à plusieurs problèmes citons-en :

- La pluie, qui faisait du forage une tâche très difficile.
- La nature du sol en roche qui a ralenti le forage et a gaspillé une très grande quantité de coulis de remplissage dans les fissures souterraines.
- L'absence d'électricité nécessaire aux appareils de pompage de ciment d'où le recours aux générateurs décentralisés.
- Et d'autres problèmes de coordination entre les travaux de structure, et électromécaniques, se rapportant à la municipalité directement, car les travaux étaient arrêtés et il n'y avait pas de personnel présent au site. Etc...

Jusqu'au jour, 95% de l'installation est en place, et on attend les résultats du test thermique, afin de finaliser toute connexion. Les photos ci-dessous décrivent l'installation entière.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

Photo du Site (Gauche) – Machine De Forage (Droite)



Coulis De Remplissage (Gauche) – Installation des Sondes (Droite)



Vue de L'ouverture du forage (Gauche) – Installation du Test Thermique (Droite)



Coulis de Remplissage (Gauche) – Vue Finale du Champ de forage (Droite)

Cette lettre a été réalisée grâce au support de l'ADEME (www.ademe.fr)
Directeur de publication: Hassane Jaber, Rédacteur en chef: Tony Matar
Email: alme@inco.com.lb web: www.almee.org.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013



Gauche à Droite : Pompe à Chaleur – Découpleur – Ballon D'eau Chaude – Réservoir Tampon



4- Géothermie : Analyse Energétique

Le cahier technique de la pompe à chaleur est inséré ci-dessous. Au conditions internationales (**Eurovent** en jaune), la pompe à chaleur a une puissance frigorifique de 30.1KW, une puissance de chauffage de 36.3KW, et une puissance électrique de 6.4 KW.

Dans cette section, on va comparer à chaudière conventionnelle à mazout et à gaz de COP 0.9 et à une pompe à chaleur conventionnelle de même marque.

Cette lettre a été réalisée grâce au support de l'ADEME (www.ademe.fr)
Directeur de publication: Hassane Jaber, Rédacteur en chef: Tony Matar
Email: alme@inco.com.lb web: www.almee.org.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013



Water-to-water
reversible heat pumps

AGEO

COOLING AND HEATING CAPACITIES

Cold water outlet temp. (°C)	Hot water outlet temp. (°C)																			
	30			35			40			45			50			55				
	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW	Pf kW	Pa kW	Pc kW		
40% monopro pylene glycol solution	-6	19.0	5.5	24.3	17.9	6.2	23.8	16.7	6.9	23.4	15.4	7.8	22.9	14.2	8.8	22.5	12.6	9.9	21.9	
	-4	20.6	5.5	25.9	19.4	6.2	25.4	18.2	7.0	24.9	16.9	7.8	24.3	15.5	8.8	23.8	14.0	9.9	23.3	
	-2	22.2	5.6	27.6	21.0	6.2	27.0	19.7	7.0	26.4	18.3	7.9	25.8	16.8	8.8	25.2	15.3	9.9	24.7	
120HT Municipal water	0	23.9	5.6	29.3	22.7	6.3	28.7	21.3	7.1	28.1	19.8	7.9	27.4	18.3	8.9	26.7	16.6	10.0	26.1	
	2	26.0	5.5	31.3	24.4	6.3	30.5	22.9	7.1	29.8	21.4	8.0	29.0	19.8	8.9	28.3	18.0	10.0	27.5	
	5	29.6	5.7	35.1	28.0	6.4	34.3	26.5	7.2	33.4	24.7	8.0	32.5	22.8	9.0	31.5	20.9	10.1	30.5	
	6	30.6	5.7	36.2	29.1	6.4	35.3	27.4	7.2	34.4	25.6	8.1	33.4	23.7	9.0	32.4	21.7	10.1	31.4	
	7	31.6	5.8	37.2	30.1	6.4	36.3													
	8	32.7	5.8	38.3	31.1	6.5	37.4	29.4	7.2	36.4	27.4	8.1	35.2	25.4	9.1	34.2	23.4	10.1	33.1	
	10	34.8	5.8	40.5	33.2	6.5	39.6	31.4	7.3	38.4	29.4	8.1	37.2	27.3	9.1	36.0	25.1	10.1	34.8	
	12	37.2	5.9	42.9	35.4	6.6	41.8	33.5	7.3	40.6	31.4	8.2	39.3	29.2	9.1	38.0	26.9	10.1	36.7	
	15	40.7	6.0	46.6	38.9	6.7	45.4	36.9	7.4	44.1	34.7	8.2	42.6	32.3	9.2	41.1	29.9	10.2	39.7	
	18	44.8	6.1	50.8	42.8	6.7	49.4	40.7	7.4	48.0	38.2	8.3	46.3	35.7	9.2	44.6	33.1	10.2	42.9	
20	47.4	6.2	53.5	45.2	6.8	51.9	43.0	7.5	50.3	40.5	8.3	48.6	37.8	9.2	46.8	35.2	10.2	45.2		

Cc: Validated cooling capacity based on the operating limits.
Pi: Compressor power input.
Hc: Validated heating capacity based on the operating limits.

Glycol / water solution required.
Refer to the maintenance manual for information on adjusting the water flow rate on the outdoor exchanger (ground water loop).

Le cahier technique de la pompe à chaleur conventionnelle CIAT est inséré ci-dessous :

Cette lettre a été réalisée grâce au support de l'ADEME (www.ademe.fr)
Directeur de publication: Hassane Jaber, Rédacteur en chef: Tony Matar
Email: alme@inco.com.lb web: www.almee.org.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013



**Air-to-water reversible heat pumps and
water chillers**

AQUALIS 2

QUICK SELECTION TABLE

AQUALIS 2 - COOLING ONLY								35T	50T	65T	75T
AQUALIS 2 - REVERSIBLE		20H	28H	35H	50H	20HT	28HT	35HT	50HT	65HT	75HT
Cooling capacity (cooling only)	kW							8.5	11.8	14.7	17.5
Power Input	kW							3.4	4.4	5.0	6.4
EER								2.5	2.7	3.0	2.7
Sound level	dB(A)	41	46	47	45	41	46	47	45	48	50
Heating capacity (reversible)	kW	6.1	8.3	10.2	13.1	6.1	8.4	10.2	13.8	17.2	19.4
Power Input	kW	1.7	2.2	2.8	2.9	1.6	2.0	2.6	3.5	4.2	4.8
COP		3.6	3.8	3.6	4.2	3.8	4.1	3.9	3.9	4.1	4.0
Power supply voltage		230V - 1ph - 50 Hz + Earth + N					400V - 3ph - 50 Hz + Earth + N				

NOTE: Quick selection table based on Eurovent conditions.

COOLING: 7/12°C AIR: 35°C / HEATING: 35/30°C AIR - DB: 7°C / WB 6°C

Le tableau ci-dessous montre un prix estimatif d'installation, et de consommation annuelle. Notez bien que le prix d'installation est seulement celui des équipements techniques, et non les radiateurs ni les ventilo-convecteurs...

Analyse Opérationnelle				
Etude de Cas		Energie Anuelle (KWh)	8,300	38,700
		Temps équivalent de pleine charge (Heures)	229	1,286
Equipement	Prix D'installation	Description	Chauffage	Refroidissement
Pompe à Chaleur Géothermique	\$250,000	Puissance (KW)	36.3	30.1
		Puissance Electrique (KW)	6.4	
		COP	5.7	4.7
		Consommation Annuelle (KWh)	1,463	8,229
		Consommation Annuelle (\$)	\$195	\$1,097
Pompe à Chaleur Aérothermique	\$60,000	Puissance (KW)	13.8	11.8
		Puissance Electrique (KW)	4.2	5.0
		Quantité	3	5
		COP	3.3	2.4
		Consommation Annuelle (KWh)	2,881	32,143
		Consommation Annuelle (\$)	\$384	\$4,286

Cette lettre a été réalisée grâce au support de l'ADEME (www.ademe.fr)
 Directeur de publication: Hassane Jaber, Rédacteur en chef: Tony Matar
 Email: almee@inco.com.lb web: www.almee.org

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

Chaudière à Mazout	\$15,000	Puissance Calorifique (KWh/Kg)	12.0	-
		COP	0.9	-
		Consommation Annuelle (Kg)	769	-
		Consommation Annuelle (\$)	\$784	-
Chaudière à Gaz	\$25,000	Puissance Calorifique (KWh/Kg)	12.8	-
		COP	0.9	-
		Consommation Annuelle (Kg)	722	-
		Consommation Annuelle (\$)	\$706	-

Analyse :

Pour le chauffage et la climatisation de ce local, Il ya 3 disposition de Cas résumés dans le tableau ci-dessous.

Disposition	Equipement	Investissement (\$)	Consommation Annuelle (\$)	CO ₂ (Kg)
1	Aérothermie + Chaudière Mazout	\$75,000	\$5,070	12,548
2	Aérothermie + Chaudière Gaz	\$85,000	\$4,991	11,967
3	Géothermie	\$250,000	\$1,292	2,908

- La première disposition est la conventionnelle. C'est la plus répandue au Liban, qui présente l'investissement minimal, mais une large consommation, et un grand dégagement de CO₂.
- La seconde disposition existe aussi au Liban mais chez des clients spéciaux, dont la mentalité est environnementale.
- La troisième est unique, et pour laquelle on va évaluer.

Le tableau Suivant montre la différence d'économie entre la Géothermie, et les deux autres Projets.

	Investissement (\$)	Economie (\$)	Temps De Retour Simple (Ans)
Disposition 3 VS 1	\$175,000	\$3,778	46
Disposition 3 VS 2	\$165,000	\$3,699	45

Il est clair que la géothermie n'est pas optimale du côté économique, surtout qu'elle présente un cout d'investissement très élevé, et un temps de retour de 45 ans.

Solutions :

Cette lettre a été réalisée grâce au support de l'ADEME (www.ademe.fr)
 Directeur de publication: Hassane Jaber, Rédacteur en chef: Tony Matar
 Email: alme@inco.com.lb web: www.almee.org.

La LETTRE

Numéro 24

Mai 2013

L'un des plus grands facteurs qui affectent directement la géothermie est le forage qui présente la moitié du prix. En passant à des loupes horizontales, on pourrait réduire le prix de forage de 80%, éliminer 50% du prix de coulis de remplissage, et éliminer totalement le pompage de coulis car il sera simplement versé. Ceci seul présente 35% du cout total d'investissement donc, une amélioration de 35% du temps de retour qui sera environs à 30 ans.

Avec d'autres facilités gouvernementales (réduction des taxes et des impôts...) on pourrait réduire le temps de retour jusqu'à 25 ans et la géothermie serait une solution idéale pour la consommation énergétique et le dégagement des gaz à effet de serre.

5- Conclusion

Il est clair que la géothermie est une très bonne solution envers le dégagement du CO₂ produit par le chauffage et la climatisation, pourtant un tel projet n'est pas rentable, surtout qu'il nécessite un grand investissement et une large surface d'installation qui est quasi-nulle dans les zones urbaines. Pourtant, on pourrait chercher d'autres alternatives comme le refroidissement dans la mer, les rivières ou les nappes phréatiques qui a un rendement plus élevé.