

ETUDE ET MISE EN ŒUVRE D'UNE POMPE A CHALEUR



Etudiants :

Kévin BELANGER

Adeline GIDOUIN

Lucie BOUCHET

Etienne LEMESRE

Enseignant-responsable du projet :

Michel CLEVERS

Date de remise du rapport : 19/06/09

Référence du projet : **STPI/P6-3/2009 – 025**

Intitulé du projet : ***Etude d'une pompe à chaleur***

Type de projet : ***expérimental et théorique***

Objectifs du projet

Dans un premier temps, comprendre et étudier le fonctionnement théorique d'une machine thermique à travers la pompe à chaleur. Puis, une fois la pompe à chaleur familière, appliquer nos connaissances en thermodynamique acquises lors des années précédentes sur la pompe et manipuler cette dernière pour approfondir ses différents principes.

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction	5
2.	Méthodologie / Organisation du travail	6
3.	Travail réalisé et résultats	7
3.1.	Rappel de Thermodynamique	7
3.1.1.	Systèmes thermodynamiques	7
3.1.2.	L'énergie d'un système	7
3.1.3.	Le travail de forces extérieures.....	7
3.1.4.	Premier principe de la thermodynamique	8
3.1.5.	Deuxième principe de la thermodynamique	8
3.2.	Le principe de la pompe à chaleur	8
3.2.1.	Le fonctionnement	8
3.2.2.	Une faible consommation d'énergie	10
3.2.3.	Le réfrigérateur	10
3.2.4.	Différents systèmes	12
3.3.	Étude de la consommation d'une pompe à chaleur.....	13
3.3.1.	Variation du coût d'utilisation d'une pompe à chaleur en fonction du lieu géographique.....	13
3.3.2.	Variation du coût d'utilisation d'une pompe à chaleur en fonction de la superficie de l'habitation	16
3.3.3.	Aides financières à l'installation d'une pompe à chaleur	18
3.4.	Expérience	19
3.4.1.	Matériel	19
3.4.2.	Expérience.....	21
4.	Conclusions et perspectives	24
5.	Bibliographie	25
6.	Annexes	26
6.1.	Documentation technique	26
	Voir la documentation du fournisseur Leybold	26
6.2.	Interviews.....	26
6.2.1.	Monsieur Yon.....	26
6.2.2.	Monsieur Ponsinet	27

1. INTRODUCTION

Les enjeux énergétiques étant de plus en plus importants dans notre société, de nouvelles techniques ont été mises en œuvre et notamment dans les systèmes de chauffage domestique. Mais sont-elles toutes efficaces ?

Au cours de ce projet, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au cas de la pompe à chaleur. Celle-ci est apparue à la fin du 19^e siècle, et s'est améliorée au fil des années suivant les découvertes scientifiques dans le domaine de la thermodynamique. Sous la pression des exigences environnementales, le développement des pompes à chaleur connaît depuis le début des années 90 un nouveau souffle en Europe. En effet, leur utilisation permet la réduction des rejets de CO₂ dans l'atmosphère. De plus, elle s'est popularisée comme chauffage domestique en France suite au premier choc pétrolier. Il existe même des crédits d'impôts et des incitations fiscales pour leur mise en place. Mais qu'est ce que c'est ?

La pompe à chaleur est l'élément essentiel d'une installation géothermique et aérothermique. C'est grâce à elle que la chaleur du sol ou de l'air peut être récupérée, amplifiée puis restituée à l'intérieur des bâtiments à chauffer.

Dans cette étude, nous explorerons toutes les facettes de la pompe à chaleur afin de mieux comprendre son fonctionnement. Pour cela, nous rappellerons tout d'abord les grands principes de la thermodynamique avant de décrire les caractéristiques et le fonctionnement de la pompe à chaleur. Puis, afin de mieux appréhender la consommation de la PAC, une étude comparative sera réalisée en fonction du lieu et de la superficie de l'habitation. Enfin, pour que cela soit plus concret, nous présenterons les expériences que nous avons effectuées et analyserons ensuite les résultats obtenus.

2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Après avoir découvert le sujet, nous avons commencé à nous documenter sur les pompes à chaleur mais surtout, nous avons repris nos cours sur les principes de thermodynamique afin de revenir aux bases. Il nous a semblé judicieux que tous les membres du groupe se penchent sur ces bases et sur la pompe à chaleur en général pour bien comprendre le sujet et pouvoir démarrer de façon plus efficace.

Ensuite, nous avons recherché quelles manipulations nous pouvions faire avec la pompe à chaleur que nous avions dans le laboratoire. Une fois les manipulations choisies, nous avons jugé bon de les faire toutes et de pouvoir ainsi profiter du côté expérimental de notre sujet. Il est évident que dans les moments d'attente des expériences, nous nous divisions en deux groupes de deux, le premier groupe restait à côté de l'expérience pour vérifier son bon déroulement pendant que le deuxième se penchait sur nos recherches théoriques.

Ceci fait, nous sommes retournés à nos études théoriques et avons divisé le travail : Adeline et Kévin ont exploité nos manipulations et les résultats trouvés; Lucie a approfondit le principe même de la pompe à chaleur, puis Etienne a fait des études comparatives. Il est évident que chacun a participé à chaque partie de plus ou moins loin. En effet, tout le groupe s'est beaucoup intéressé à la globalité du sujet et à l'élaboration du sujet le concernant. C'est pourquoi les noms qui apparaissent sur l'organigramme ci-dessous sont les personnes qui ont majoritairement travaillé sur la tâche correspondante.

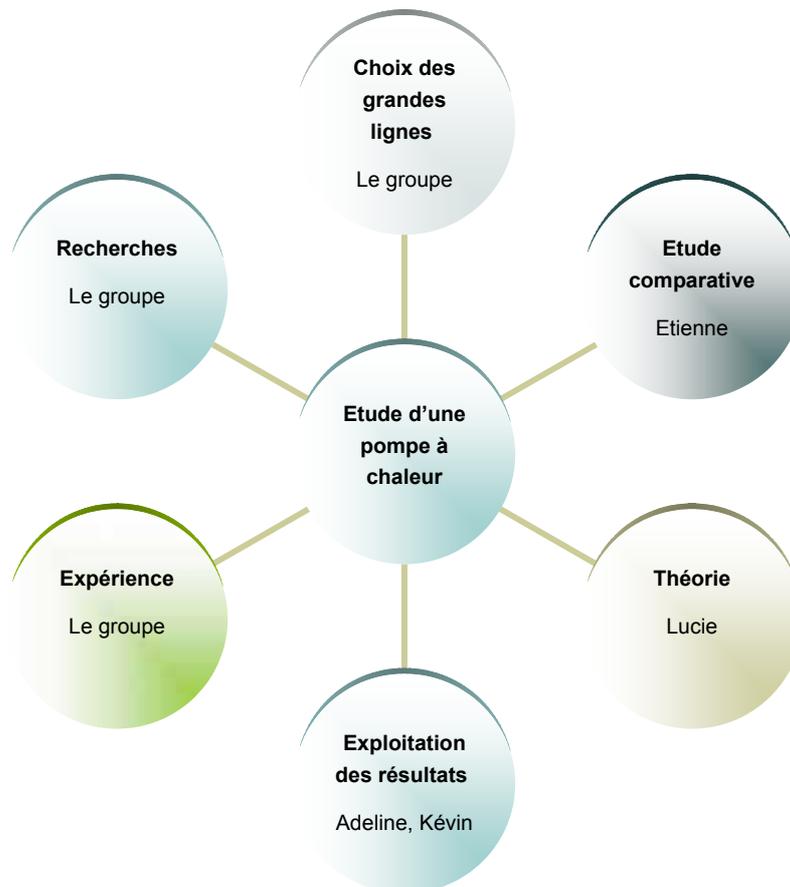


figure 1 : Organigramme des tâches réalisées.

3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

3.1. RAPPEL DE THERMODYNAMIQUE

3.1.1. *Systèmes thermodynamiques*

Définition :

Système élémentaire : système homogène (la paroi entourant constitue un système élémentaire).

Système composite : réunion de plusieurs systèmes élémentaires.

Système isolé : si aucune grandeur extensive n'est échangée avec le milieu extérieur. (Exemple de grandeur extensive : matière, énergie, masse, volume etc.)

Système fermé : s'il n'y a pas de matière échangée avec l'extérieur.

Système ouvert : s'il y a échange de matière et/ou d'énergie avec l'extérieur.

3.1.2. *L'énergie d'un système*

L'énergie totale E d'un système thermodynamique est définie en fonction de l'énergie cinétique E_c , de l'énergie potentielle E_p et de l'énergie interne U .

$E_c = \frac{1}{2}(mV^2)$ représente les énergies liées à la vitesse.

E_p pouvant représenter l'énergie potentielle de pesanteur, de gravitation et élastique.

U qui regroupe toutes les autres énergies non comprises dans les deux précédentes (énergie de translation, de rotation et de vibration des atomes etc.)

$E_{méca} = E_c + E_p$ représente l'énergie mécanique.

Relation entre ces différentes énergies :

$$\text{eq 1.} \quad E = U + E_c + E_p$$

$$\text{ou } E = U + E_{méca}$$

3.1.3. *Le travail de forces extérieures*

Le travail d'une force est l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace (l'objet subissant la force se déplace ou se déforme). Si par exemple on pousse une voiture, le travail de la poussée est l'énergie produite par cette poussée. Le travail est exprimé en joules (J), et est souvent noté W .

Dans l'étude de machines thermiques telle que la pompe à chaleur, c'est le travail des forces de pression qui nous intéresse.

$$\text{eq 2.} \quad \delta W = -P \cdot dV$$

δW représente le travail mécanique élémentaire échangé avec l'extérieur.

P représente la pression extérieure.

dV représente les variations élémentaires de volume du système.

3.1.4. Premier principe de la thermodynamique

Pour tout système fermé, il existe une grandeur appelé énergie du système dont la valeur E est une fonction des variables d'état. Cette grandeur est conservative (production= 0).

Enoncé du premier principe : pour un système fermé décrivant une transformation cyclique, la somme algébrique des quantités d'énergie échangées par le système avec l'extérieur est nulle.

On a la relation :

$$\text{eq 3.} \quad \delta U = W + Q$$

La chaleur Q représente l'échange de quantité d'énergie.

3.1.5. Deuxième principe de la thermodynamique

Pour tout système fermé il existe une grandeur extensive appelé entropie du système dont la valeur S est une fonction des variables d'état.

L'entropie S représente « la mesure du désordre »

$$\text{eq 4.} \quad S_{\text{reçu}}(t_1 \rightarrow t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \frac{\delta Q}{T_{\text{front}}}$$

$$S_{\text{produit}}(t_1 \rightarrow t_2) \geq 0$$

En résumé « la chaleur ne passe pas d'elle-même d'un corps froid à un corps chaud »

3.2. Le principe de la pompe à chaleur

3.2.1. Le fonctionnement

Notre projet est basé sur l'étude de la pompe à chaleur, il a donc fallu dans un premier temps appréhender son principe pour mieux comprendre ce que nous réalisons lors des manipulations.

Tout d'abord, la pompe à chaleur (PAC) est composée de 4 éléments principaux :

- le **compresseur**,
- deux **échangeurs** : l'**évaporateur** qui capte l'énergie à l'extérieur et le **condenseur** qui la restitue à l'intérieur,
- le **détendeur**.

La PAC a pour principe même de transférer la chaleur de l'air extérieur pour l'injecter à l'intérieur de la maison. Car l'air, même si il est froid, contient de la chaleur.

On définit donc deux milieux : la source froide d'où l'on extrait l'énergie et la source chaude où on la réinjecte. La température réelle des sources n'est pas importante, bien que pour avoir une PAC intéressante, il est mieux d'avoir une source chaude qui a une température plus élevée que la source froide.

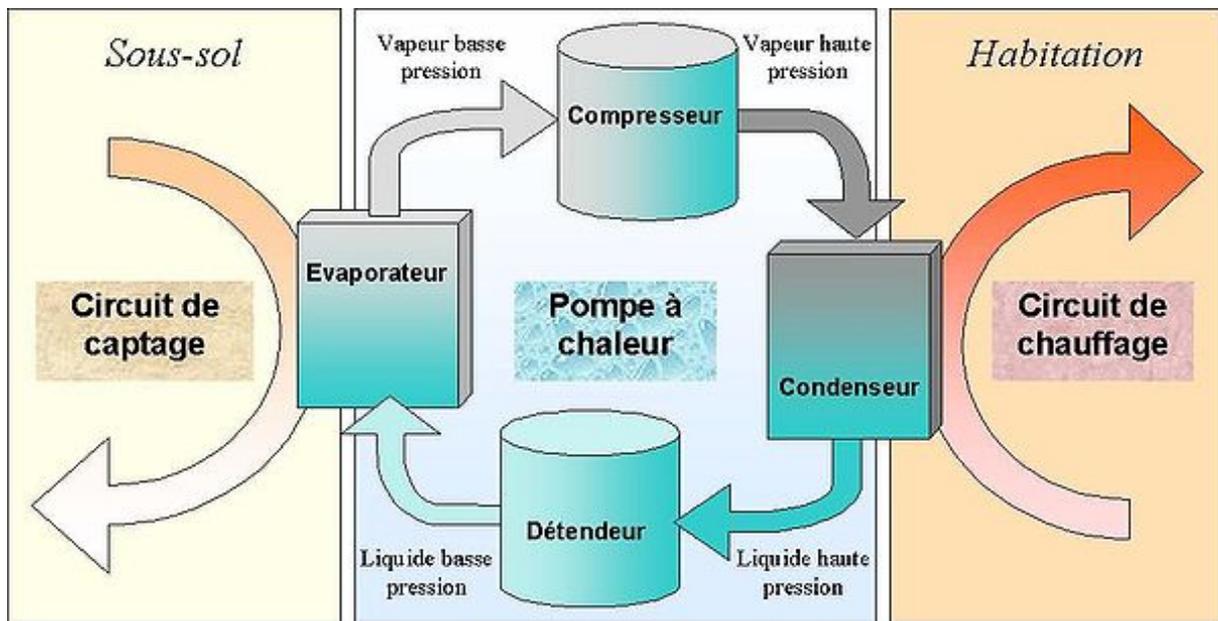


figure 2 : Schéma du principe de fonctionnement de la pompe à chaleur.

En quelques mots, voici le fonctionnement de la PAC à travers ses différents constituants.

La compression : le compresseur va aspirer le fluide frigorigène qui est sous forme de gaz à basse température. En comprimant le gaz, sa température va s'élever en même temps que sa pression. Nous aurons donc à la sortie du compresseur un gaz chaud à une pression élevée.

La diffusion de la chaleur au condenseur: Le gaz chaud va être dirigé vers un échangeur - le condenseur - dans lequel circule un fluide à réchauffer : de l'eau du réseau de chauffage par exemple ou l'air intérieur. Le gaz chaud va donc transmettre une partie de son énergie au fluide à chauffer dont la température va augmenter. Du coup, le gaz frigorigène va condenser, c'est à dire qu'il va passer de l'état gazeux à l'état liquide, d'où le nom de condenseur.

La détente : Le frigorigène à l'état liquide, qui est toujours à pression élevée, va être ensuite détendu au travers du détendeur. Dans ce dernier, la pression va chuter abaissant ainsi la température du frigorigène qui reste à l'état liquide. A la sortie du détendeur, la température du frigorigène est beaucoup plus basse et est inférieure à la température de la source de récupération.

La récupération de la chaleur de l'environnement par l'évaporateur : Le frigorigène, froid et à l'état liquide, va traverser un deuxième échangeur - l'évaporateur - dans lequel circule le fluide extérieur (air extérieur, eau de nappe ou eau échangeant avec un capteur enterré dans le sol) est plus chaud que le frigorigène. Ce dernier va donc récupérer les calories, l'énergie en quelque sorte, de ce fluide extérieur. En récupérant cette énergie, le frigorigène va entrer en ébullition et donc se transformer en gaz, c'est l'évaporation, d'où le nom d'évaporateur.

Le gaz ainsi formé est ensuite aspiré par le compresseur pour un nouveau cycle.

Remarque 1

La température de la source froide doit nécessairement être supérieure à la température d'évaporation du fluide et celle de la source chaude inférieure à celle de condensation du fluide pour que ces changements d'état se produisent. Dans le cas contraire, les changements d'état ne se produiraient pas et l'efficacité du circuit frigorifique ne serait qu'au mieux de 1 ou 0.

En résumé, la pompe à chaleur sert donc à :

- récupérer de l'énergie dans le milieu extérieur (sol/eau/air) grâce à l'évaporateur,
- remonter le niveau de température de cette énergie thermique, via le compresseur,
- transférer cette énergie au bon niveau de température au milieu intérieur que l'on souhaite chauffer.

3.2.2. Une faible consommation d'énergie

Il faut savoir qu'un atout majeur des pompes à chaleur réside dans leur faible consommation d'énergie électrique au regard de l'énergie thermique restituée. C'est pour effectuer la remontée du niveau de température de la chaleur captée et le transfert de la chaleur d'un milieu vers un autre qu'a lieu la consommation d'énergie électrique. Pour 1 kWh d'énergie électrique consommée, ce sont 3 à 4 kWh d'énergie thermique qui sont restitués au bâtiment. Soit 2 à 3 kWh d'énergie renouvelable et gratuite qui sont récupérées, transférées et utilisées pour le chauffage.

Le fait que la chaleur de l'environnement présente dans l'air, le sol et l'eau souterraine soit une énergie toujours disponible, gratuite et sans cesse renouvelée grâce au rayonnement solaire et aux pluies n'est pas négligeable. Ainsi, la pompe à chaleur permet de couvrir 100% des besoins de chauffage d'un logement en consommant seulement 30% d'énergie électrique, les 70% restants étant puisés dans l'environnement tout en le préservant. Ainsi, elle permet d'économiser les énergies fossiles et de limiter les rejets de gaz à effet de serre.

Le Coefficient de Performance (COP) est un chiffre important pour les pompes à chaleur; il caractérise la capacité de l'appareil à restituer de la chaleur et permet de comparer les performances des appareils entre eux. Ce coefficient correspond au rapport entre l'énergie thermique utile restituée pour le chauffage (Q_2) et l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner la pompe à chaleur (W). C'est donc l'équivalent d'un rendement mais appliqué à une pompe à chaleur.

eq 5. $COP = Q_2 / W$

Ce COP généralement proche de 3 signifie que l'énergie thermique utile restituée pour le chauffage est trois fois supérieure à l'énergie électrique consommée et donc facturée.

3.2.3. Le réfrigérateur

Le réfrigérateur est le système de PAC le plus connu et sûrement l'exemple le plus concret de notre vie quotidienne; il nous paraît nécessaire de nous attarder un peu sur le sujet.

Le réfrigérateur est composé de cinq éléments de base, dont les quatre que nous avons cités précédemment pour la PAC :

- le **compresseur**,
- l'**échangeur de chaleur (condenseur)** sous forme de série de tuyaux ou d'un serpentín enroulé en dehors de l'unité
- le **détendeur**,
- l'**échangeur de chaleur (évaporateur)** sous forme de série de tuyaux ou d'un serpentín enroulé en dehors de l'unité
- le **liquide réfrigérant** qui s'évapore à l'intérieur du réfrigérateur pour créer des basses températures.

Le mécanisme du réfrigérateur étant similaire à celui d'une PAC en général, il semble inutile de le rappeler. Il faut cependant se rappeler que l'idée de base d'un réfrigérateur est d'utiliser l'évaporation d'un liquide pour absorber la chaleur. Posons-nous la question suivante, certes moins technique mais plus pratique : pourquoi un poulet chaud sera froid deux heures plus tard dans un réfrigérateur ? La réponse est simple et facilite la compréhension d'une PAC : le poulet chaud ayant fait grimper la température à l'intérieur du réfrigérateur, le thermostat donne l'ordre au compresseur d'expulser ce surplus de calories pour revenir à la température souhaitée : c'est pour cela que la grille placée au dos du réfrigérateur est chaude.

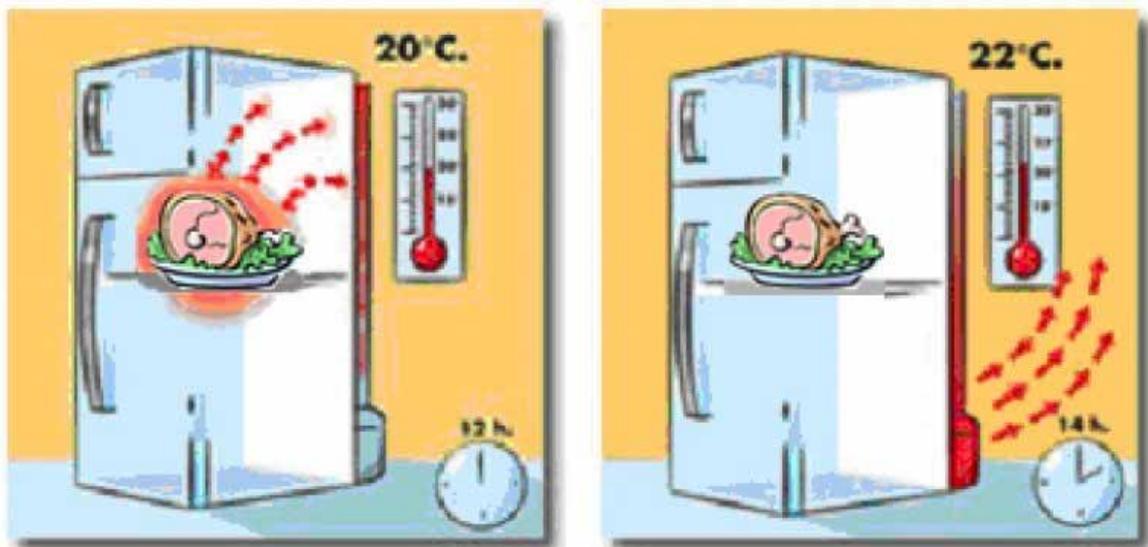


figure 3 : Dessin simplifié du fonctionnement d'un réfrigérateur

3.2.4. Différents systèmes

Il existe trois différentes sources pour récupérer l'énergie en fonction du milieu environnant : l'air, l'eau ou le sol.

Parlons donc de ces 3 principes :

La récupération de la chaleur dans l'air extérieur :

La chaleur prélevée dans l'air extérieur est transférée par la pompe à chaleur dans l'air ambiant du logement ou dans le circuit d'eau chaude de l'installation de chauffage.

La récupération de la chaleur dans l'eau :

La chaleur est prélevée dans une nappe phréatique, un lac, une réserve d'eau ou encore un cours d'eau. Cette chaleur est ensuite transférée par la pompe à chaleur au circuit d'eau chaude de l'installation de chauffage. Très performant, la PAC peut chauffer l'ensemble du logement. Mais il faut savoir que l'exploitation des eaux est soumise à une réglementation spécifique.

La récupération de la chaleur dans le sol :

La chaleur est prélevée dans le sol à l'aide :

- d'un réseau de tubes déroulés à faible profondeur dans le sol si la surface du terrain est suffisante ; c'est-à-dire une surface de terrain disponible d'environ 1,5 fois la surface à chauffer. Sur cette surface de terrain, aucune plantation avec des racines profondes ne pourra être réalisée.
- de sondes verticales qui peuvent atteindre des profondeurs d'environ 100 m.

Cette chaleur est ensuite transférée par la pompe à chaleur au circuit d'eau chaude de l'installation de chauffage.

Il faut savoir qu'il existe aussi **différents émetteurs** :

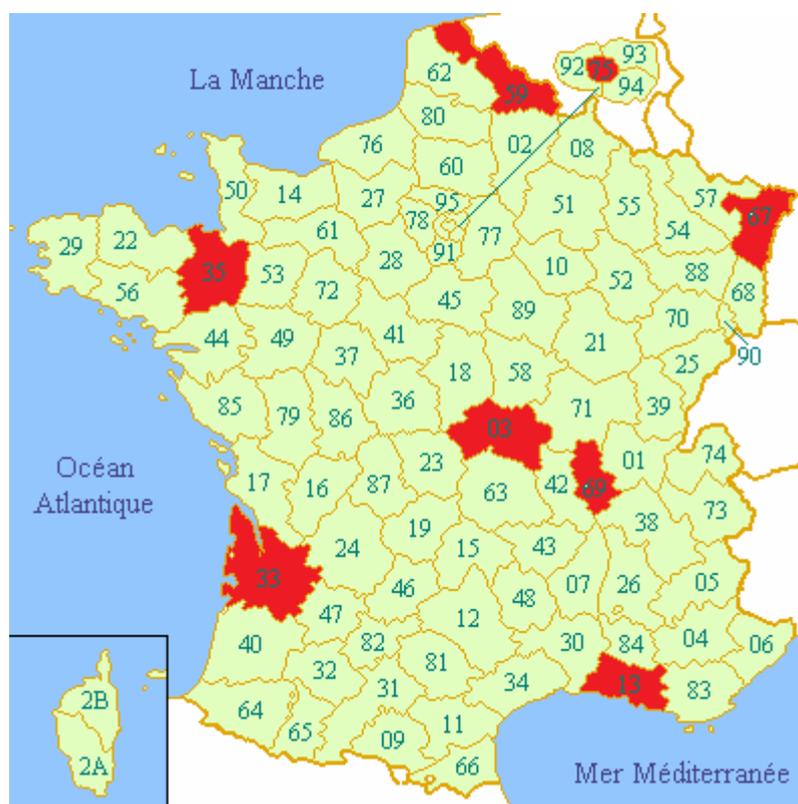
- le plancher chauffant / rafraîchissant,
- les ventilo-convecteurs,
- les radiateurs à basse température,
- la diffusion d'air.

3.3. Étude de la consommation d'une pompe à chaleur

L'utilisation d'une pompe à chaleur permet à son utilisateur de faire des économies d'énergie. Cependant ce gain d'énergie varie en fonction du lieu de résidence (climat, taille du logement, etc...). Dans ce chapitre nous allons tenter de montrer que son installation peut parfois devenir plus couteuse que l'utilisation d'un chauffage classique.

3.3.1. Variation du coût d'utilisation d'une pompe à chaleur en fonction du lieu géographique

figure 4 : Carte de la France (localisation des zones géographiques d'études)



Zones d'études = zones rouges

Un critère évident à prendre en compte est le climat de la région de résidence. On peut se demander si l'utilisation d'une pompe à chaleur est autant écologique dans toutes les régions de France. Dans les tableaux de la page suivante, nous pouvons observer une grande variété de climats.

A l'aide de relevés théoriques nous avons comparé les puissances et les énergies consommées par une pompe à chaleur dans différentes régions de la France. Voici les résultats ci-dessous :

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Département	75	59	35	33	31	13	69	67	03
Déperdition (kW)	3,94	4,23	3,65	3,5	3,65	3,65	4,38	5,11	4,09
Consommation annuelle (*10 ³) (kW)	6,24	7,02	6,07	4,65	5,09	4,22	6,36	7,61	7,17
Puissance nécessaire (kW)	4,73	5,08	4,38	4,2	4,38	4,38	5,26	6,13	4,91

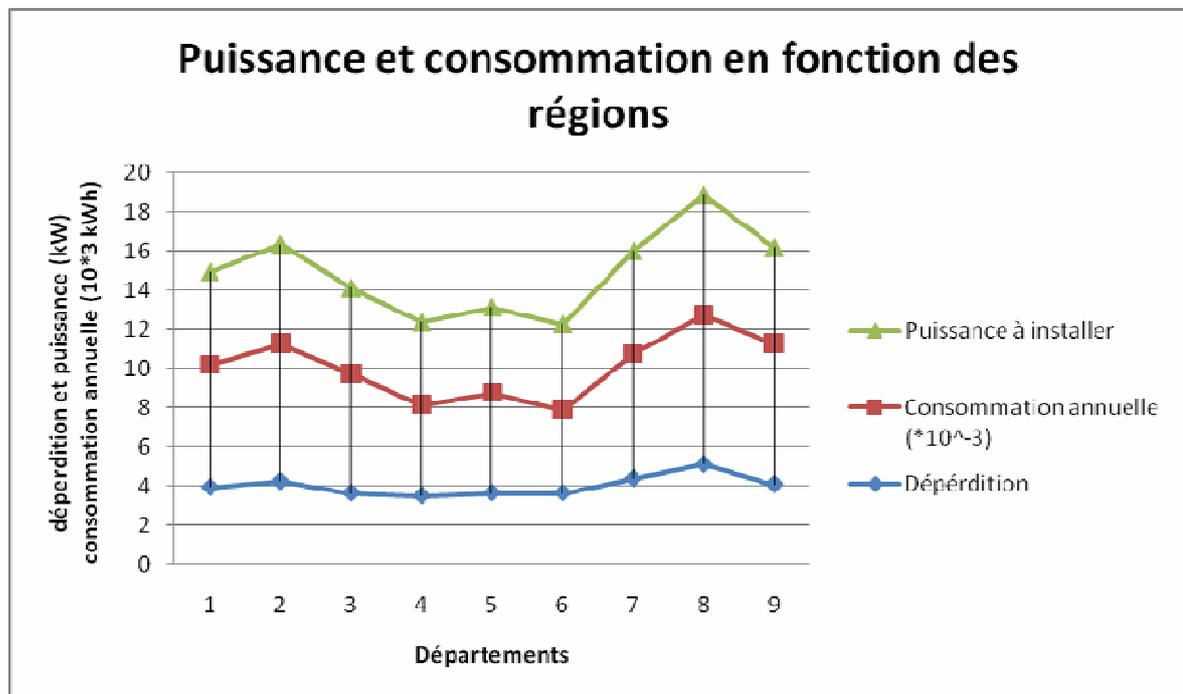


figure 5 : puissance et consommation en fonction des régions

La puissance à installer correspond à la puissance minimale requise pour utiliser la pompe à chaleur (sécurité et contrat EDF).

La consommation annuelle représente la consommation en énergie pendant un an.

La déperdition correspond à la perte de chaleur moyenne dans l'habitat et dans la région d'étude.

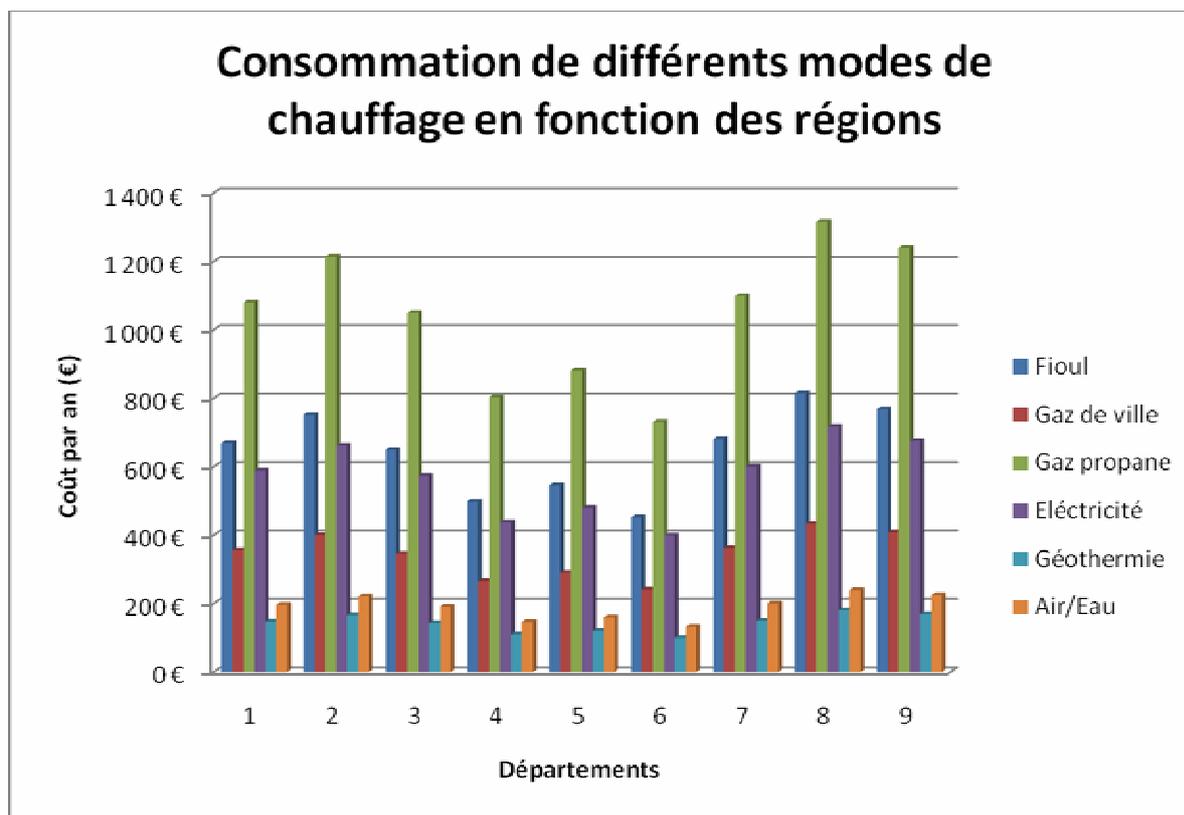
Grâce à ces courbes nous constatons que la consommation de la pompe à chaleur dépend du climat du lieu de résidence. Ainsi il ne faut pas installer la même pompe à chaleur dans une région froide que dans le sud (voir courbe de la puissance à installer). Par exemple aux alentours de Strasbourg il est conseillé d'installer une puissance d'environ 19kW tandis qu'à Marseille 12kW suffisent. Cette comparaison montre donc qu'il ne faut pas installer le même type de pompe à chaleur suivant le lieu de résidence.

Nous voyons donc que les économies générées par l'utilisation de ce procédé de chauffage varie en fonction de la région, mais reste-t-elle si avantageuse par rapport aux autres types de chauffage ?

Pour le vérifier nous avons étudié le coût à l'année de mode de chauffage domestique :

figure 6 : Comparaison du coût de différents modes de chauffage

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Département	75	59	35	33	31	13	69	67	03
Fioul	669	752	650	498	545	452	681	815	768
Gaz de ville	356	400	346	265	290	241	362	433	408
Gaz propane	1080	1214	1050	804	881	731	1099	1316	1240
Électricité	589	662	573	438	480	399	600	718	676
Géothermie	147	166	143	110	120	100	150	180	169
Air/Eau	196	221	191	146	160	133	200	239	225



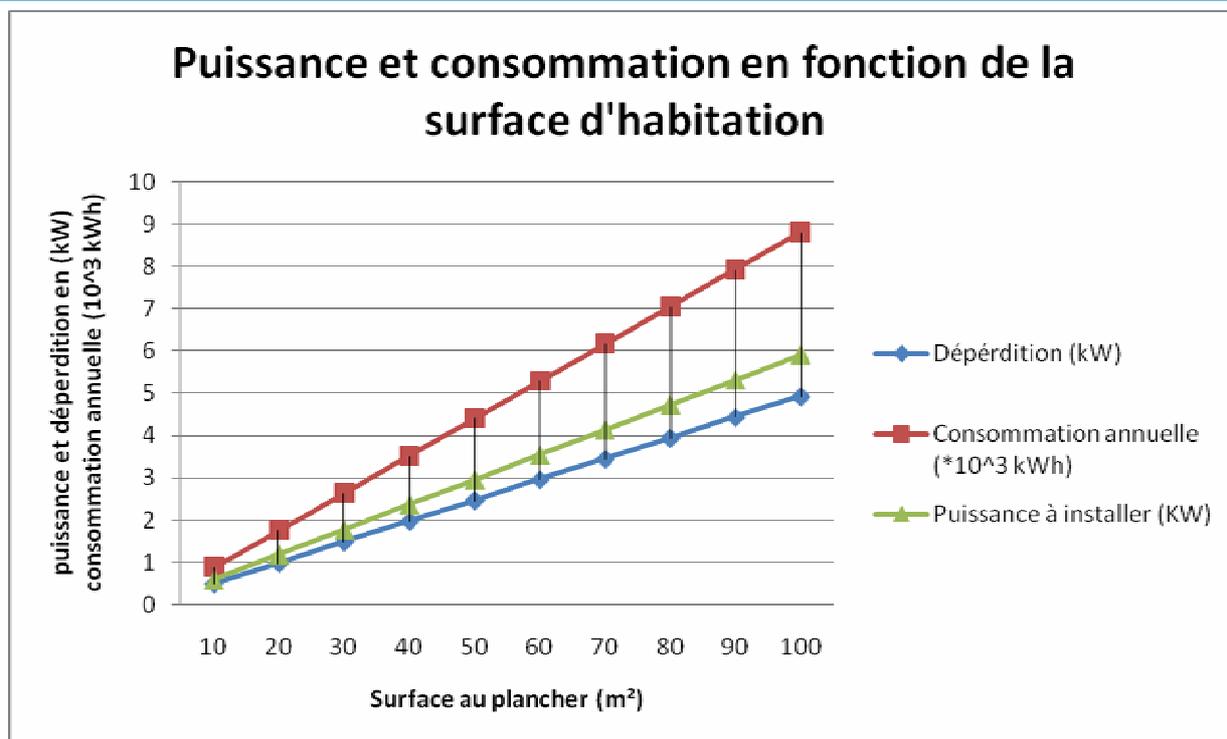
Nous constatons donc que la pompe à chaleur est très compétitive dans les régions froides. En effet, comparée avec le chauffage au gaz de ville (mode le moins cher des énergies classiques) on peut réaliser jusqu'à 194€ d'économie à l'année. Cependant dans la région à climat Méditerranéen cette différence de prix ne s'élève qu'à 108€ par an. Son utilisation reste donc à long terme plus économique mais il ne faut pas oublier que son installation a un coût plus élevé qu'il convient de prendre en compte pour trouver le point de retour sur investissement. Il semble donc évident qu'une étude est à mener avant l'installation chez soi d'une pompe à chaleur.

3.3.2. Variation du coût d'utilisation d'une pompe à chaleur en fonction de la superficie de l'habitation

Sur le même principe que précédemment avec la distinction du lieu géographique, nous pouvons discuter de l'intérêt de l'installation d'une pompe à chaleur chez soi en fonction de la surface de l'habitation. Nous avons donc tracé les courbes suivantes (les résultats sont théoriques d'où l'aspect linéaire des courbes) :

figure 7 : Puissance et consommation en fonction de la surface d'habitation

Surface au plancher (m ²)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Déperdition (kW)	0,49	0,98	1,47	1,97	2,46	2,95	3,44	3,94	4,43	4,92
Consommation annuelle (*10 ³ kWh)	0,88	1,76	2,64	3,52	4,40	5,28	6,16	7,04	7,92	8,80
Puissance nécessaire (KW)	0,5	1,1	1,7	2,3	2,9	3,5	4,1	4,7	5,3	5,9



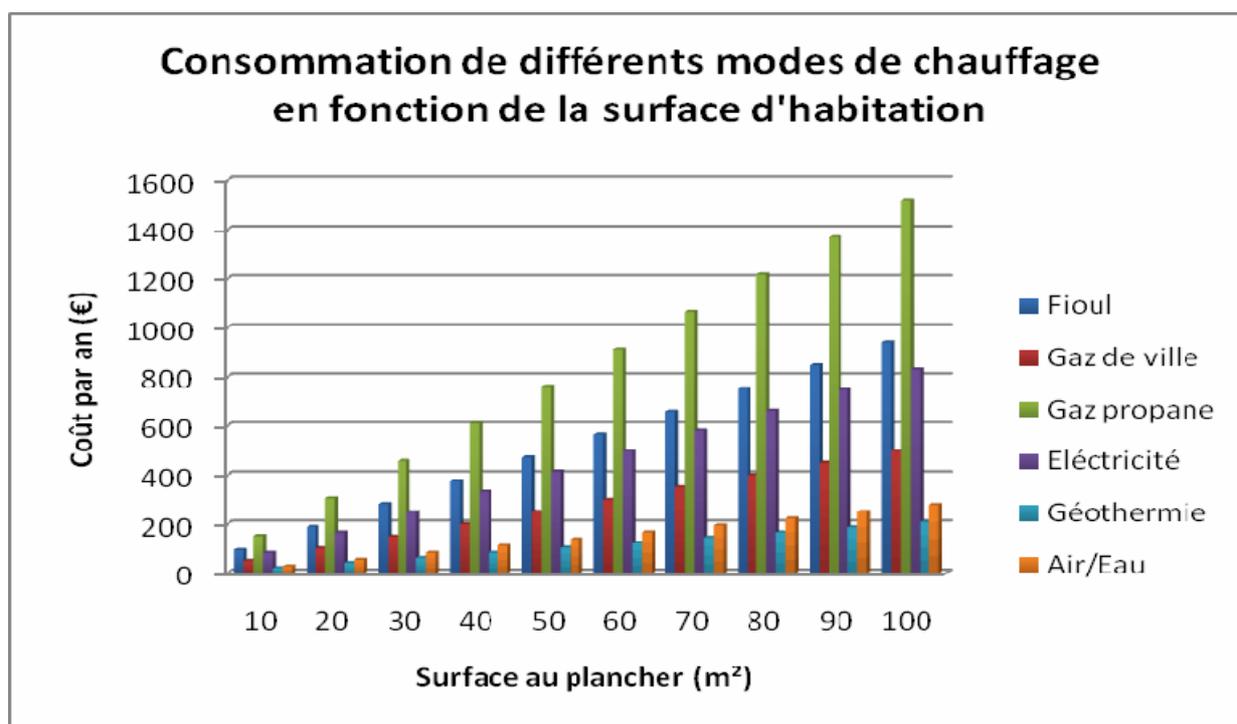
Ces courbes montrent que la consommation de la pompe à chaleur est proportionnelle à la surface au plancher, c'est pourquoi la puissance conseillée à l'installation suit la même évolution.

Nous constatons aisément que la pompe à chaleur peut être économique quelque soit la taille de l'habitation. Toutefois dans cet exemple aussi, ne serait-il pas plus avantageux d'utiliser un chauffage au gaz de ville ?

Nous avons vérifié avec le relevé des coûts annuels d'une pompe à chaleur dans différents logements (mesures prises pour la région Haute Normandie 76 ou d'après l'étude précédente l'utilisation d'une pompe à chaleur peut être conseillée).

figure 8 : Puissance et consommation en fonction de la surface d'habitation

Surface au plancher	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Fioul	94	189	283	377	471	565	659	753	847	941
Gaz de ville	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Gaz propane	152	305	457	609	761	913	1065	1217	1369	1521
Électricité	83	166	249	332	415	498	581	664	747	830
Géothermie	21	42	62	83	104	125	146	167	188	209
Air/Eau	28	55	83	111	139	167	195	223	251	279



Grâce à ces résultats nous pouvons faire la même constatation que dans la partie précédente traitant de la différence de région.

En effet, pour un grand logement, la différence de coût avec le gaz de ville est considérable : rien que pour 100m² on observe une différence de 221€ par an. Cependant pour un studio de 10m² celle-ci ne s'élève qu'à 22€. Pour un si petit logement le prix de l'installation ne sera jamais rentabilisé.

En conclusion, le choix de l'installation d'une pompe à chaleur chez un particulier ne doit pas être pris à la légère. Il convient de prendre en compte de nombreux critères dont ceux traités ci-dessus en sont des exemples.

3.3.3. Aides financières à l'installation d'une pompe à chaleur

Il faut aussi souligner que grâce à la pompe à chaleur l'utilisateur sera moins dépendant des variations des coûts de l'énergie (variation des prix du gaz ou de l'électricité). C'est pourquoi l'Etat et des associations pour la défense de l'environnement donnent des subventions à l'installation. Celles-ci peuvent financer l'achat jusqu'à un montant de 40% du prix d'achat de l'équipement (hors main d'œuvre). Ce taux était de 50% pour les travaux payés avant le 31 décembre 2008.

A partir du 1er janvier 2010, le crédit d'impôt pour la mise en place d'une pompe à chaleur (autre que air/air) s'élèvera à 25% du montant de l'équipement hors main d'œuvre. Pour un même contribuable et une même habitation, le montant des dépenses ouvrant droit au crédit d'impôt ne peut excéder, au titre d'une période de cinq années consécutives entre le 1er janvier 2005 au 31 décembre 2012, la somme de 8000 € pour une personne seule et de 16 000 euros pour un couple marié soumis à imposition commune. De plus, si l'acheteur ne paye pas d'impôts l'Etat fait un chèque du même montant décrit ci-dessus.

Sachant qu'une pompe à chaleur coûte entre 900 et 3000€, l'Etat rembourse donc en moyenne une somme entre 360 et 1200€.

Cette aide financière permet donc de pallier le problème du coût d'achat qui reste encore à ce jour très élevé. D'autant plus que cette aide peut être complétée par des primes que certaines régions offrent aux éco-citoyens de leur commune.

3.4. Expérience

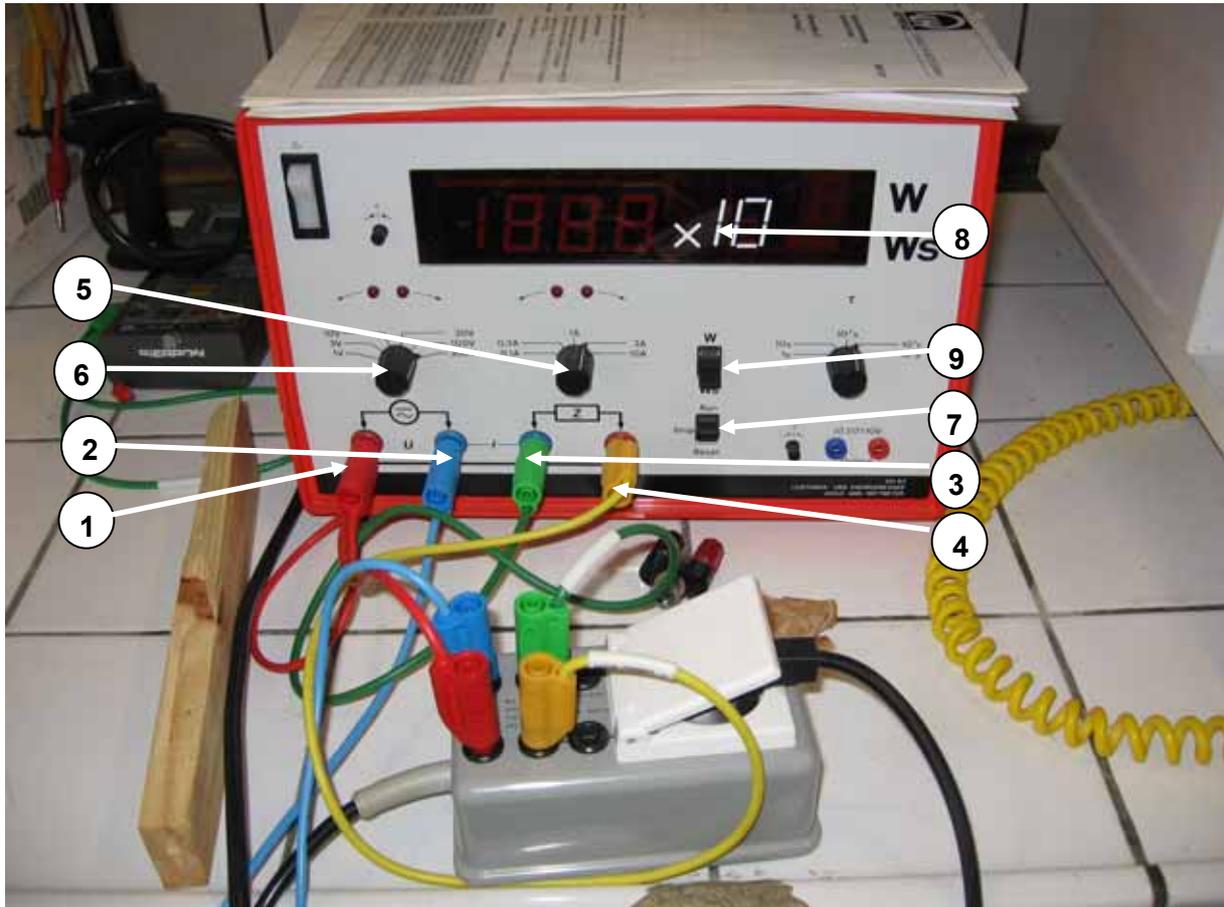
3.4.1. Matériel



1. Compresseur.
2. Support pivotant du réservoir rouge d'eau de la source chaude.
3. Source chaude où se trouve le serpentin « condenseur ».
4. Épurateur : Filtre le liquide des bulles de gaz qu'il contient.
5. Détendeur.
6. Source froide où se trouve le serpentin « évaporateur ».
7. Support pivotant du réservoir bleu d'eau de la source froide.
8. Serpentin qui empêche la transmission des vibrations du compresseur à l'ensemble du montage.

Le wattmètre

Le wattmètre permet d'obtenir la puissance électrique P_e consommée par le compresseur. Cette dernière est obtenue par le produit des signaux de courant et de tension ($P_e = U \cdot I$).



1 - 2 - 3 - 4 - Bornes de raccordement au compresseur par l'intermédiaire d'une boîte de raccordement.

5- Sélecteur de gamme de courant.

6 - Sélecteur de gamme de tension.

7-Interrupteur permettant de mettre le mode de remise à zéro RESET, le mode mesure de l'énergie électrique RUN, ou d'arrêter la mesure avec blocage de l'affichage avec le mode STOP.

8-Afficheur à LED

9- Commutateur permettant de choisir d'afficher la puissance en Watt s'il est dans sa position « relevée » ou d'afficher l'énergie électrique en Joule, si le bouton est abaissé.

Montage et réglages

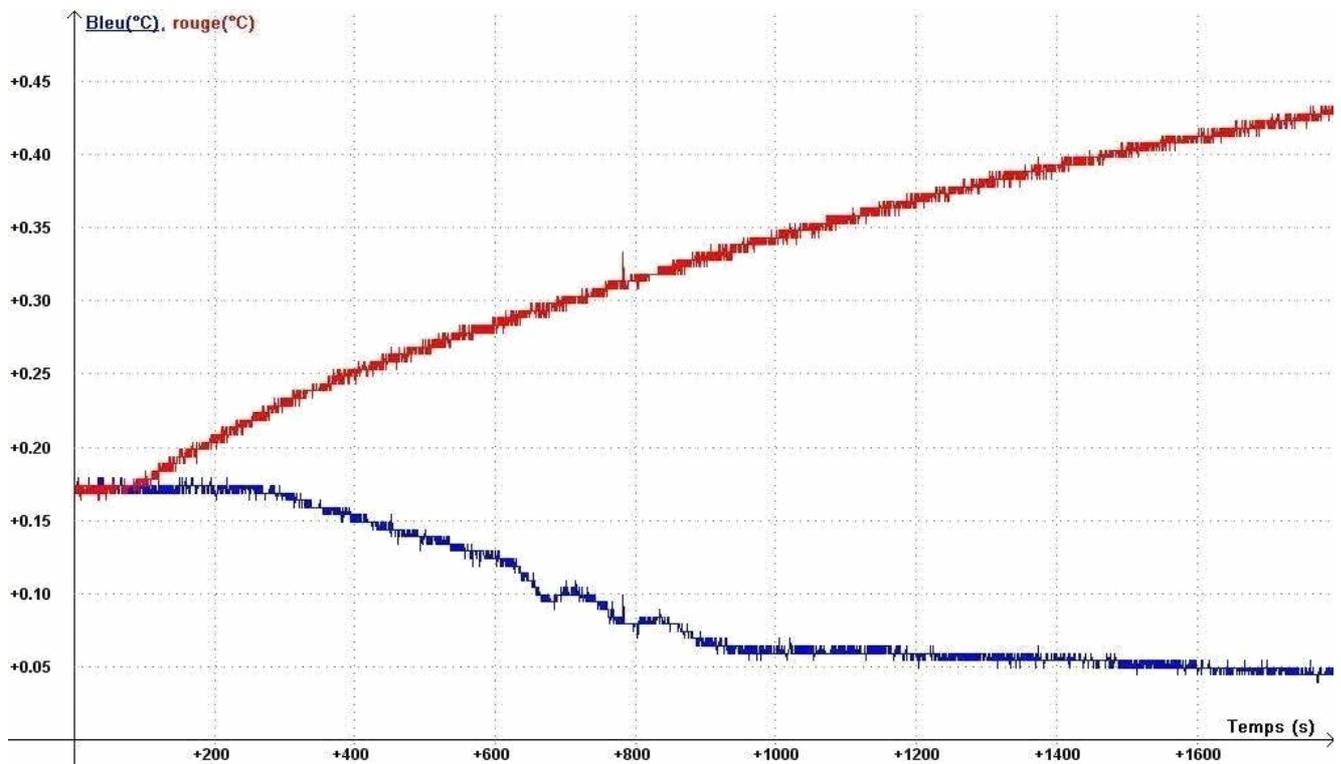
1. Relier le wattmètre à l'alimentation su secteur.
2. Retirer les réservoirs de leurs supports en les faisant pivoter.
3. Remplir les seaux avec 4 litres d'eau, puis les remettre sur leur support.

4. Régler les sondes (thermocouple). S'ils ne donnent pas le même voltage dès le début, les températures de départ seraient différentes et les résultats seraient faussés. Pour cela, il faut ouvrir les boitiers, mettre les sonde de température dans de la glace. Régler le 0 des sondes séparément grâce au potentiomètre. Puis, recommencer ces étapes dans de l'eau chaude et ensuite de l'eau froide. Pour plus de facilité, on règle le thermocouple afin d'obtenir un pas de 10 mV/°C. En multipliant le résultat par 100, nous obtenons des V/°C.
5. Mettre chacune des sondes dans leur compartiment, en veillant bien à ce qu'elles plongent bien dans l'eau et qu'elles ne soient pas en contact avec les tuyaux.
6. Tourner les commutateurs 5 et 6 jusqu'aux positions 300 V et 3A.
7. Mettre en marche l'installation.

3.4.2. Expérience

Afin de voir comment la pompe à chaleur fonctionne, nous avons fait fonctionner le montage pendant 30 minutes et nous avons relevé toutes les minutes la puissance et l'énergie consommée, affichées sur le wattmètre. Les températures de la source froide et de la source chaude étaient prises automatiquement grâce à synchronie.

Les 30 minutes étant passées, nous avons tracé sur un même graphe les courbes $\theta_F = f(t)$ et $\theta_C = f(t)$.



Calcul de l'efficacité réelle η

On cherche à obtenir l'efficacité réelle à partir des valeurs obtenues lors de notre expérience. On la calculera pour chaque intervalle de temps $\Delta t = 1\text{mn}$.

eq 6. $\eta = P_e / P_{th}$.

eq 7. Puissance électrique : $P_e = dE_e/dt$.

soit : $P_e = (E(t+\Delta t) - E(t)) / (t + \Delta t - t) = (E(t+\Delta t) - E(t)) / \Delta t$.

avec $E_e =$ Energie électrique mesurée par le Wattmètre.

Puissance thermique reçus par la source chaude :

eq 8. $P_{th} = dQ/dt = m \cdot c_{eau} \cdot d\Theta_c/dt$.

soit : $P_{th} = m \cdot c_{eau} \cdot (\Theta_c(t+\Delta t) - \Theta_c(t)) / \Delta t$.

avec : $dQ =$ Quantité de chaleur reçue par l'eau.

$m =$ masse de l'eau dans le réservoir = 4 kg (dans notre cas).

$c_{eau} =$ capacité thermique massique de l'eau = $4,18 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

$\Theta_c =$ Température de la source chaude (en °C).

Calcul de l'efficacité idéale η_{max}

L'efficacité idéale nous permettra d'obtenir une courbe théorique qui pourra être comparée avec celle de l'efficacité réelle.

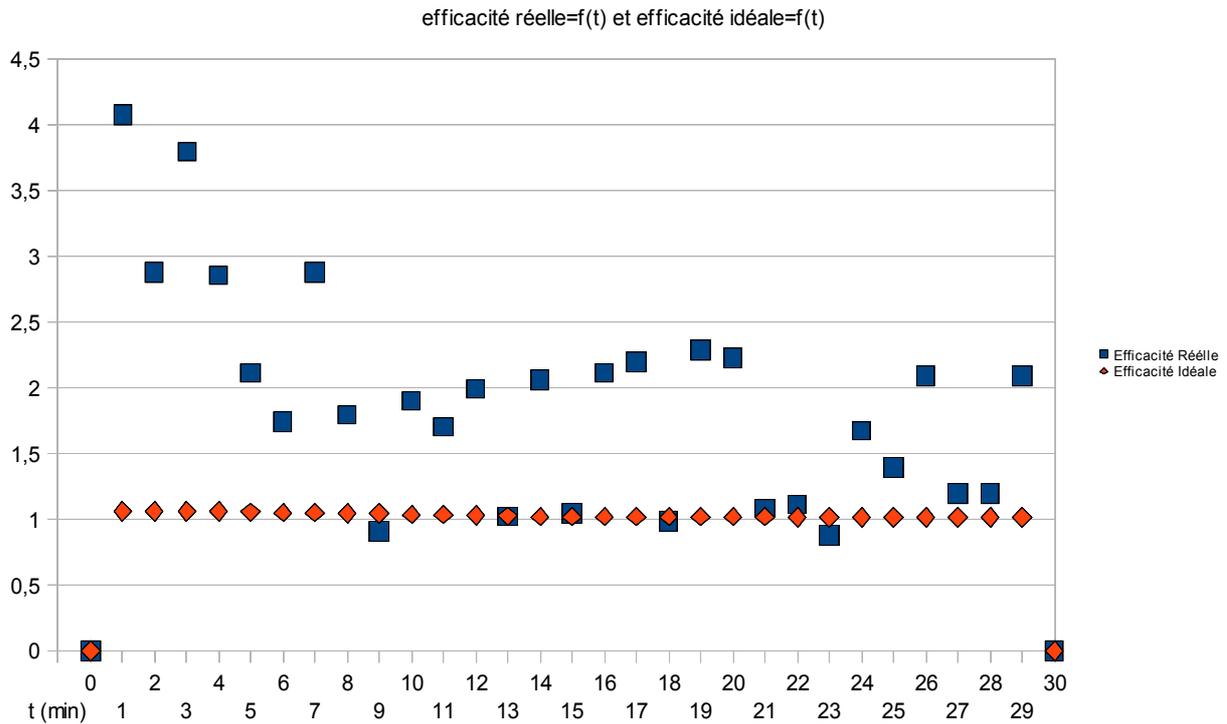
eq 9. $\eta_{max} = T_c / (T_c - T_f + 273,15)$

avec : $T_c =$ Température de la source chaude (en K).

$T_f =$ Température de la source froide (en K).

Résultats expérimentaux

t (mn)	Tc (K)	Tf (K)	Puissance (W)	Energie (J)	Pth (W)	Pe (W)	Efficacité Réelle	Efficacité Idéale
0	290,55	290,55	0	0	X	X	X	X
1	290,55	290,55	142	9700	0	161,67	0	0
2	291,55	290,55	145	13800	278,67	68,33	4,08	1,06
3	293,05	290,55	148,3	22500	418	145	2,88	1,06
4	295,05	290,55	148,9	31300	557,33	146,67	3,8	1,06
5	296,45	290,05	151,8	39500	390,13	136,67	2,85	1,06
6	297,45	288,55	152,5	47400	278,67	131,67	2,12	1,05
7	298,45	288,05	157,5	57000	278,67	160	1,74	1,05
8	299,95	287,05	160,2	65700	418	145	2,88	1,05
9	300,95	286,55	161,5	75000	278,67	155	1,8	1,05
10	301,45	285,55	162,2	84200	139,33	153,33	0,91	1,04
11	302,45	283,55	161	93000	278,67	146,67	1,9	1,04
12	303,45	283,05	160,2	102800	278,67	163,33	1,71	1,03
13	304,45	281,05	143,2	111200	278,67	140	1,99	1,03
14	304,95	280,35	142,6	119400	139,33	136,67	1,02	1,02
15	305,95	279,55	140,9	127500	278,67	135	2,06	1,02
16	306,45	279,25	141,5	135500	139,33	133,33	1,05	1,02
17	307,45	279,25	138,3	143400	278,67	131,67	2,12	1,02
18	308,45	279,05	138,8	151000	278,67	126,67	2,2	1,02
19	308,95	279,05	137	159500	139,33	141,67	0,98	1,02
20	309,95	279,05	135,5	166800	278,67	121,67	2,29	1,02
21	310,95	279,05	136,3	174300	278,67	125	2,23	1,02
22	311,45	279,05	133,6	182000	139,33	128,33	1,09	1,02
23	311,95	278,55	133,8	189500	139,33	125	1,11	1,02
24	312,45	278,55	130,6	199000	139,33	158,33	0,88	1,02
25	312,95	278,05	130,8	204000	139,33	83,33	1,67	1,02
26	313,45	278,05	127	210000	139,33	100	1,39	1,02
27	314,45	278,05	128	218000	278,67	133,33	2,09	1,02
28	314,95	278,05	126	225000	139,33	116,67	1,19	1,02
29	315,45	277,55	127	232000	139,33	116,67	1,19	1,01
30	316,45	277,55	127	240000	278,67	133,33	2,09	1,01



Explication des résultats

Nous remarquons que les courbes $\theta_F = f(t)$ et $\theta_C = f(t)$, partent de la même température. Cela montre que les sondes de températures sont bien réglées au départ car nous avons mis la même eau dans les seaux. Puis, ces courbes se séparent au fil du temps. La température de la source chaude augmente car le condensateur lui donne de l'énergie calorifique. Par contre, celle de la source froide diminue car elle cède de l'énergie à l'évaporateur.

De plus, l'efficacité réelle n'est pas constante et est globalement supérieure au résultat attendu. En effet, nous remarquons que l'efficacité réelle varie entre 1 et 4 alors que l'efficacité théorique reste constante et égale à 1.

Ceci peut s'expliquer tout d'abord par la mauvaise isolation du système. Les seaux en plastique engendrent des pertes thermiques constatées. De plus, le matériel utilisé pour le remplissage des seaux manquait de précision, cela entraînant une inégalité des volumes d'eau. Les mesures obtenues sont donc aussi faussées pour cette raison.

Le problème peut venir également de l'imprécision du boîtier électronique du système de relevé de température; bien que nous ayons auparavant fait les réglages nécessaires. Ainsi les sondes de température utilisées ne donnent pas les résultats correspondant à nos attentes.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le but de ce projet, qui était d'effectuer une étude approfondie de la pompe à chaleur, a sans aucun doute été atteint. Ce projet s'est déroulé étape par étape.

Nous avons tout d'abord approfondi nos connaissances en thermodynamique et plus précisément sur la technologie de la pompe à chaleur. Nous avons entre autres comparé les consommations d'une pompe à chaleur dans différentes régions et dans des bâtiments de superficies différentes. Ainsi, cette étude nous a permis de mieux cerner le fonctionnement et les caractéristiques particulières de la pompe à chaleur. Nous avons appris que la pompe à chaleur était une technologie en faveur de l'environnement.

Concernant le travail réalisé, il a tout d'abord été nécessaire de nous familiariser avec le matériel qui nous a été confié : la pompe à chaleur et le wattmètre. Ensuite nous avons effectué les réglages nécessaires avant de commencer les expériences. Ces expériences ont été très enrichissantes car elles nous ont permis de manipuler un dispositif que nous connaissions qu'au niveau théorique. De plus nous avons pu suivre en temps réel l'évolution des températures dans les deux systèmes d'étude. Par la suite nous avons découvert l'efficacité réelle de l'appareil, que nous avons pu comparer avec une efficacité idéale calculée parallèlement. Nous avons constaté une nette différence dont nous avons tenté de trouver l'explication.

Les difficultés que nous avons rencontrées durant ce projet sont principalement des difficultés matérielles puisque nous avons été confrontés à du matériel manquant de précision et que nous avons dû apprendre à manipuler correctement.

Ce projet a aussi constitué un travail en groupe enrichissant. En effet, nous nous sommes répartis le plus équitablement possible les différentes tâches. Nous avons également appris à travailler en étroite collaboration, notamment lors des expériences qui nécessitaient une bonne organisation et coordination : chronomètre, relevé des différentes mesures.

Ce projet est donc très intéressant et enrichissant. Il doit clairement être poursuivi pour les années à venir. C'est un projet à recommander aux élèves intéressés à la thermodynamique et à l'environnement.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] <http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/pac/rub2.htm> (valide à la date du 10/05/2009).
- [2] http://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe_%C3%A0_chaleur (valide à la date du 10/05/2009).
- [3] <http://www.oodoc.com/48108-energie-pompe-pac-fontionnement.php> (valide à la date du 10/05/2009).
- [4] <http://pompe-a-chaleur.comprendrechoisir.com/> (valide à la date du 10/05/2009).
- [5] <http://www.afpac.org/> (valide à la date du 10/05/2009).
- [6] Site de comparaison des prix pour différent moyens de chauffage :
<http://experience-pac.site.voila.fr/index.html> (valide à la date du 29 avril)
- [7] Site de TP : Réfrigérateur et pompe à chaleur : <http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/TTE/DocsTTE/L3PC/R%E9frig%E9rateur.pdf> (valide à la date du 29 avril)
- [8] Site TP.15 : http://www.educnet.education.fr/rnchimie/phys/kohl/tp/tp_phys_ts1_15.pdf (valide à la date du 29 avril)
- [9] Exemple de dossier de pompe (pas pompe à chaleur) : <https://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/52/TP/TP-5-Pompe.pdf> (valide à la date du 29 avril)
- [10] Exemple de dossier de pompe à chaleur : http://sti.ac-dijon.fr/IMG/POMPES_A_CHALEUR.pdf (valide à la date du 29 avril)
- [11] Etude d'une pompe à chaleur : <http://physiquecira.free.fr/CoursPhys/PAC/pac.htm> (valide à la date du 29 avril)
- [12] Documentation du fournisseur Leybold

6. ANNEXES

6.1. Documentation technique

Voir la documentation du fournisseur Leybold

6.2. Interviews

6.2.1. Monsieur Yon

1. Quel est le prix d'une pompe à chaleur sur le marché ?

PAC air-eau autour de 8000 à 12000 euros.

2. Quels sont les investissements nécessaires à l'installation d'une pompe à chaleur dans une maison ? Quels sont les travaux à réaliser ? Quel est le prix engendré ?

Raccordement réseau d'eau de chauffage au compresseur situé à l'extérieur (distance limitée) / choisir une bonne exposition de l'appareil. Coût total avec pose entre 12000 et 20000 euros.

3. La pompe à chaleur est-elle encombrante, bruyante ?

C'est plus encombrant qu'une chaudière traditionnelle et relativement bruyant. Les vibrations peuvent occasionner une gêne.

4. Consomme-t-elle beaucoup d'électricité ?

Oui, il est donc nécessaire d'adapter l'abonnement électricité à 60 A (abonnement + cher)

5. La pompe à chaleur est-elle rentable à long terme ?

Sans panne, en tenant compte du crédit d'impôt de 50%, il faut compter 6 à 7 ans avant rentabilisation de l'investissement.

6. Est-elle efficace en comparaison avec les autres systèmes de chauffage (ex : radiateurs, panneaux solaires...) ?

Mode de chauffage efficace et rentable pour des températures extérieures supérieures à 0°C ; en dessous, un appoint électrique (moins rentable) est nécessaire (intégré aux appareils).

7. Nécessite-t-elle un entretien particulier ?

A priori non (ce n'est qu'un gros frigo) seulement, les installateurs conseillent fortement que l'on prenne un contrat d'entretien (c'est très rentable pour eux).

8. Quel est le rendement annoncé par le constructeur de votre PAC ? Correspond-il réellement à celui que vous avez constaté chez-vous ?

Le Coefficient de performance à 7°C est annoncé à 3.82. Il est certainement effectif, mais il ne fait pas 7°C toute l'année !!!

9. Etes-vous globalement satisfait de votre pompe à chaleur ?

Il faut être très prudent quant au choix de l'entreprise installatrice et de la marque de la pompe. Mon installateur est en liquidation judiciaire, l'appareil est tombé en panne et je n'ai plus de garantie...Cependant, je reste favorable à la technologie employée.

6.2.2. Monsieur Ponsinet

1. Quel est le prix d'une pompe à chaleur sur le marché ?

Environ 1500/1600€

2. Quels sont les investissements nécessaires à l'installation d'une pompe à chaleur dans une maison ? Quels sont les travaux à réaliser ? Quel est le prix engendré ?

Il faut construire une liaison avec le système existant qui coûte 1300€, une chaudière pour nous, modifier le compteur 75€, installer un ballon d'eau 3100€.

3. La pompe à chaleur est-elle encombrante, bruyante ?

Non, car nous l'avons placé dehors.

4. Consomme-t-elle beaucoup d'électricité ?

Elle consomme un peu d'électricité.

5. La pompe à chaleur est-elle rentable à long terme ?

Oui, elle nous permet d'économiser jusqu'à 75% d'énergie par rapport au système précédent.

6. Est-elle efficace en comparaison avec les autres systèmes de chauffage (ex : radiateurs, panneaux solaires...) ?

C'est déjà un début d'économie en complément aux autres systèmes.

7. Nécessite-t-elle un entretien particulier ?

Non

8. Quel est le rendement annoncé par le constructeur de votre PAC ? Correspond-il réellement à celui que vous avez constaté chez-vous ?

75% d'économie au bout de quelques années.

9. Etes-vous globalement satisfait de votre pompe à chaleur ?

Oui.