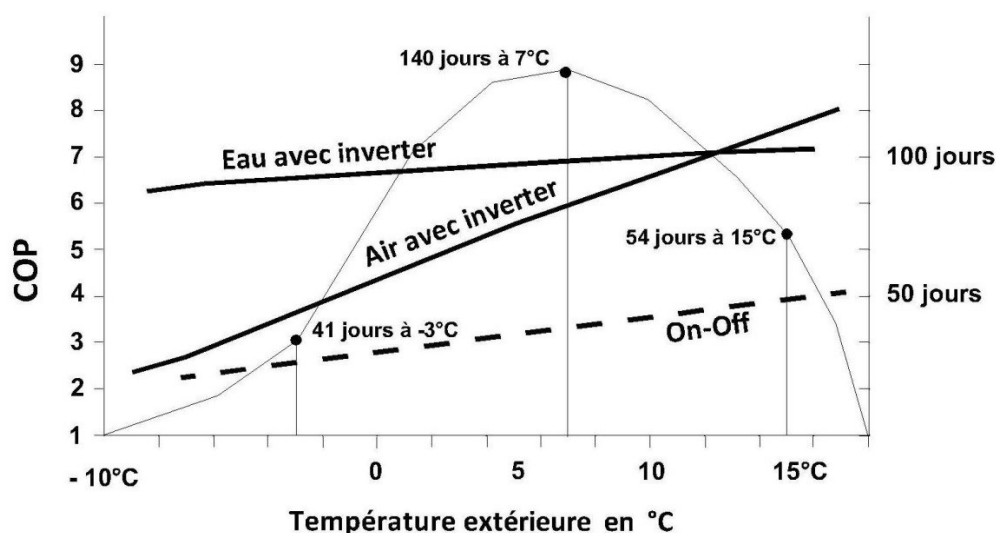




Les performances des pompes à chaleur

Une caractéristique importante des pompes à chaleur sur nappe phréatique (PAC à eau) est d'utiliser l'eau à environ 12 °C provenant d'un pompage à faible profondeur dans un sous-sol alluvionnaire proche de la rivière et de rejeter l'eau de cette source dite froide à une température encore plus froide. C'est le cœur même de la PAC dans un cycle thermodynamique presque idéal, utilisant les propriétés enthalpiques des fluides caloporteurs modernes capables d'assurer les transferts thermiques, qui permet d'obtenir ce résultat. Le fonctionnement conventionnel d'une PAC génère un flux thermique capable d'assurer le chauffage des maisons individuelles ou des immeubles. Comme les miracles n'existent pas il faut naturellement apporter de l'énergie pour assurer le cycle thermodynamique du fluide caloporteur. Cette énergie est électrique et a naturellement un coût. Un compresseur, entraîné par un moteur électrique comprime le fluide caloporteur pour assurer le cycle thermodynamique. Il augmente la pression du fluide caloporteur alors qu'il est en phase gazeuse avant qu'il ne passe à l'état liquide dans le condenseur. Ces transferts thermiques sont d'autant plus intéressants et économiques pour l'utilisateur que la différence de température entre la source froide et la source chaude est faible. Cette particularité de la pompe à chaleur est importante pour l'utilisateur car elle conditionne en grande partie son coût d'exploitation. Elle privilégie l'eau par rapport à l'air en tant que fluide utilisé pour la source froide.



Courtesy Waterkotte. Comparaison des performances entre une PAC aérothermique et aquathermique avec variation de débit du fluide caloporteur (Inverter). Lorsque l'on ne peut disposer d'une alimentation en eau suffisante on peut prévoir une pompe à chaleur tirant son énergie de l'air environnant qui est lui toujours disponible. Les performances sont alors sensiblement moins bonnes par rapport à la PAC aquathermique lorsque la température extérieure diminue. Un COP de 2 signifie que l'on prélève dans l'air environnant autant d'énergie thermique renouvelable que l'on consomme d'énergie électrique. Lorsque l'air ambiant est à une température de 12°C voisine de celle de l'eau contenue dans la nappe libre les performances de la pompe à chaleur aérothermique est comparable à celle de la pompe à chaleur aquathermique. La décomposition de la courbe monotone (voir point P1, P2, P3 de la figure DJU page 141) en 3 éléments simples permet de se faire une idée du COP moyen annuel. Se reporter au livre « La rivière et l'énergie » page 46 pour estimation comparative des COP selon que les EnR proviennent de l'air du sol ou de l'eau.

La rivière source d'énergie

L'eau, lorsqu'elle est pompée dans le sous-sol a une température sensiblement constante de 12°C et ceci même en hiver. L'air ambiant au contraire peut avoir une température négative ce qui augmente la différence de température entre les sources froide et chaude et affecte le rendement. Avec les pompes à chaleur à eau moderne, la température de rejet de l'eau vers le sous-sol ou dans la rivière est de l'ordre de 4° C, voire même inférieur. (Au Canada les températures de rejets sont même probablement inférieures puisque ces techniques sont utilisées pour consolider le sous-sol par gélification en complément du chauffage) Les débits d'eau mis en jeu ne sont pas importants en regard des débits souvent disponibles dans nos nappes aquifères et très faibles par rapport au débit de la rivière. Les puissances thermiques mise en jeu par contre sont loin d'être négligeables. La puissance thermique générée par un débit d'eau de 4 l/s (15 m³/h) dont la température chute de 8°C est de l'ordre de 130 kW. (Chaleur spécifique de l'eau : 1 calorie/gramme et °C avec l'équivalent mécanique de la calorie de 4,18 joules) Cette puissance est suffisante pour chauffer un gros immeuble correctement isolé avec des coûts d'exploitation réduit par rapport à celui de l'énergie produite à partir de la combustion des produits fossiles. A l'encontre des centrales nucléaires qui se servent de l'eau de la rivière pour refroidir le réacteur et qui rejette de l'eau tiède dans celle-ci, le gros avantage d'une PAC à eau – lorsqu'elle est utilisée pour le chauffage - est l'abaissement de la température de l'eau de la rivière lorsque l'eau sortant de l'évaporateur est rejetée directement dans cette dernière. A l'inverse de la chaleur, le froid diminue en général l'activité microbienne et bactériologique. En diminuant ces activités, il réduit la consommation d'oxygène qui en résulte ce qui conduit à une diminution de la pollution des eaux. On trouve maintenant sur le marché des constructeurs qui proposent des PAC à eau dans des gammes de puissance allant de 20kW à 500 kW couvrant la plupart des besoins individuels et collectifs en chauffage. La raison pour laquelle la technologie des pompes à chaleur sur nappe phréatique ou aspirant plus simplement l'eau de la rivière n'est pas plus développée en France est probablement financière. Le fait que le prix du gaz soit indexé sur le pétrole va conduire à augmenter sensiblement le prix du gaz et être une incitation au développement des PAC à eau en France. L'avance de l'Allemagne sur la France dans ce domaine s'explique probablement par le fait que le gaz est 2 fois plus cher en Allemagne qu'en France. Ces technologies étant relativement nouvelles, l'utilisateur final, qui doit se transformer en Maître d'œuvre pour faire aboutir le projet, était jusqu'à maintenant peu enclin à jouer le rôle de cobaye, l'incitation financière était trop faible. De plus, il ne suffit pas que la technologie d'un produit soit aboutie pour qu'il soit utilisé. Ces pompes à chaleur sur nappe phréatique mériteraient en tout cas à être mieux connues. On dit souvent que la consommation de produits fossiles en France se partage à part sensiblement égales entre les besoins liés au chauffage des habitations et ceux de la consommation des moteurs thermiques assurant le transport routier. A défaut de fournir de l'énergie mécanique, et a fortiori de l'énergie électrique puisqu'elles en consomment, la capacité des PAC à eau de délivrer économiquement des puissances thermiques importantes adaptées au besoin du chauffage urbain en n'envoyant que très peu de gaz nocifs dans l'atmosphère comparativement à la combustion des produits fossiles est très intéressante pour notre environnement. En complément des principaux avantages tels que le faible coût d'exploitation et une relative indépendance de l'utilisateur sur le plan énergétique, elle présente de petits avantages comme celui de pouvoir arroser gratuitement son jardin avec l'eau de retour de la source froide moins calcaire, plutôt que de payer au prix fort l'eau du robinet. Elle nous donne aussi une opportunité de régénérer notre sous-sol qui en a bien besoin en filtrant éventuellement l'eau avant de la réinjecter dans celui-ci ou de rejeter cette eau dans la rivière. Il pourrait être de notre intérêt de nous rapprocher de pays en avance sur nous dans ce domaine. La Suisse, l'Allemagne et le Canada font partie de ceux-là. Ils sont de plus proches de nous sur le plan affectif. Allons-nous comme Astérix attendre que le ciel nous tombe sur la tête.

Un peu de théorie

La structure générale d'une PAC soumise à deux sources de chaleur (dite ditherme) est donnée ci-dessous. Grâce à l'énergie électrique **We** fournie à ce système, on absorbe à la source froide (qui est à la température **Tf**) l'énergie thermique **Wf** et on rejette à la source chaude (à la température **Tc > Tf**) l'énergie thermique **Wc**.

En isolant le système constitué le fluide caloporteur circulant dans le circuit fermé de la pompe à chaleur, on peut dire en raison du *principe de la conservation de l'énergie* que l'énergie thermique **Wc** dissipée vers l'immeuble à la source chaude est égale à la somme des énergies thermiques prélevé à la source froide et provenant du sous-sol **Wf** majoré de l'énergie électrique **We** d'entraînement du compresseur de la PAC.

$$Wc = Wf + We \quad 1)$$

Le COP de la PAC est par définition le rapport entre l'énergie thermique disponible à la source chaude et l'énergie électrique (payante) **We** d'entraînement du compresseur

$$COP = Wc / We \quad 2)$$

En supposant que la machine décrit un cycle thermodynamiquement idéal (en principe réversible), l'application du second principe¹⁾ au système ditherme, permet d'écrire :

$$Wc / Tc = Wf / Tf \text{ (égalité de Clausius*)} \quad 3)$$

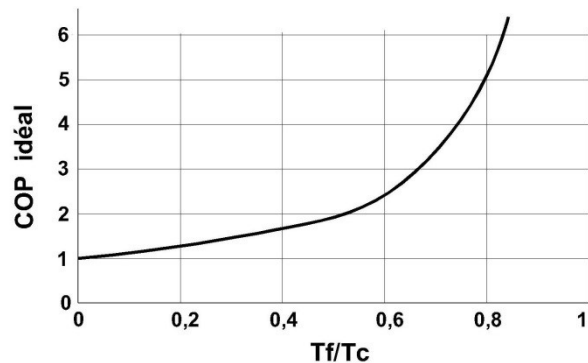
En considérant les équations 1) et 3) 2) s'écrit

$$COP = Wc / We = (Wc / Wc - Wf)$$

$$\text{ou } 1 / COP = (Wc - Wf) / Wc = 1 - Wf / Wc$$

$$\text{soit } 1 / COP = 1 - Tf / Tc = (Tc - Tf) / Tc$$

$$COP = Tc / (Tc - Tf) \quad 4)$$



- Voir méthodologie de mise en place des pompes à chaleur aquathermiques
- Voir site des élèves et professeurs du lycée Paul Langevin
- Voir aussi les critères de choix des fluides frigorigènes
- Voir également comment l'énergie thermique **Wc** délivrée par le condenseur de la pompe à chaleur est utilisée pour chauffer l'habitation.

* Introduite par Rudolf Clausius dans ses études sur l'entropie de la matière, cette égalité caractérise le degré de désorganisation des particules constituant cette dernière. Cette désorganisation ainsi que l'énergie contenue dans la matière étant d'autant grandes que la température de celle-ci est élevée. A la température de 0°Kelvin (-273°C) la matière est figée et l'énergie contenue dans celle-ci est nulle. L'égalité de Clausius prouve la potentialité du chauffage thermodynamique. En effet lorsque la température de la source chaude est égale à la température de la source froide, par exemple lorsque l'on commence à chauffer l'eau froide sanitaire à 10°C en utilisant l'eau de la nappe phréatique également à 10°C (**Tc = Tf**), **Wc** est égal à **Wf** et toute l'énergie thermique **Wc** disponible à la source chaude est de l'énergie renouvelable prélevée dans l'environnement.

La rivière source d'énergie

Comparaison combustion ou effet joule avec la pompe à chaleur

On peut aussi dire que le **COP = énergie restituée/énergie consommée**

Avec la combustion ou l'effet joule l'énergie restituée est égale à l'énergie consommée (**COP = 1**)

Avec la pompe à chaleur l'énergie restituée est égale à l'énergie consommée majorée de l'énergie prélevée dans l'environnement.

- Avec un **COP = 3**, l'énergie consommée est deux fois moins importante que l'énergie prélevée dans l'environnement.
- Avec un **COP** optimisé de 6, l'énergie consommée est 5 fois moins importante que l'énergie prélevée dans l'environnement.

L'énergie prélevée dans l'environnement est gratuite.

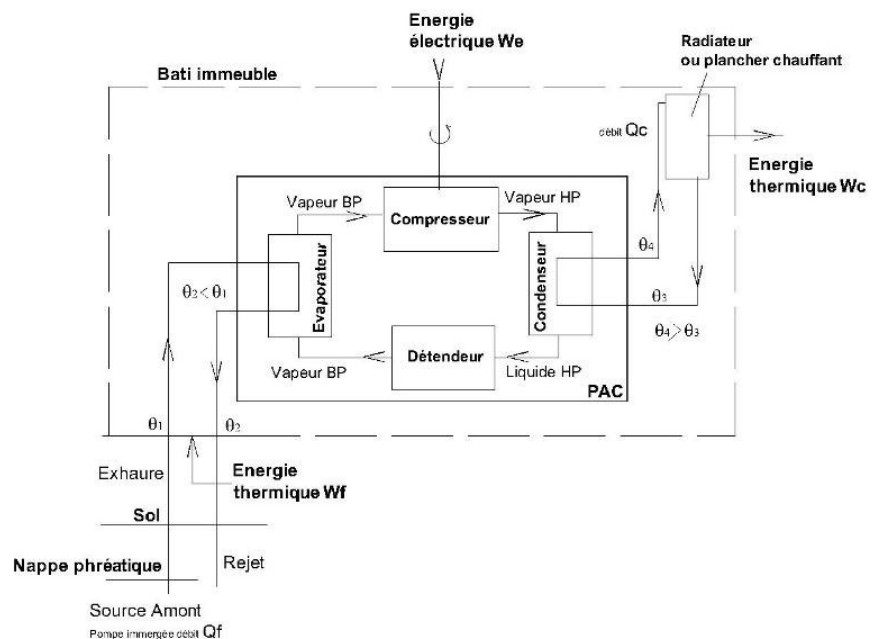
Comparé à la combustion la consommation d'énergie avec une pompe à chaleur est donc trois à 6 fois moins importante.

On a vu au travers de la formule 4) que le COP d'une pompe à chaleur augmente lorsque la température de la source chaude diminue et lorsque la température de la source froide augmente. Un utilisateur averti s'intéresse au **SCOP** qui n'est autre que la valeur moyenne du **COP** lorsque les températures de la source chaudes ou celle de la source froide évolues pendant le cycle de chauffe (A noter que le cycle de chauffe peut durer plusieurs mois pour le chauffage alors qu'il se passe sur un laps de temps beaucoup plus faible pour l'ECS). Bien qu'issue de théories anciennes basées sur le principe de la machine de Carnot et de fluide caloporteur tel que l'eau initialement utilisée pour les locomotives, elle prouve que le « rendement » d'une pompe à chaleur est amélioré lorsque la température de l'eau pompée augmente ou inversement lorsque la température du circuit de chauffage diminue. Pour cette raison l'utilisation de radiateurs largement dimensionnés ou planchers chauffants basse température est conseillé. Les progrès effectués récemment avec les fluides caloporteurs modernes permettent d'arriver à des COP de 5 (voir 6 pour les PAC aquathermiques de forte puissance) avec un chauffage au sol basse température. La réutilisation des radiateurs muraux des immeubles anciens est également envisageable pour la raison qu'ils étaient largement dimensionnés avant 1975. Le rendement peut être notablement affecté si la température requise à la source chaude est trop élevée. Sur les pompes à chaleur aquathermiques modernes, une température de sortie condensateur de 55°C entraîne un COP qui reste supérieur à la valeur minimum admise de 3. Vu le coût important de l'énergie électrique il est généralement plus intéressant en terme d'amortissement de remplacer les radiateurs en place.

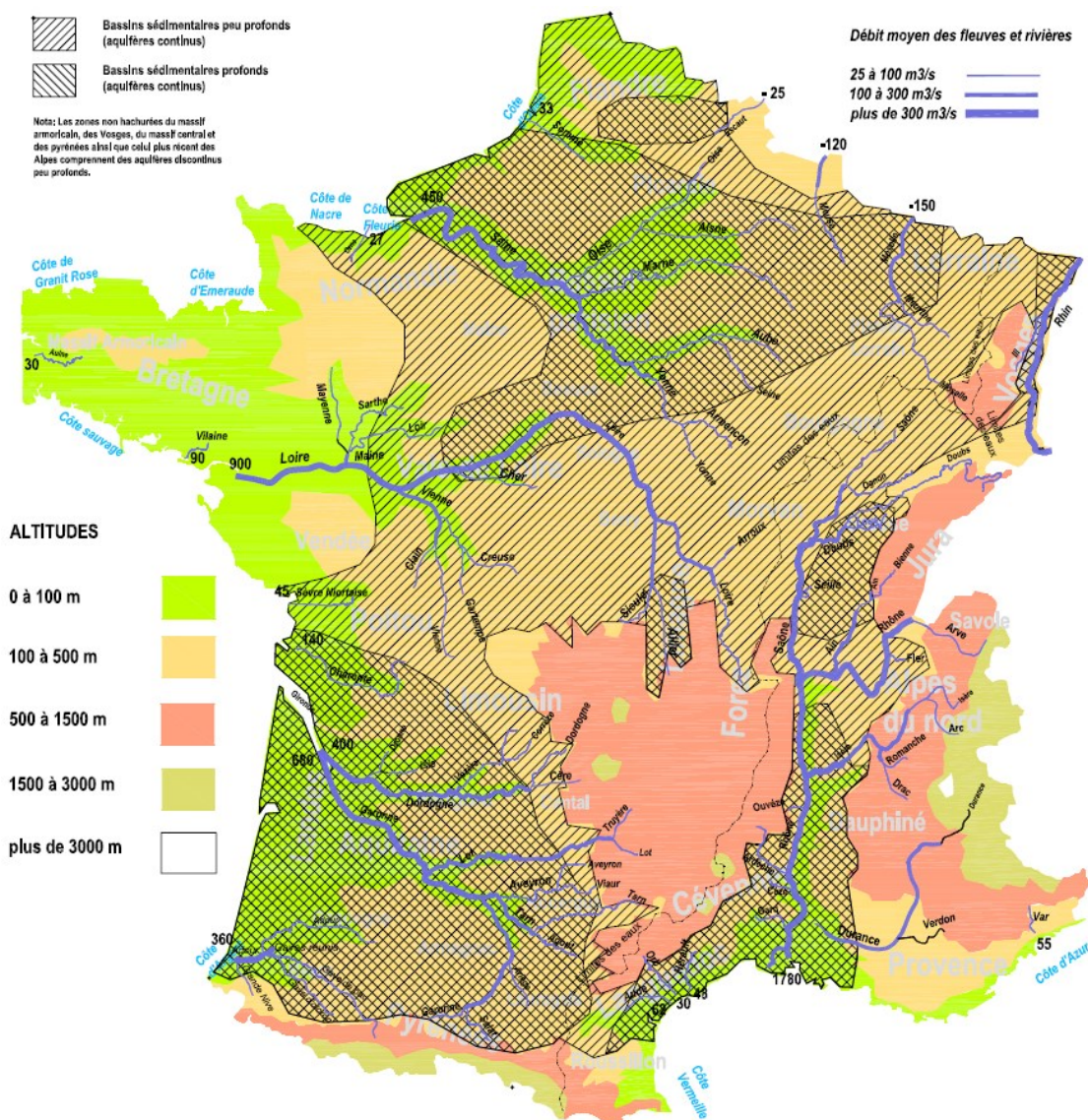
Synoptique simplifié

*fonctionnement d'une PAC
eau/eau sur nappe libre.*

*Evaporateur en chaufferie
avec aspiration et rejet
dans la nappe libre*



La rivière source d'énergie



Données Géothermie perspectives

Ce sont surtout les bassins sédimentaires peu profonds en hachure simple qui présentent un intérêt pour la géothermie superficielle et le chauffage thermodynamique utilisant les nappes dites libres. On remarque l'importance des surfaces potentiellement favorables à ce mode de chauffage. Seules les régions montagneuses massif central, alpes, pyrénées et jura ainsi que la Bretagne sont exclues de ce périmètre.

Comprendre ce qu'il faut faire ou forer?

Le débit nécessaire pour assurer les échanges thermiques dans la pompe à chaleur sur nappe libre ne sont pas très importants (environ 2 l/mn par kW thermique restitué). Il y a des régions plus favorables que d'autres pour assurer la pérennité du débit. Les nappes aquifères sont continues dans les zones hachurées de la carte précédente. Elles sont donc plus favorables que les zones non hachurées ou les aquifères peu profonds sont discontinus. La proximité de la rivière apporte une garantie supplémentaire et les débits disponibles sont généralement supérieurs au besoin. Il existe même dans le sud-ouest du bassin aquitain et dans le bassin parisien des zones ayant des aquifères raisonnablement profonds sans discontinuité favorables à la géothermie grande profondeur avec des températures pouvant excéder 70°C.

Cas des maisons individuelles en zone rurale (puissance thermique 20 à 50 kW)

1) Ce qu'il ne faut pas faire

Il est important d'une part, de ne pas trop rapprocher le forage de la source chaude (eau aspirée à environ 12 à 14°C alimentant la PAC) et celui de la source froide (eau rejetée dans le sous-sol à environ 4°C); d'autre part le forage de l'eau pompée devra être impérativement en amont du forage de l'eau plus froide rejetée pour les raisons évoquées ci-dessus. D'autant que le niveau de la nappe a tendance à baisser localement autour du point de pompage. (Vortex)



figure 1

2) Ce qu'il est préférable de ne pas faire

Contrairement à la plupart des pays européens, les pompes à chaleur géothermiques vendues en France ont été ces deux dernières décennies et pour l'essentiel à **capteurs enterrés horizontaux**. Est-ce par crainte de ne pas trouver suffisamment d'eau dans le proche sous-sol?, cette solution probablement plus économique à implanter en raison du coût des deux forages verticaux entraîne pourtant des coûts d'exploitation et une consommation électrique plus importante en raison d'un COP plus faible. Elles utilisent de l'eau additionnée de glycol au cas où le sous-sol gèlerait et elles ont, toujours pour les raisons évoquées plus haut (formule 4) un moins bon rendement. De plus elles sont condamnées en zones urbaines où le terrain est rare.



3) Ce qu'il peut être intéressant de faire

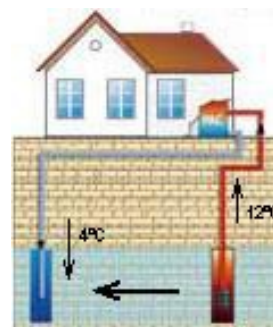
Si l'habitation est en zone rurale et à proximité de la rivière l'eau plus froide peut être rejetée directement dans la rivière, le drainage d'un canal ou dans un ruisseau contiguë au terrain ce qui réduit d'autant les frais d'installation. (elle peut aussi servir à arroser économiquement le jardin). On peut aussi utiliser l'eau de la rivière pour faire fonctionner une pompe à chaleur. Selon le débit prélevé par la pompe, le débit d'étiage du cours d'eau et le type de cours d'eau (domanial ou non), cet usage peut être soumis à déclaration ou à autorisation et assujéti à une redevance du domaine public (rivières domaniales).

Pour plus de renseignements, se renseigner à la direction départementale de l'agriculture et de la forêt. C'est auprès d'elle que se font les démarches nécessaires. On peut penser que la redevance est symbolique étant donné que la pompe à chaleur en rejetant une eau plus froide dans la rivière participe à la défense de son écosystème



4) Ce que l'on peut faire

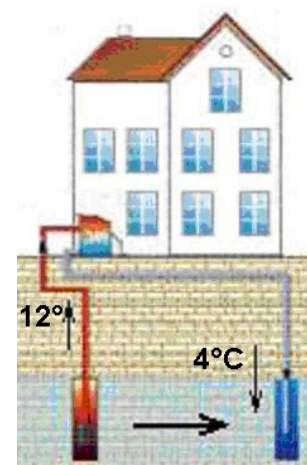
Pour une grande propriété sur un grand terrain et lorsque la maison est éloignée de la rivière la solution à deux forages verticaux peut être envisagée en raison de l'excellent rendement (COP de 4)



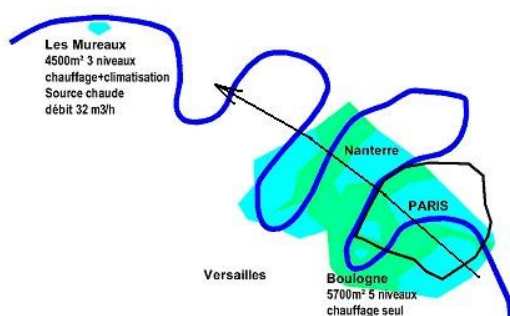
Cas des immeubles en zone urbaine (Puissance thermique jusqu'à 500 kW)

5) Ce que l'on pourrait éventuellement faire

En zone urbaine, le terrain est rare. Lorsque l'immeuble est situé sur un jardin de taille raisonnable, la surface de terrain requise pour les forages verticaux est la plupart du temps compatible avec la pompe à chaleur aquathermique. Le débit utile pour générer une puissance thermique de 300 kW, suffisante pour chauffer un gros immeuble, assez mal isolé est de l'ordre de 40 m³/h. Le rendement des pompes à chaleur forte puissance est excellent (Un COP de 5 est envisageable avec les planchers chauffants basse température ou avec les radiateurs des immeubles anciens souvent largement dimensionnés. Compte tenu de ses avantages financier, ce mode de chauffage mériterait d'être plus souvent utilisé en ville, les municipalités créant un réseau d'alimentation en eau non potable venant de la rivière ou de sa nappe libre en liaison avec elle et rejetant l'eau plus froide ou plus chaude du rejet selon que le système thermodynamique fonctionne en mode chauffage ou climatisation



6) Ce que les municipalités devraient entreprendre plus souvent sous le contrôle d'un organisme accrédité



La première PAC aquathermique des Mureaux

L'Ile Seguin le pont de sèvres et son éco quartier

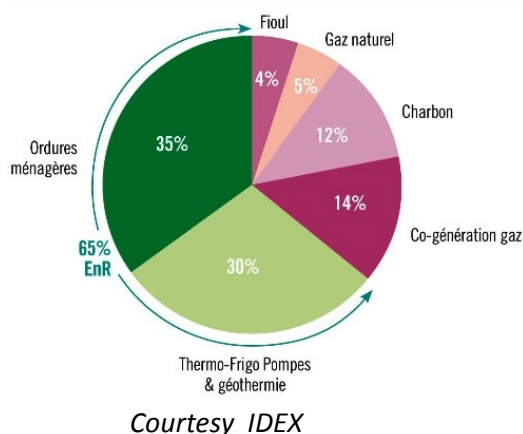
La pesanteur régit la circulation de l'eau souterraine des nappes libres qui s'écoulent lentement vers l'aval par effet gravitaire. Il est raisonnable de penser que le sens d'écoulement des nappes phréatiques suit le profil moyen de la rivière. Dans le cas de méandres tels par exemple ceux de la basse Seine on peut s'interroger si l'écoulement se fait en suivant le profil moyen de la rivière ou si des écoulements locaux ayant des directions différentes peuvent s'établir. Ce point est important par le fait que le forage de l'exhaure (L'aspiration) doit être effectué en amont de telle sorte que l'eau plus froide rejetée par la pompe à chaleur en mode chauffage ou plus chaude en mode climatisation ne vienne pas diminuer les performances du système.

La rivière source d'énergie

Le futur éco quartier de l'île Seguin près du pont de Sèvres sur le site des anciennes usines Renault occupe une situation privilégiée pour installer le chauffage thermodynamique des bâtiments, piscines, centre hospitalier et culturels qui vont s'ériger prochainement sur cette île. Les travaux déjà effectués par la société IDEX qui construit actuellement un réseau de chaleur et de froid pourraient servir de tremplin pour une extension de ce type de chauffage dans cette région privilégiée. C'est déjà l'équivalent de 5000 logements (80 000 m² en rénovation **RT 2005** et 300 000 m² en neuf) qui est d'ores et déjà chauffé et refroidi par ce réseau de chaleur et de froid. Ce réseau continue à s'étendre au rythme de la progression des constructions et rénovations immobilières et à l'horizon 2020, le bien-être thermique de 10 000 habitants et 15 000 salariés (45 % logements, 33 % bureaux, 22 % activités et équipements publics) sera assuré par ce réseau de chaleur et de froid. Ce réseau combine trois sources d'énergies vertes différentes :

1. La valorisation énergétique des **déchets ménagers** provenant du centre d'Issy les Moulineaux avec une sous-station d'échange *vapeur/eau chaude* totalement intégré à l'infrastructure d'une copropriété et délivrant une énergie thermique de 65 GWh par an.

2. Une **centrale thermo frigorifique** avec valorisation géothermale saisonnière. Selon les niveaux de températures, des thermo frigo pompes iront puiser dans la nappe libre en communication avec la Seine un débit d'eau supérieur à 1000 m³/h au moyen de 10 puits forés dans la craie afin de chauffer les bâtiments l'hiver avec une puissance de 20.000 kW (20MW) ou les refroidir l'été avec une puissance qui serait encore supérieure en raison des bureaux.



3. Une centrale de **stockage de glace** utilisant l'air ambiant et l'eau de la Seine afin de faire face aux pics de demande de climatisation dans la journée. Ces deux dernières centrales sont logées quant à elles dans les culées creuses du Pont de Sèvres. Ce réseau chaleur et de froid de l'éco quartier de l'île Seguin réalisé par la société IDEX a été reconnu par le ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement comme le premier réseau français **agréé BBC RT 2012**. Afin de soutenir les investissements importants nécessaires à un tel projet des aides sont octroyées par l'ADEME au travers du fonds chaleur renouvelable

Coup de gueule des Lutins thermiques

**Aussi incroyable que cela puisse paraître à l'heure de la RT 2012 et de ses exigences des audits énergétiques réalisés depuis 2008 sur un échantillon de 64 immeubles des bureaux situés dans l'éco quartier de Boulogne Billancourt couvrant une surface totale de 750 000 m² a révélé un D moyen de 598 kWh/m² ! Il faut dire qu'il a fallu non seulement faire du chaud quand il fait froid mais également faire du froid quand il fait chaud en raison des serveurs informatiques implantés dans les bureaux. (Voir revue CFP)*