La génération hybride gaz-électricité

L'étude ci-après concerne la conversion d'une chaufferie fioul consommant bon an mal an 120 m3 de fioul vers une génération thermique hybride combinant le gaz (combustion) et l'électricité (Chauffage thermodynamique du type PAC à compresseur type *eau eau)*

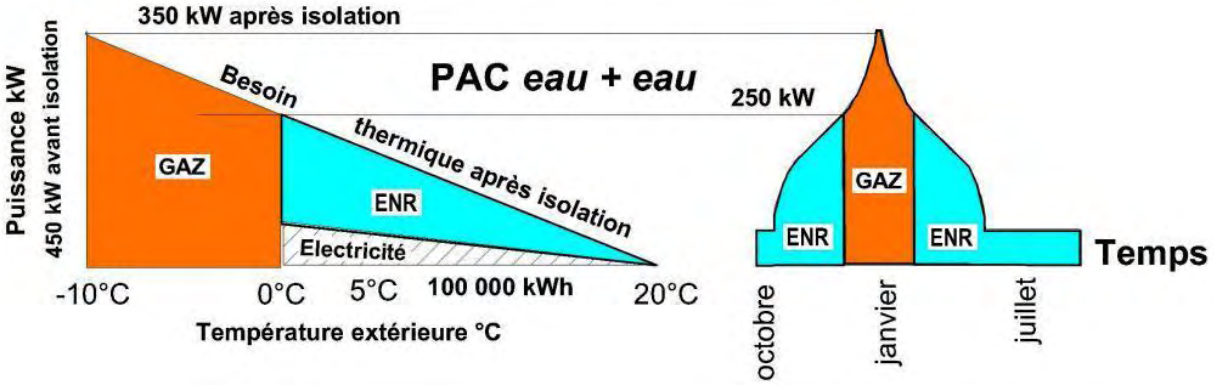


Figure 1 *Estimation besoins*

Puissance utile maximum sans isolation 450 kW* (Selon figure ci-dessus)
En pratique la puissance requise est un peu plus faible la PAC pouvant assurer l'ECS (Voir page 362)
Besoin thermique annuelle chauffage sans isolation 700 000 kWh
Puissance utile maximum avec isolation 350 kW
Besoin thermique annuelle chauffage avec isolation 450 000 kWh
Puissance nominale PAC 250 kW
Répartition énergétique annuelle approximative GAZ / ELEC / EnR

- en % 30/17,5/52,5
- en kWh 135 000 / 78 750 / 236 250 Compte tenu de l'amélioration du rendement chaudière qui peut passer à 95% voire plus avec une chaudière à condensation et des 3 estimations précédentes

1) Actuellement avant isolation pour une température intérieure Ti = 20°C

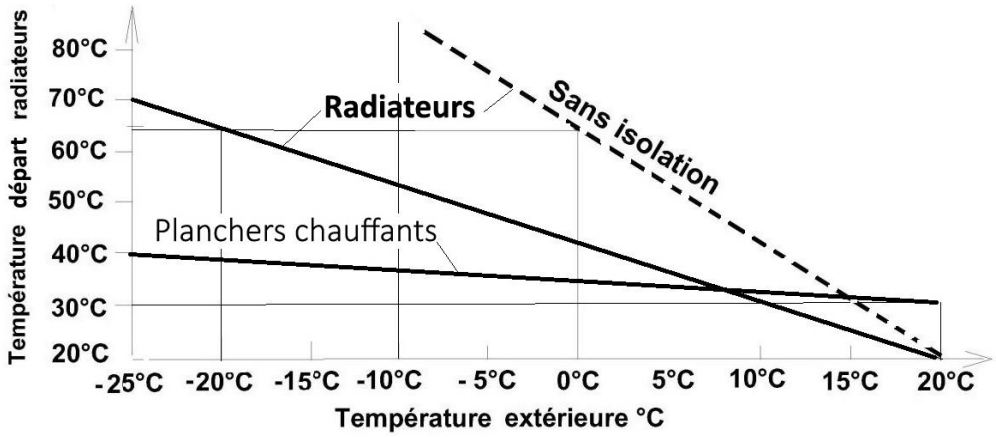


Figure 2 *Courtesy CFP*
La figure ci-dessus montre la loi d'eau de plusieurs systèmes de chauffage collectifs en Finlande pays nettement plus froid que le nôtre (en traits pleins). L'auteur a ajouté en pointillé la loi d'eau de l'immeuble objet du « cas pratique » avec les radiateurs existants. On observe l'avance technologique de ce pays qui a déjà standardisé les radiateurs basse température. Dans la synthèse qui suit on verra tout l'intérêt qu'il y a à doubler la surface des radiateurs existants de telle sorte qu'ils se rapprochent des radiateurs utilisés dans ce pays (pente de 1 au lieu de 2)

Boucle ouverte ou fermée en chauffage collectif

En observant les lois d'eau de la figure 2 précédente on perçoit quel pourrait être un mode de régulation envisageable pour assurer le confortf de l'occcupant. Il pourrait consister à asservir la température de départ vers les radiateurs à la température moyenne extérieure venant d'un capteur disposé en face nord et ayant la meilleure linéarité possible. Ceci en assurant une température de départ radiateur ayant un niveau légèrement supérieur au besoin permettant aux occupants les plus frileux de disposer de 21°C à minima dans leur pièce de vie. Ceci avec la possibilité pour chaque occupant d'effectuer un ajustement privatif sans perturber son voisin (Voir page 387). C'est en pensant à la citation d'Einstein sur la théorie et la pratique* que l'auteur fait cette proposition de régulation simplifiée en lieu et place de la régulation en boucle fermée peut-être plus élégante comparant une valeur de consigne disons 20°C à la température venant d'un capteur intérieur au bâti localisé en partie commune. (Voir page 228)

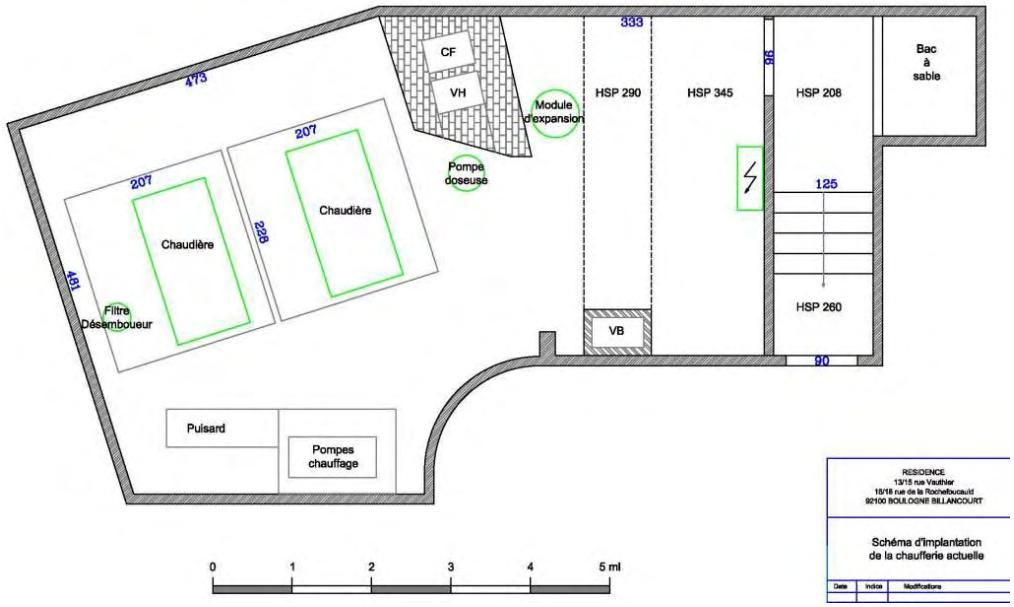


Figure 3 *Implantation en chaufferie avant modernisation : Deux anciennes chaudières fioul de 395 kW surdimensionnées.*

2) Après isolation pour une même température intérieure Ti = 20°C

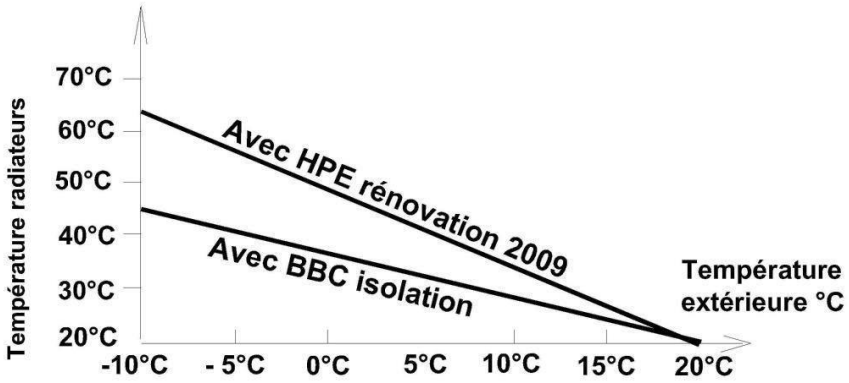


Figure 4 *L'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas. L'isolation dite à minima étudiée au chapitre précédent correspond sensiblement au HPE rénovation 2009*

**La théorie c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique c'est tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici nous avons réunis théorie et pratique. Rien ne fonctionne et personne ne sait pourquoi !*

1er abaissement de la température à la source chaude

En améliorant l'isolation des logements on ne fait pas qu'économiser de l'énergie, on prépare l'habitation à recevoir une chaufferie thermodynamique performante. Ceci en abaissant la température requise dans les radiateurs sans affecter notre confort. En diminuant le besoin en énergie thermique de 274 000 kWh, le poste isolation à minima décrit pages 365 à 375 diminue le nouveau besoin énergétique annuel pour le chauffage qui passe à 700 000 – 274 000 = 426 000 kWh en admettant que les pertes thermiques en raison d'un calorifugeage insuffisant sont réparties à parts égales entre les tuyauteries verticales et horizontales. Cette répartition entre ces deux transferts thermiques étant à confirmer par le BE qui fera l'audit énergétique. Le gain de 39% de cette isolation à minima est donc loin d'être négligeable puisqu'il entraîne une première diminution de la température dans les radiateurs dans le même rapport. Avec des radiateurs à 85°C avant isolation par -10°C extérieur (*Voir figure 1*) soit un ***ΔT*** de 65 °C pour 20°C dans les pièces, le ***ΔT*** utile après isolation est ramené à 65 x 0,61= 39,7°C et la température dans les radiateurs ramenée à environ 60°C sans affecter le confort. Le bénéfice à retirer de la phase isolation est double : D'une part celui d'une déperdition moindre : l'énergie la moins chère est celle que l'on ne consomme pas et d'autre part l'assurance de bénéficier d'un chauffage thermodynamique à la performance améliorée : l'énergie la plus chère, l'électricité est celle que l'on se doit de consommer plus intelligemment. On y parvient par le fait qu'en abaissant la température de la source chaude de 85°C à 60°C avec une source froide à 10°C, les performances du chauffage thermodynamique sont améliorées amélioré de 35 %

Démonstration
COP = Tc / (Tc - Tf) soit
Avec 85°C utile dans les radiateurs ***COP1*** = 273 + 85/ (85-10) = 358 / 75 = 4,77
Avec 60°C utile dans les radiateurs ***COP2*** = 273 + 60 / (60 -10)= 333 / 50 = 6,66
Facteur rectificatif On remarque qu'avant optimisation le *COP* réel est en pratique souvent limité environ 60% du COP théorique ci-dessus. On peut donc tabler à minima sur un COP réel voisin de 2,5 avant isolation et proche de 4 après une isolation se rapprochant de la classe dite HPE rénovation 2009. (Isolation dite à minima)

Type de chaudière GAZ

De nombreux fournisseurs de chaudières sont capables de moduler la puissance de sortie en évitant le fonctionnement en tout ou rien. Les chaudières De Dietrich peuvent ainsi moduler la puissance de 20 à 100% (air pulsée par variateur de vitesse) ce qui permet d'améliorer le rendement en mi saison lorsque le besoin en puissance est faible. C'est particulièrement pendant cette période que l'on peut améliorer les performances par rapport à l'utilisation d'une seule chaudière fournissant la totalité du besoin. On y parvient avec plusieurs chaudières identiques si possibles à condensation fonctionnant en cascade équipés de brûleurs modulant adaptant la puissance émise au besoin sans qu'il soit nécessaire d'arrêter le brûleur en marche TOR. De plus certaines chaudières comme De Dietrich ou Budérus (Leaders sur le marché de la condensation) acceptent des températures de retour très basses ce qui est favorable à la condensation (Gain supplémentaire sur le rendement).

Points complémentaires importants concernant la génération GAZ

Tubage (évacuation des gaz brûlés)

Le passage au gaz sur une anicienne chaufferie fioul impose le tubage des anciens conduits de cheminées en tuyauterie inox. On parle de fumisterie pour ces tuyauteries basse pression

assurant l'évacuation des gaz brulés. Les diamètres de raccordement sont réalisés selon la taille des orifices de raccordement prévue par le constructeur des chaudières. Afin de limiter la pression dans ces conduits d'évacuation à environ 120 Pascal, le diamètre de ces tuyauteries prévues en acier inoxydable sont assez important (300 mm dans le cas de la figure 6)

Condensats

Les responsables du poste fumisterie estiment qu'une chaufferie équipée de chaudières à condensation rempli bien sa fonction lorsque le condensat est d'environ 1 litre pour une génération thermique de 10 kWh ou ce qui revient sensiblement au même par m3 de gaz naturel consommé. Des constructeurs tels que DeDietrich annonce un pH de ce condensat n'excédant pas 8,5 pour éviter d'attaquer les corps de fonderie en aluminium au silicium et aussi pour assurer un rejet dans les eaux usées avec un pH supérieur à 6, 5 limite inférieure de la réglementation. C'est le constructeur des chaudières qui assure généralement la fourniture du bac de traitement des condensats. L'évacuation du condensat vers les eaux usées se fait en en utilisant des tuyauteries PVC.

Marche des chaudières

Les chaudières marchent en cascade. La deuxième chaudière se met en marche lorsque la première atteint 30 % de sa puissance nominale. Le rendement global est ainsi amélioré selon les constructeurs de chaudière

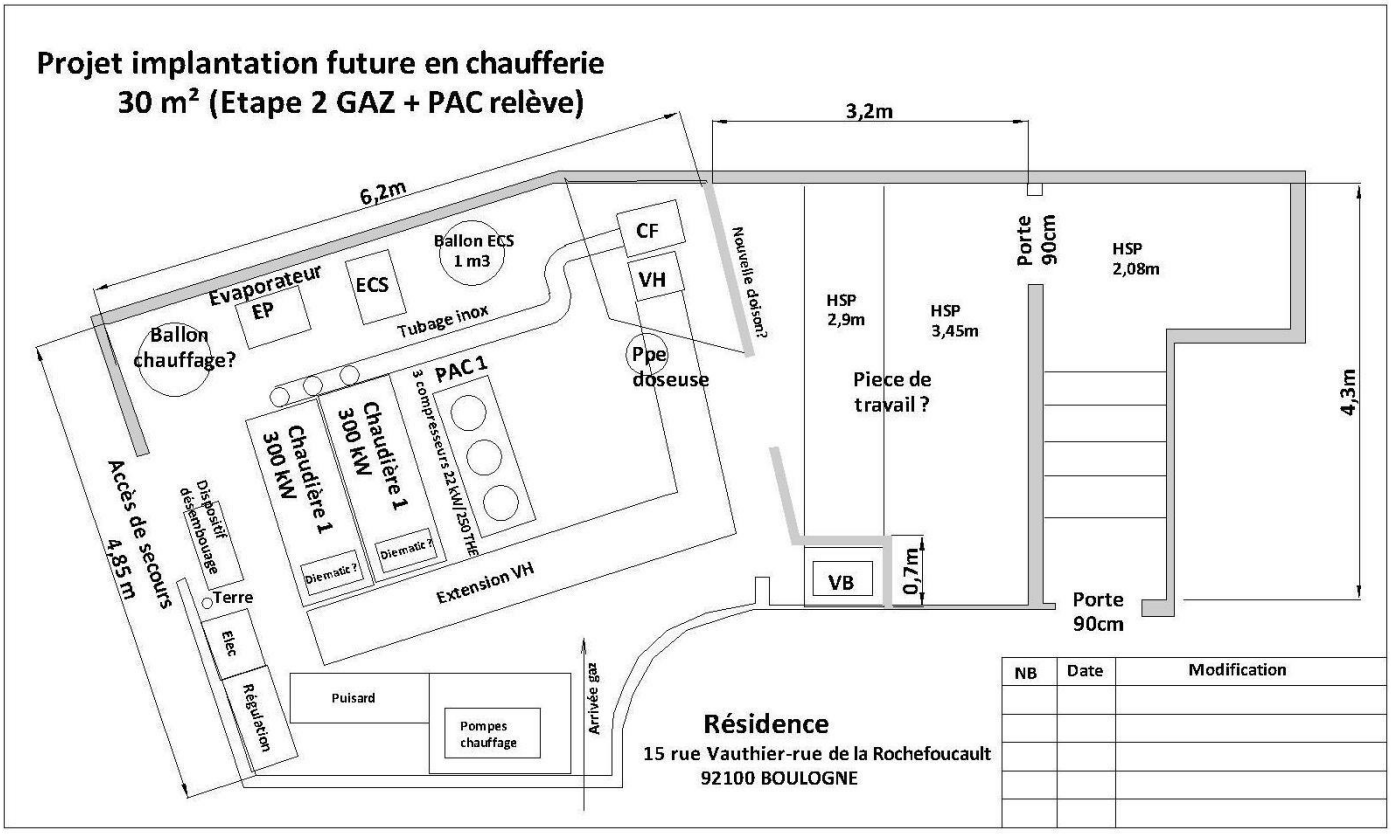


Figure 5 *Implantation chaufferie avec disposition horizontale : Solution valable pour grosses chaufferies P > 500 kW*

Nota

Lors de la mise en route la solution proposée pour la partie GAZ ne devra pas générer un arrêt supérieur à un jour pour la partie ECS la commutation pouvant se faire en fonctionnant temporairement avec une seule chaudière. La fourniture de l'ECS étant assurée temporairement par une des chaudières fioul et son ancien dispositif ECS.

La chaudière C610700 prévue est dans le cas de la disposition horizontale constituée de deux chaudières assemblées l'une sur l'autre comme montré sur cette photo

Courtesy De Dietrich

En faisant varier les débits d'air et de gaz le brûleur modulant d'une chaudière moderne permet d'ajuster la puissance de chauffe en fonction du besoin sur une plage allant de 20 à 100 % avec un fonctionnement à charge réduite en mi-saison ayant un rendement amélioré par rapport au fonctionnement tout ou rien des anciens brûleurs

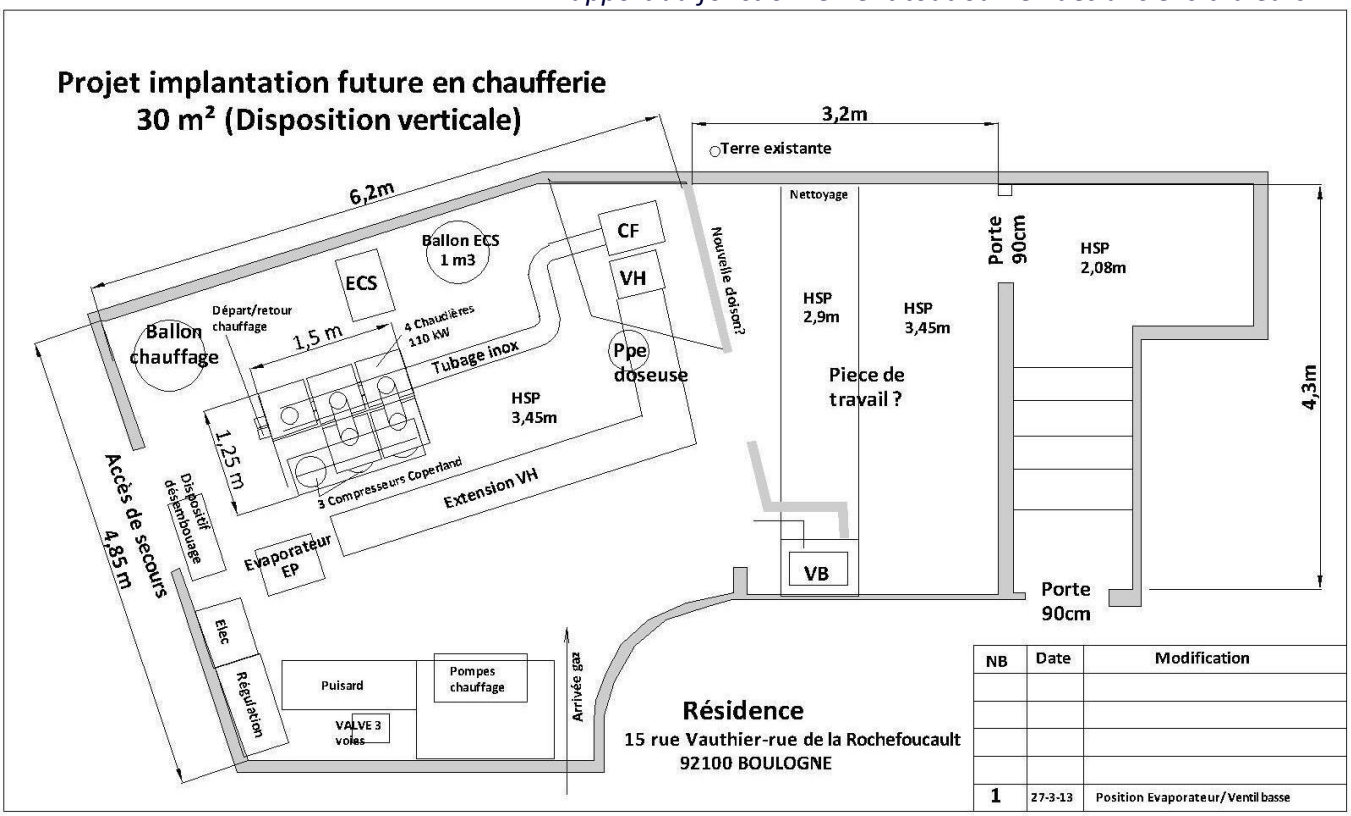
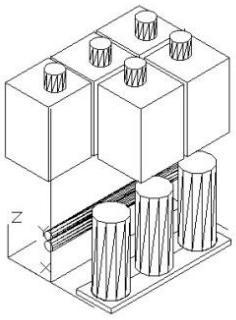
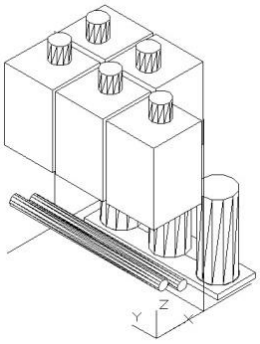
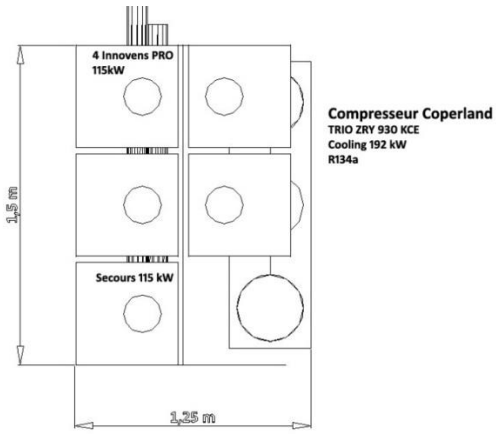


Figure 6 *La disposition verticale est intéressante lorsque l'on manque de place dans le sous-sol des immeubles. Elle surtout intéressante pour les petites chaufferies d'une puissance P < 500 kW*







Figures 7 *Dans le cas de la disposition verticale, les groupes moto-pompes constituants les compresseurs de la pompe à chaleur sont situés au niveau inférieur et les chaudières Innovens PRO sont surélevées par rapport aux. est constituée de deux chaudières assemblées l'une sur l'autre comme montré sur cette photo*

3) Avec radiateurs basse température pour Ti = 20°C

Vous l'avez maintenant probablement deviné, c'est bien l'électricité *que l'on consomme mal*

2ème abaissement de température à la source chaude

Un radiateur en acier émet une puissance de 10 watt/m² et °C de ***ΔT*** entre la température de la pièce et celle du radiateur. Si on double la surface de chauffe des radiateurs après avoir réalisé l'isolation à minima le ***ΔT*** est ramené à sensiblement de 40°C à 20 °C avec un COP encore amélioré :

Démonstration
COP = Tc / (Tc - Tf) soit
Avec 60°C utile dans les radiateurs ***COP2*** = 273 + 60 / (60 -10)= 333 / 50 = 6,66
Avec 40°C utile dans les radiateurs basse température ***COP3*** = 273 + 40/ (40-10) = 313/30= 15,5
Le besoin en énergie primaire est sensiblement divisé par deux

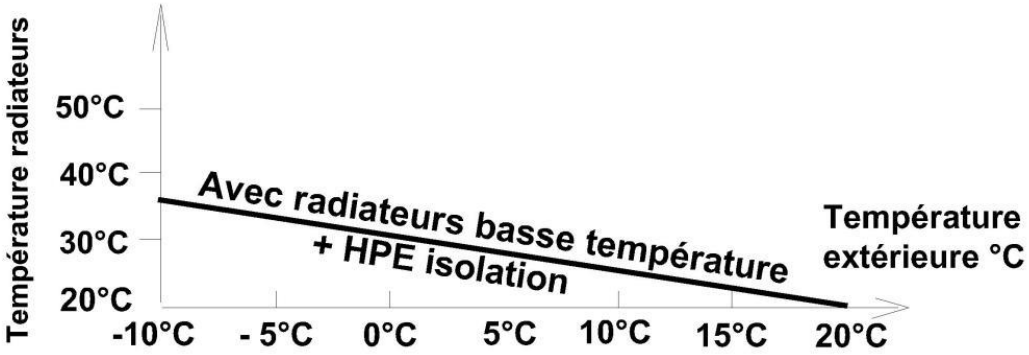


Figure 8 *L'énergie la plus chère est celle que l'on consomme mal*

En agissant sur le dimensionnement des émetteurs thermiques on ne diminue pas seulement les taches noirâtres au plafond, on abaisse la température requise dans les radiateurs une deuxième fois ce qui présente l'avantage à confort équivalent d'améliorer à nouveau les performances du chauffage thermodynamique. Cet avantage valant particulièrement dans le cas des radiateurs hydrauliques qui nécessitent des températures plus élevées que les planchers chauffants en raison de leur surface d'échange moins importante. Lorsque l'on souhaite installer un chauffage thermodynamique dans un immeuble équipé de radiateurs hydrauliques on peut donc avoir intérêt à augmenter leur surface de chauffe pour améliorer les performances de la génération thermique. On diminue ainsi d'une façon significative la consommation d'électricité, fioul sans affecter la température intérieur ***Ti*** des pièces à chauffer. Une pompe à chaleur haute température peut aussi être une solution à ce problème mais le circuit hydraulique est plus complexe et les performances moindres.

Modes de marche

En complément à ces notions préliminaires relatives à la diminution de la température requise à la source chaude on peut encore améliorer l'efficacité de la génération en répartissant mieux la consommation d'énergie primaire entre le gaz et l'électricité :

1. Selon le niveau de température requis à la source chaude et ceci qu'il s'agisse du chauffage ou de la fourniture de l'eau chaude du sanitaire
2. Selon le niveau de température de l'environnement à la source froide en répartissant l'échange thermique avec l'environnement entre l'air et l'eau selon les saisons

Ce sont ces deux dernières améliorations qui sont évoquée ci-après. Selon le niveau de température requis à la source chaude les deux énergies primaires sont utilisées alternativement

Nota technique

On a vu en évoquant *la régulation* que la puissance perdue par le bâti est proportionnelle à Te-Ti . La puissance de production des EnR thermiques est proportionnelle au débit massique Q_f (kg/s) du fluide caloporteur. Cette puissance est aussi proportionnelle au débit d'eau dans le primaire de l'échangeur à plaque du condenseur ainsi qu'à la chute de température $\Delta\vartheta_e$ de l'eau dans le primaire de cet échangeur $\Delta\vartheta_e = Te - Ts$,

On a donc (Voir la satisfaction du besoin thermique) $P = e_f Q_f = c_e Q_e \Delta\vartheta_e$

Avec e_f = « chaleur latente (massique) de transformation » appelée aussi l'enthalpie exprimé en kJ/kg du fluide caloporteur.

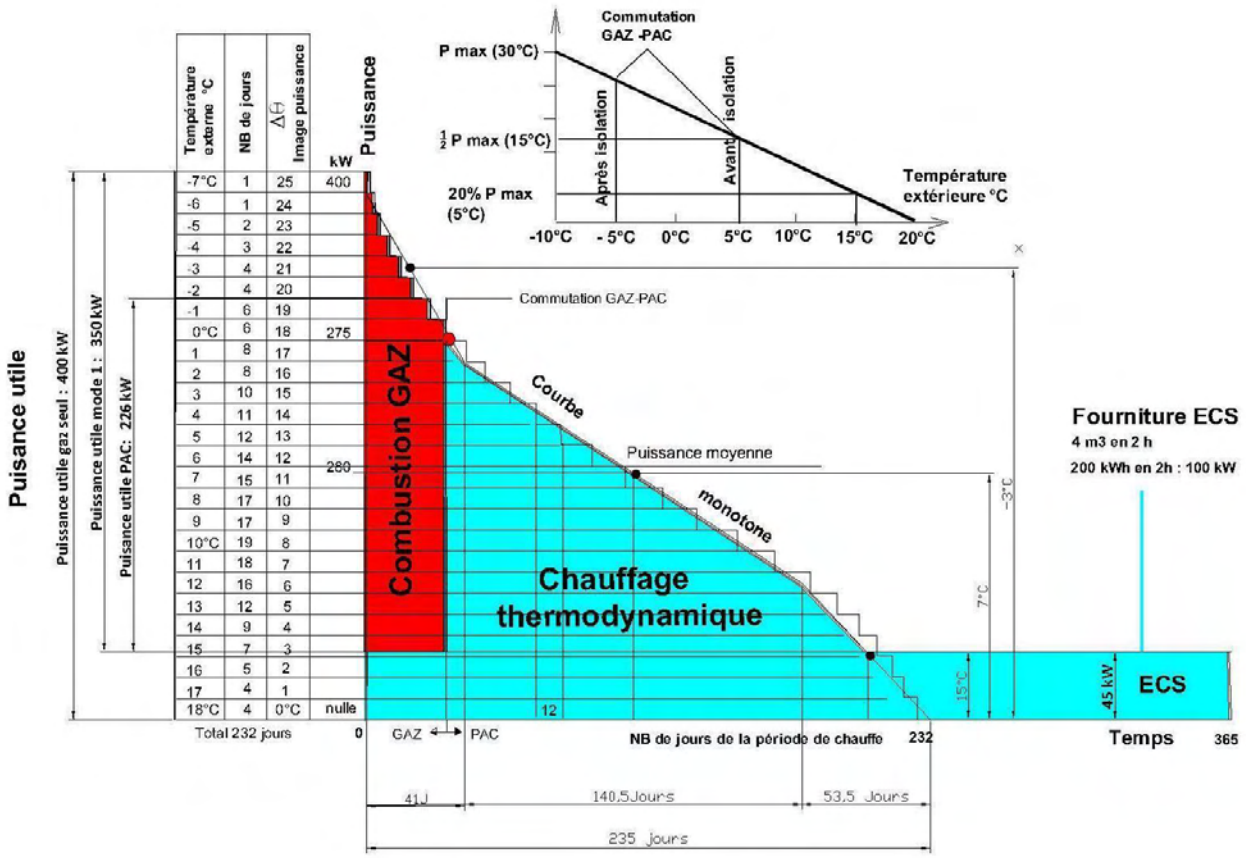


Figure 9 *Même si l'on ne procède à aucune isolation, la commutation GAZ > PAC eau eau est pratiquement envisageable dès 0°C extérieur au lieu de 7°C à 8°C avec la PAC air-eau et ceci avec un meilleur COP. Les surfaces étant proportionnelles aux énergies (P = W x temps), on observe, que l'énergie produite en mode pompe à chaleur eau-eau est nettement supérieure à celle produite par la combustion. Environ 20 à 25% de l'énergie produite par la PAC est toutefois de l'énergie électrique payante. La différence 75 à 80% est prélevée gratuitement dans la nappe phréatique pour le plus grand bien du pouvoir d'achat de l'utilisateur*

Implantation en chaufferie tuyautage

Option *complément EnR* incluse ou non au départ, le circuit hydraulique et l'implantation en chaufferie sera prévue pour faciliter l'installation ultérieure du dispositif de chauffage thermodynamique sans contrainte particulière : Fourniture des départs bouchonnés, des doigts de gant si nécessaire pour les prises d'information température, électrovalves de séparation permettant d'assurer une commutation automatique de la combustion vers le chauffage thermodynamique et inversement

Les différentes boucles (cohabitation GAZ – PAC)

① En réglant la quantité d'air de combustion et le débit de gaz naturel la chaudière fourni la puissance utile, pas plus.

② Le dispositif de mise à vide du compresseur module le débit du fluide caloporteur au prorata du besoin thermique. Le compresseur tourne en permanence améliorant les performances, le débit d'eau est ajusté sur l'évaporateur selon le besoin thermique

② La boucle de température extérieure anticipe les variations de température ambiante.
Le système ballon - PAC se comportant comme une fonction linéaire du premier ordre un correcteur électronique type intégrateur sera prévu pour annuler l'erreur statique**.**

Combustion vers chauffage et ECS en marche non simultanée

Les clapets antiretour de cette proposition de circuit ne sont pas représentés

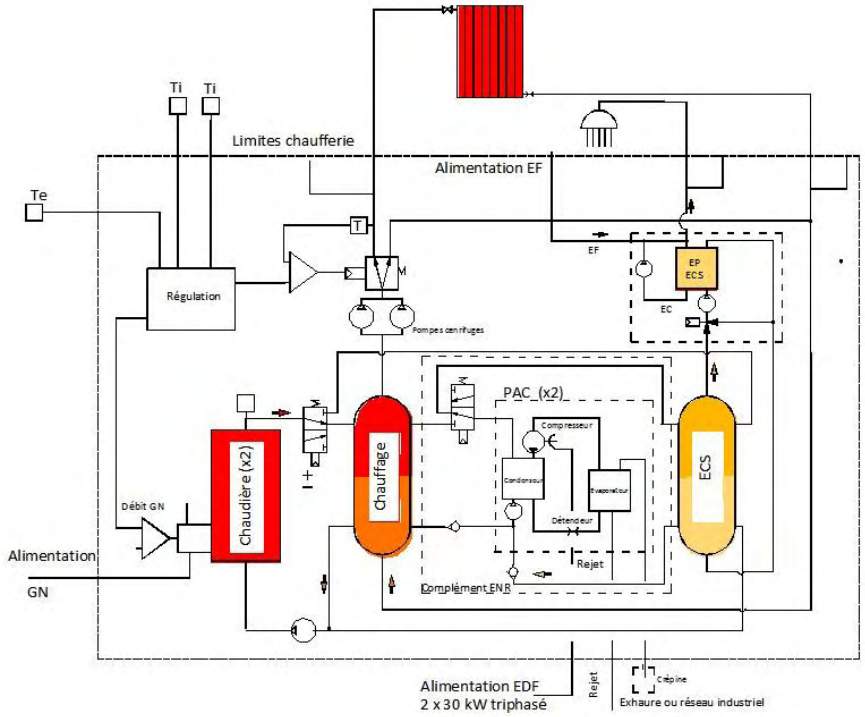


Figure 10 *Mode de marche possible avant que le complément ENR ne soit installé ou enfin lors de l'entretien de la PAC. La constante de temps thermique importante d'un immeuble autorise ce mode de marche lors d'un cycle de nuit (Voir page 143) ou dans la phase préliminaire de mise en route*

Mode hivernal : Chauffage par le gaz et ECS par la PAC

La combustion vers le circuit chauffage des radiateurs et le chauffage thermodynamique vers l'ECS peuvent fonctionner simultanément pendant la période la plus froide de l'hiver l'hiver.

Le gaz assurant le travail pour une température à la source chaude comprise entre 60 et 85 °C dans le cas des radiateurs haute température alors que la température à la source chaude de la PAC est limitée à environ 50°C/55°C améliorant les performances sur l'ECS

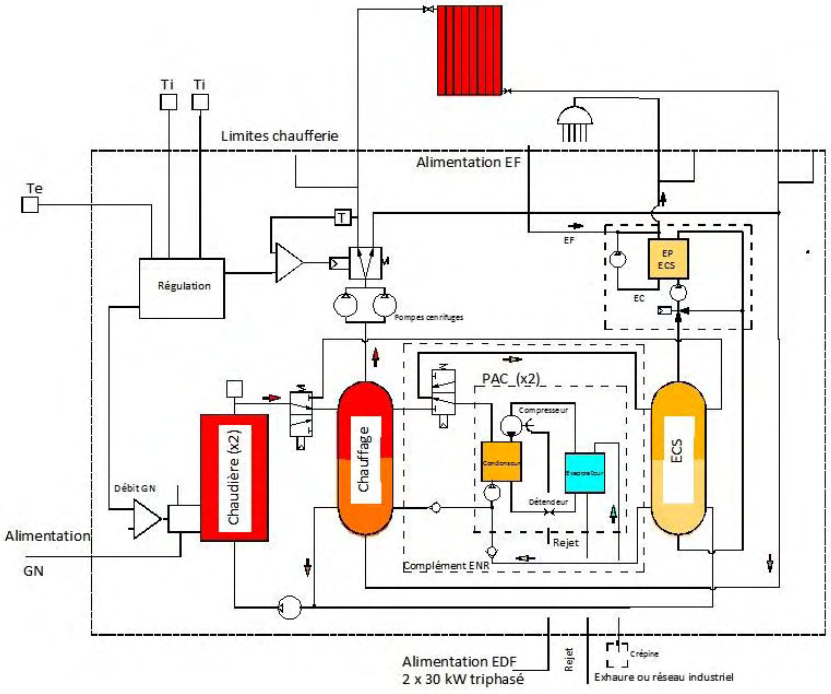


Figure 11 *Fonctionnement en mode bivalent parallèle en hiver en-dessous de la température de commutation, la combustion assurant le chauffage et la PAC l'eau chaude sanitaire(ECS)*

Mode mi saison : Chauffage et ECS par la PAC

Ceci avec un fonctionnement en mode bivalent alternatif.

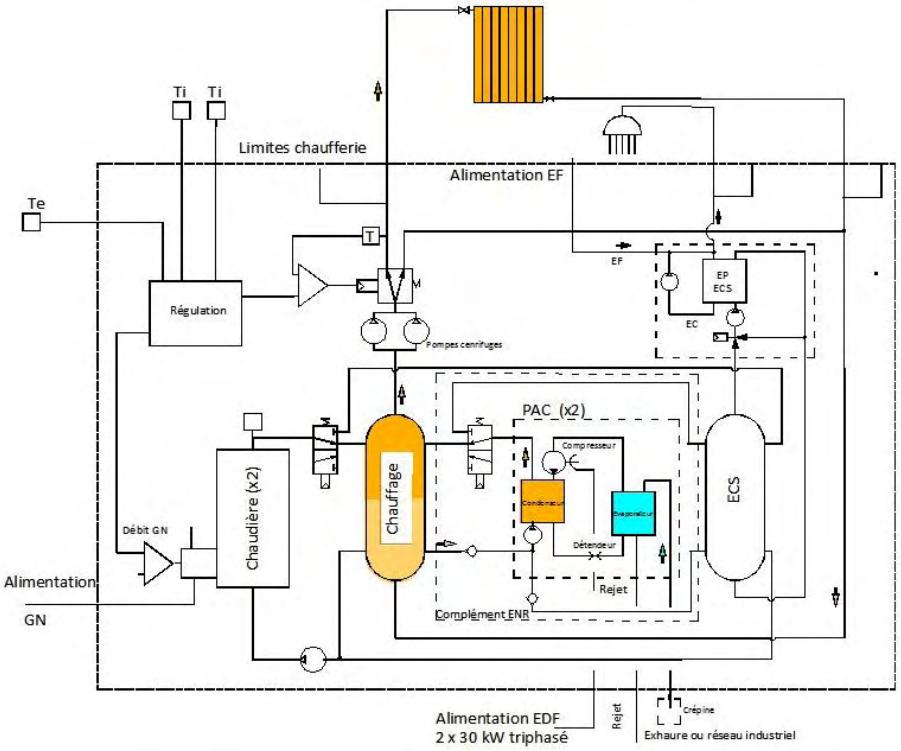


Figure 12 *La PAC assure le chauffage pour une température à la source chaude comprise entre 30 et 55°C*

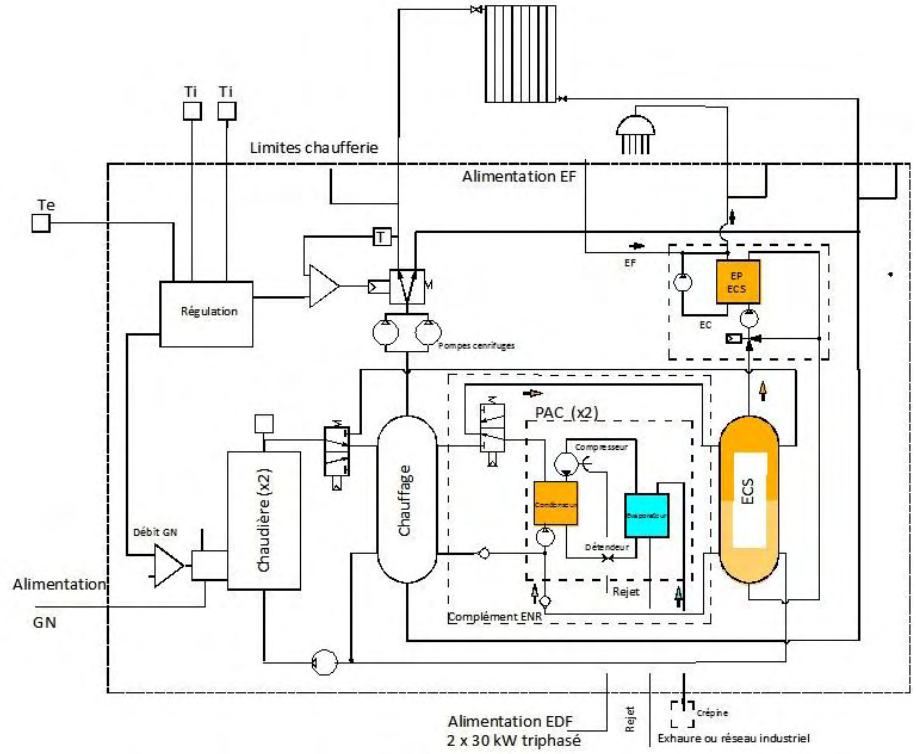


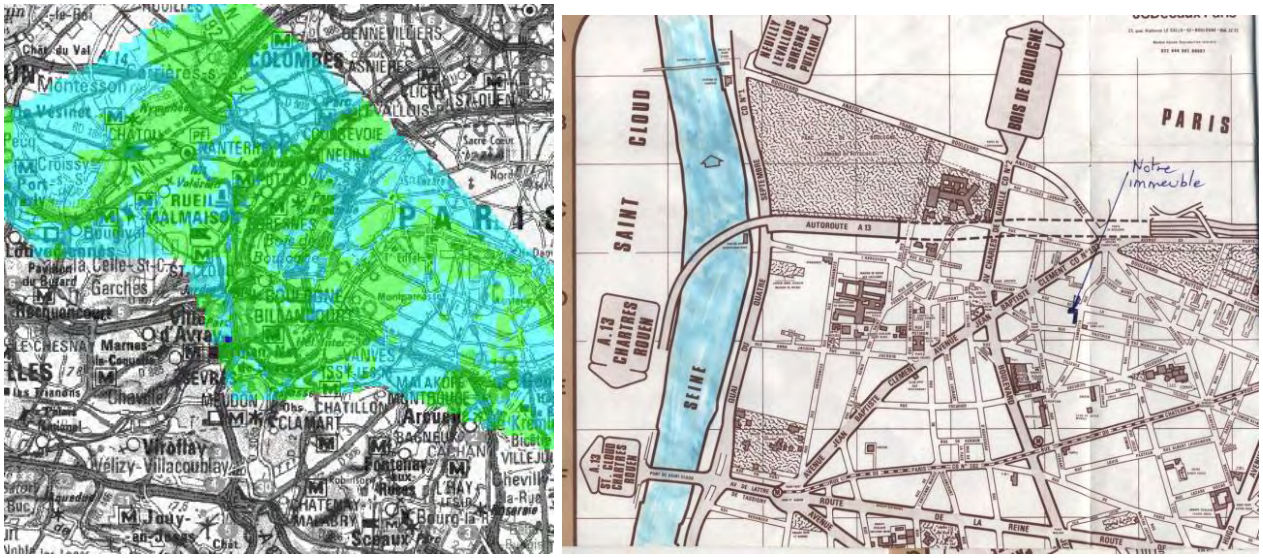
Figure 13 *La PAC fourni l'eau chaude sanitaire (ECS) pendant toute l'année pour un coût particulièrement attractif et ceci pour les températures à la source chaude allant de 10 à 55°C. La fourniture de l'eau chaude sanitaire étant prioritaire sur le chauffage. Les chaudières à gaz sont arrêtées.*

Les ballons tampon

On recommandait lors du dimensionnement des anciennes pompes à chaleur et pour les besoins de la régulation de prévoir un ballon tampon soigneusement isolé ayant une taille de 15 litres par kW thermique utile. Ce serait donc un ballon de 15 x 240 = 3600 litres soit environ 4m3 qui serait nécessaire. En pratique, l'arrivée des solutions « *inverter* » faisant varier le débit du fluide caloporteur dans le circuit fermé de la PAC dispense de prévoir un volume aussi important sur le circuit chauffage. Cela est différent pour le circuit de l'eau chaude sanitaire compte tenu du besoin journalier voisin de 4 m3 (1500m3 d'eau chaude à l'année). Pour générer 4 m3 d'eau chaude à 60°C à partir d'une eau froide à 10°C il faut environ 200 kWh (50 kWh/m3). Si on se donne 2h* pour le faire il faut une puissance de 100 kW puissance (environ 120kW avec les déperditions dans les tuyaux). Cette puissance peut facilement être délivrée par le condenseur de la PAC aquathermique. En pratique une capacité voisine de 1 à 2 m3 maximum pour le ballon d'échange thermique ECS des 4 figures précédentes semble largement suffisant. L'eau chaude sanitaire étant prioritaire sur le chauffage cette solution, qui assure une production d'eau chaude sanitaire en semi-instantanée évite que le dispositif ne commute trop souvent sur l'ECS en cas de besoin ponctuel. Compte tenu de la constante de temps thermique importante d'un immeuble avec plancher en béton et la faible chute de température dans les appartements qui en résulte, il est tout à fait acceptable de couper le chauffage une à 2h pendant la nuit pour recharger thermiquement ce ballon tampon.

Les conditions locales du sous-sol

La nature crayeuse* du sous-sol boulonnais (couleur vert) a un potentiel favorable allant de moyen à fort sur une échelle allant de très faible à très forte. Le terrain est à environ 1 km de la Seine à l'intérieur d'une boucle. Si cela est possible, le puits (ou exhaure) pourrait éventuellement être prévu hors gel en chaufferie. La craie, roche sédimentaire est constituée presqu'exclusivement de carbonate de calcium sous forme de coccolite (squelette de foraminifères ayant vécu au crétacé. A noter que le « blanc de Meudon » et de Troyes sont des variétés de craie.



Plans de situation

Plan de masse du terrain et de l'immeuble (Courtesy Google earth)
Ce dernier est à environ 1 km de la seine à l'intérieur d'une boucle

Débit pompé dans la nappe libre

Le débit théorique à l'exhaure

Le débit maximum devant être pompé dans la nappe phréatique pour que la pompe à chaleur puisse fonctionner correctement est fonction de la température du rejet et de la puissance thermique maximum que la PAC doit fournir en hiver.

D'après la loi de conservation de l'énergie et au rendement près des composants dans lesquels circulent les flux thermiques (échangeurs de température à plaques que constituent l'évaporateur et le condenseur ainsi que dans les compresseurs) on observe que la puissance émise au condenseur $\boldsymbol{P_{COND}} = \boldsymbol{Q_{ch}} \times \boldsymbol{\Delta T_{ch}} \times \boldsymbol{c}$ est égale à la puissance prélevée dans l'environnement dans l'évaporateur $\boldsymbol{P_{EVAP}} = \boldsymbol{Q_{PAC}} \times \mathbf{c} \times \boldsymbol{\Delta T_{PAC}}$ majorée de la puissance électrique consommée par les compresseurs $\boldsymbol{P_{COND}/COP}$
La loi de conservation de l'énergie permet d'écrire au rendement près des échangeurs de température à contre-courant quel est le rapport entre le débit d'eau chaude dans le circuit de chauffage et celui nécessaire à l'exhaure.
Il suffit d'écrire que: $\boldsymbol{Q_{ch}} \times \boldsymbol{\Delta T_{ch}} \times \boldsymbol{c} = \boldsymbol{Q_{PAC}} \times \mathbf{c} \times \boldsymbol{\Delta T_{PAC}} + (\boldsymbol{Q_{ch}} \times \boldsymbol{\Delta T_{ch}} \times \boldsymbol{c})/\boldsymbol{COP}$
Soit $\boldsymbol{Q_{ch}} \times \boldsymbol{\Delta T_{ch}} ((\boldsymbol{COP} - 1)/\boldsymbol{COP}) = \boldsymbol{Q_{PAC}} \times \boldsymbol{\Delta T_{PAC}}$

$$\text{Ou} \quad \boldsymbol{Q_{PAC}} = \boldsymbol{Q_{CH}} \times (\boldsymbol{\Delta T_{ch}}/\boldsymbol{\Delta T_{PAC}}) \times [(\boldsymbol{COP} - 1)/\boldsymbol{COP}]$$

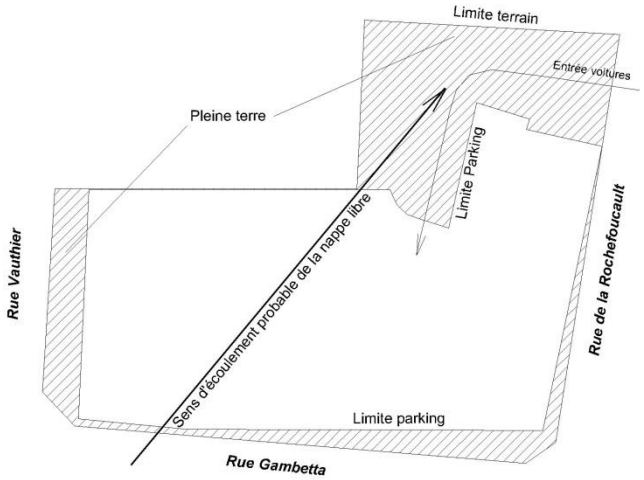
La formule ci-dessus est intéressante dans la mesure où elle permet, connaissant le COP et à partir des différences de température connues entre la température de départ vers les radiateurs et de retour au condenseur ainsi qu'entre la température à la source froide et celle

du rejet d'évaluer le rapport entre le débit utile à l'exhaure et celui du circuit chauffage. A titre d'exemple pour un COP estimé par exemple à 4 et une différence
$\Delta T_{ch} = Td - Tr$ entre le départ condenseur (ou chaudière à gaz) et le retour radiateur de 15 °C ainsi qu'une différence de température ΔT_{PAC} de 7°C avec une source froide à 11°C et un rejet à 4°C on a $Q_{PAC} = Q_{CH} \times (15/7) \times [(4 - 1)/4]$ ou $Q_{PAC} = 1{,}6\ Q_{CH}$
Pour une puissance thermique souhaitée au condenseur P_{COND} de 240 kW et un COP de 4, il est nécessaire de prélever dans l'environnement une puissance de
$P_{EVAP} = P_{COND} - P_{COND}/COP$. Soit dans le cas présent P_{EVAP} = 240 - 240/4 = 180 kW avec un apport de puissance électrique voisin de 60 kW des compresseurs qui voient l'énergie électrique d'entrainement des compresseurs transformée en énergie thermique lors de la compression du fluide caloporteur à l'état gazeux. On remarque que la chaleur spécifique de l'eau étant de 4,18 kJ/litre et °C, l'énergie Q restituée à la PAC dans un volume d'eau de 1 litre diminuant sa température de 11 à 4°C soit de 7 °C est Q = 1 x 4,18 x 7 = 29, 26 kJ. Pour développer une puissance de 180 kW froid à l'évaporateur ou ce qui revient au même de 180 kJ/seconde, il faut donc disposer dans ces conditions d'un débit de 180/29,26 = 6,1 litres/seconde ou (6,1 x 3600)/1000 = 22 m3/h (366 l/mn) nettement inférieur au 80 m3/h au-delà de laquelle une autorisation doit être demandée au BRGM (il suffit d'informer cet organisme). A noter que les débits requis par les constructeurs allemands de pompes à chaleur sont proches des valeurs théoriques ci-dessus.

La présence et qualité de l'eau pompée

L'étude du cycle de l'eau au-dessus de terres habitées montre que le volume d'eau douce stockée dans le sous-sol est environ 60 fois plus important que celui contenu dans les lacs et les rivières avec un flux de ruissellement souterrain proche celui de celui des rivières.

Il est plus commode de forer l'exhaure et le rejet de la source froide en pleine terre. En zone urbaine le problème est le plus souvent l'absence de terrain ou un parking qui occupe une partie importante de celui-ci laissant peu de place pour effectuer les forages. (Zone hachurée)
Un réseau d'alimentation en eau non potable des immeubles permettrait de résoudre ce problème et de simplifier la tâche du Maître d'œuvre



Le texte ci-contre extrait du livre « *La rivière et l'énergie* » du même auteur et édité en mai 2010 par Edilivre (Dépôt légal ISBN 978-2-8121-2211-8) est plus que rassurant sur la capacité du sous-sol de Boulogne Billancourt situé à proximité de la Seine d'assurer le besoin en eau.

[14] Boulogne Billancourt, se trouve par exemple à l'intérieur d'un méandre de la Seine qui semble idéalement situé dans la partie favorable du bassin. Ces informations sont corroborées par la visite d'un chantier Bouygues concernant l'installation d'un parking souterrain de 2400 m² sur plusieurs niveaux au lieu dit « *Square de Parchamps* ». L'ingénieur Bouygues en charge du chantier a fait observer que lors des travaux de consolidation, la société Solétanche a dû effectuer 4 forages à faible profondeur pour rabattre la nappe phréatique afin d'assurer l'injection de béton étanche séparant le parking de la nappe libre.
Avant l'injection, un débit total très important de l'ordre de 2000 m³/h a été nécessaire pour maintenir à sec le fond du parking situé à environ -12 m. (ce débit a été assuré par 4 pompes de 500 m³/h unitaire).
On ne peut que regretter qu'à l'occasion de telles réalisations, les municipalités ne pensent pas à laisser en place certains de ces forages pour utilisation ultérieure aux fins du chauffage des immeubles situés à proximité.

Dans le sous-sol des villes souvent traversées par la rivière, il n'y a généralement pas lieu d'être préoccupé par la présence de l'eau et c'est parfois sa qualité et non sa quantité qui doit retenir l'attention. Heureusement l'eau prélevée dans la nappe est généralement moins polluée que l'eau de la rivière.

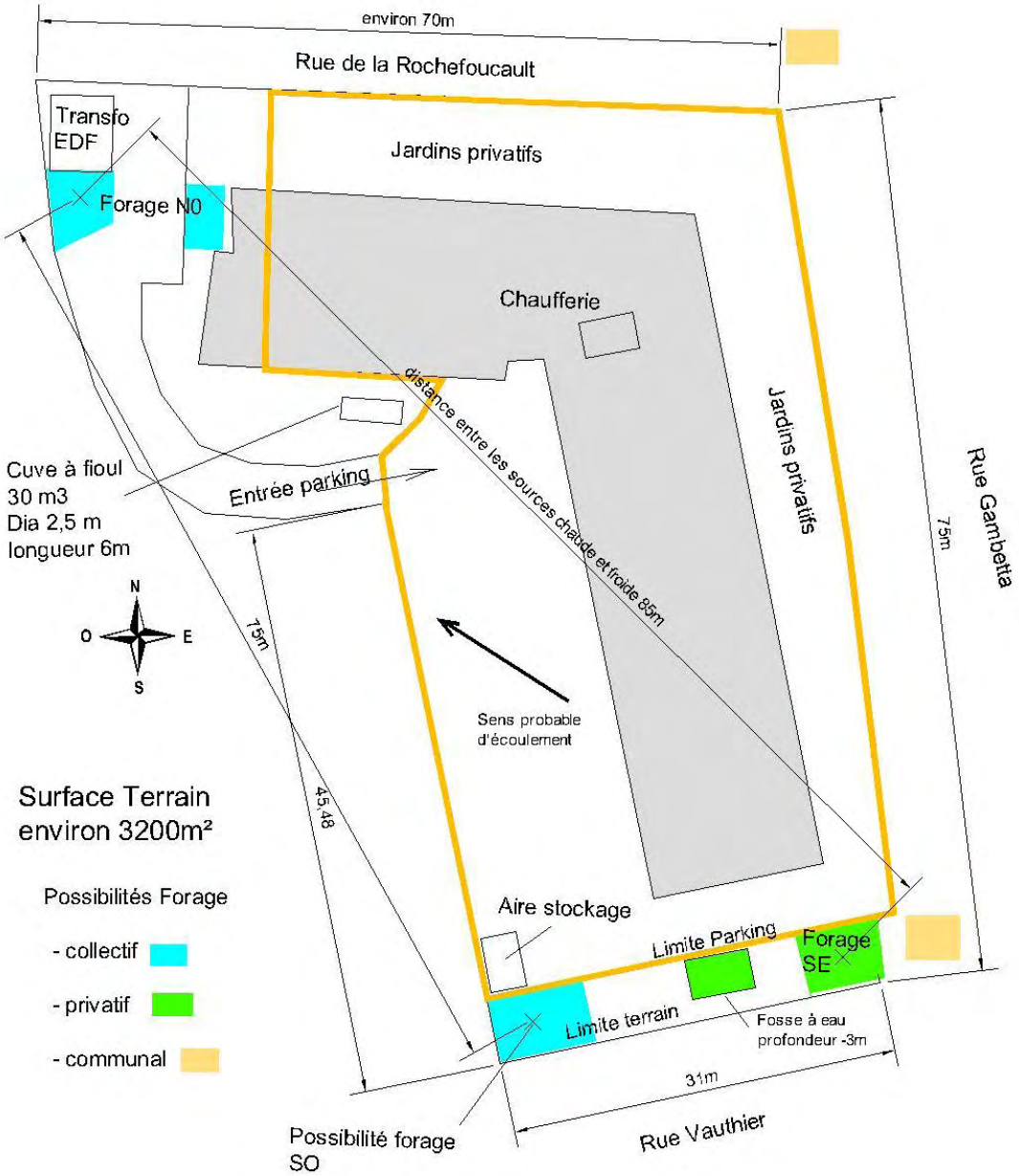


Figure 14 *La détermination du sens d'écoulement de la nappe libre fait partie de l'étude de faisabilité du projet. Afin de ne pas affecter les performances de la pompe à chaleur le rejet doit se situer en aval de l'exhaure. Il est parfois possible de trouver un compromis avec un rejet moins profond que l'exhaure de telle sorte que l'eau plus froide sortant du rejet ne se mélange pas avec l'eau de l'exhaure. La proximité d'un transformateur EDF par rapport aux compresseurs de la pompe à chaleur réduit les frais du raccordement électrique. Lorsque les compresseurs sont entrainés par des moteurs électriques asynchrones à vitesse constante, il est pour cette raison préférable de démarrer dans la mesure du possible ces moteurs en étoile-triangle afin de réduire le courant de démarrage. La formule* ***Pa*** *= (racine de 3) x* ***UI*** *cosφ permet de trouver l'intensité au démarrage au démarrage avec le raccordement étoile triangle dans le cas d'un réseau 230V/400V et un moteur de puissance* ***Pa*** *= 20 kW ayant un cosφ de 0,88*

I *=* ***Pa*** */ [(racine de 3) x* ***U*** *cosφ] = 20.000 / [1,732 x 400 x O,88] = 33 A*

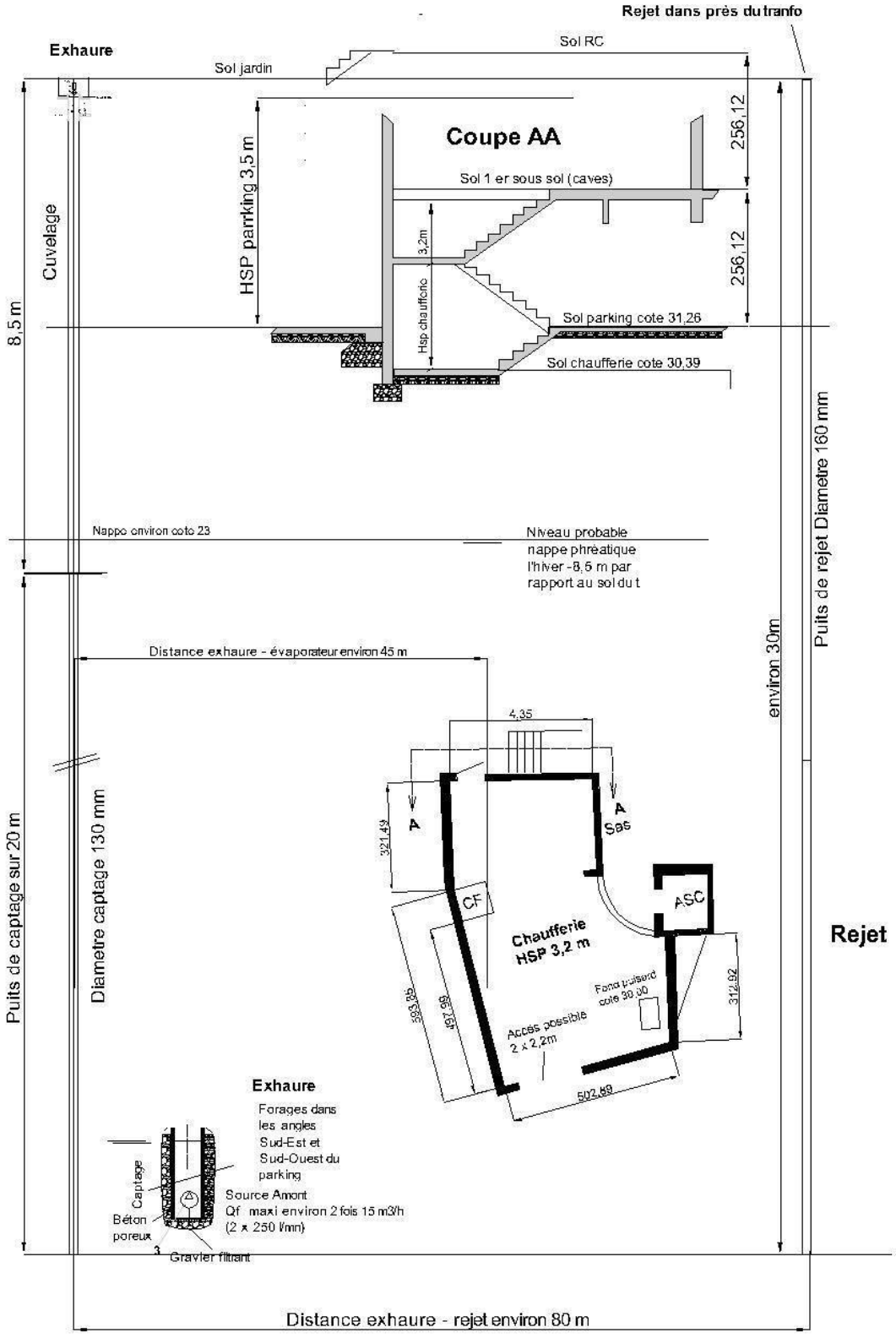


Figure 15 *La profondeur de forage de l'exhaure et du rejet sont prévues en utilisant au mieux l'épaisseur de l'aquifère. Soit environ 50m au lieu de 20m pour l'exhaure afin de profiter de toute son épaisseur et améliorer la pérennité d'approvisionnement en eau. La profondeur de rejet peut éventuellement être moindre afin de réduire les coûts du forage et éviter que l'eau froide du rejet ne vienne diminuer la température à l'exhaure et affecter les performances. Cette moindre profondeur pouvant aussi présenter un intérêt s'il s'avère difficile de prévoir le rejet en aval de l'exhaure du fait de la disposition des zones disponibles pour les forages.*

Au cœur de la pompe à chaleur

Un fluide caloporteur tel que le R134a (Tétrafluoroéthane) pourrait éventuellement être utilisé comme fluide caloporteur pour une pompe à chaleur de ce type. Composé de la classe des hydrofluorocarbures (HFC), il n'a pas d'impact sur la couche d'ozone (ODP=0).
Le débit $\boldsymbol{Q_f}$ du fluide caloporteur (exprimé en kg/s) ainsi que la chaleur latente de vaporisation de ce fluide au point d'ébullition C_f (exprimé) en kJ/kg est essentiel pour connaître la puissance récupérée à la source froide par la pompe à chaleur: $\boldsymbol{P} = \boldsymbol{C_f} \times \boldsymbol{Q_f}$ (en kW) 1)

Caractéristiques du fluide caloporteur R134a

Masse volumique en phase liquide	1200 kg par m^3
Capacité spécifique de la vapeur	0,84 kJ/kg et °K
Chaleur latente de vaporisation au point d'ébullition	216 kJ/kg*
Point d'ébullition	- 26,6°C
Température critique	101°C
Pression critique	40,6 bar

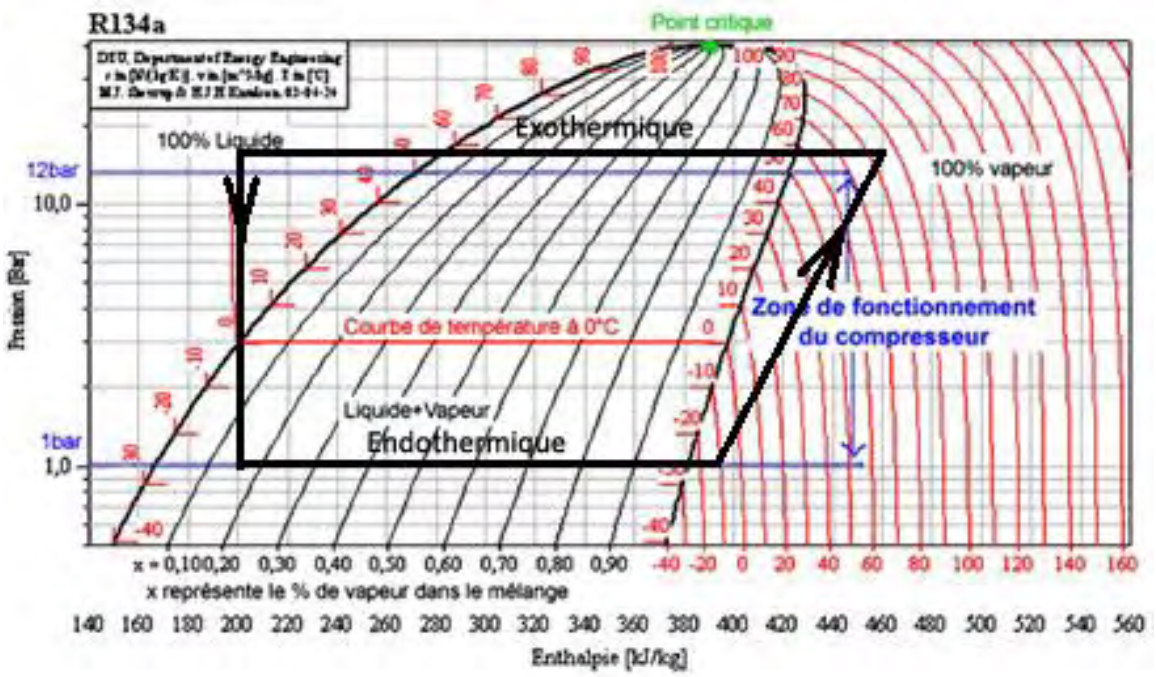


Figure 16 *Le fluide caloporteur R134a*

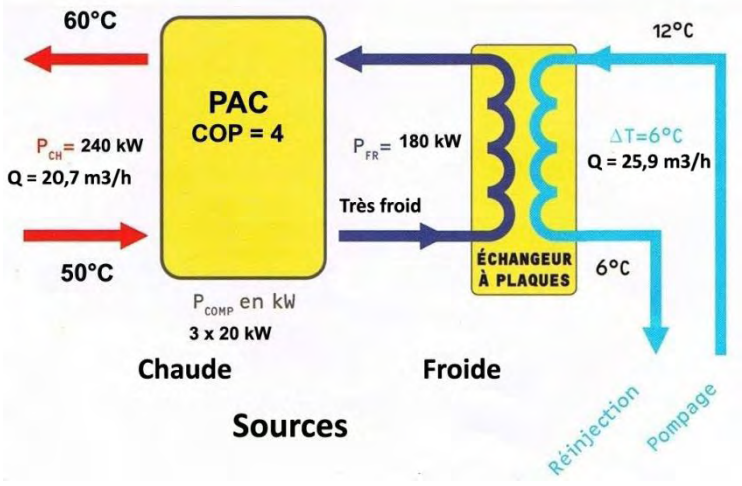


Figure 17 *Les débits d'eau indiqués aux sources chaude et froide d'eau sont des débits théoriques qui ne tiennent pas compte du rendement*

En rénovation, la différence de température sur la source chaude (Rouge) doit être mesurée au cas par cas au préalable.
60 - 50 = 10°C dans l'exemple

Explication valeurs numériques figure 17

Chaleur spécifique de l'eau 1 calorie (petite) par gramme et °C. Equivalent mécanique 4,18 joule
Un kWh c'est 1000 watt pendant 3600 secondes. Etant donné que un joule c'est un watt pendant une seconde on peut écrire que un kWh c'est 3 600 000 joules. *1 kWh est donc égal à 3600 kJ*
On peut retrouver aussi cette équivalence en constatant qu'il y a 3600 secondes dans une heure et que 1 kJ/s correspond à une puissance de 1 kW

Un m³ d'eau avec une densité de 1 c'est 1000 kg d'eau ou 1 000 000 grammes
Pour élever 1 m³ d'eau de un °C il faut donc 1 000 000 calories soit compte tenu de l'équivalent mécanique de la calorie de 4,18 joules : 4 180 000 joules ou 4 180 kJ.
On peut donc écrire qu'il faut 4 180 / 3600 = *1,16 kWh pour élever un m³ de un °C*
Soit la formule qui donne le débit utile ***Q*** en m³ /h pour transmettre une puissance ***P*** kW avec de l'eau si la différence de température est de ***ΔT*** en °C

$$Q = P / (1{,}16\ \Delta T)$$

Applications numériques

Puissance utile à la source chaude 240 kW
Puissance utile à la source froide avec COP de 4 : 180 kW
Apport électrique 3 x 20 kW = 60 kW
Débit d'eau utile à la source chaude avec ***ΔT*** = 10°C : ***Q*** = 240 / 11,6 = 20,7 m³ /h
Débit d'eau utile à la source froide avec ***ΔT*** = 6°C : ***Q*** = 180 / 6,96 = 25,9 m³ /h

Chaufferie hybride avec assemblage en deux étapes successives (Voir page 444)
La moitié de la surface en chaufferie reste disponible pour l'implantation ultérieur de la PAC
- à l'extrême droite : les piquages pour la future PAC aquathermique avec traitement du condensat.
- à droite : les 2 chaudières gaz à condensation jumelés de 325 kW avec leur filtre à air et leur régulation
- à gauche : la génération d'eau chaude sanitaire (Echangeur à plaque noir)
- à l'extrême gauche : l'armoire de contrôle. La disposition en chaufferie laisse la moitié de la surface disponible pour implantation ultérieure du complément EnR (Voir schéma page 344)
-entre l'armoire de contrôle et la génération ECS : le départ vers le circuit chauffage

Estimation partie gaz *et Planning (Etape 1)*

Année	Désignation des travaux	Prix € TTC
2013	Mise en place sous-ensemble désembouage	13 000 €
2014	Montage valves d'équilibrage compensé en pression	25 000 €
2014 de avril à septembre	Etudes schéma hydraulique et plan d'implantation	210 000 € ** Montant incluant la fourniture des deux chaudières à condensation de 327 kW unitaire pour un montant total matériel de 45 000 € TVA 5,5% incluse
	Mesure températures	
	Dépose 1ère chaudière fioul Chappée	
	Maçonnerie	
	Alimentation gaz (GDF parfois en retard)	
	Mise en place du dispositif de ventilation forcée (gaine pompier)	
	Mise en place des deux chaudières à condensation	
	Raccordement hydraulique chaudières	
	Raccordement des nouvelles pompes circulation Salmson ou Grundfos et mise en place des électrovalves	
	Raccordements hydrauliques	
	Electricité mise en place armoire de régulation	
	Calorifugeage et mise en eau	
	Fumisterie par Poujoulat (tubage inox)	
	Conformité sécurité (porte d'accès)	
	Flocage chaufferie* (protection thermique)	
	Cuve FOD vidange nettoyage	
	Cuve FOD remplissage tout venant	
	Budget total global des travaux avec 2 chaudières De Dietrich à condensation de 320 kW + interface EnR	
2016	Mise en place option EnR (Sources chaude et froide)	Voir page suivante

*La mousse projetée en polyuréthane est à éviter. C'est un bon isolant thermique mais ce matériau inflammable dégage lors de sa combustion de nombreux gaz mortels, tels le cyanure d'hydrogène et le monoxyde de carbone qui ne sont autres que les gaz utilisées durant la Seconde Guerre mondiale par le régime nazi : le *Zyklon B* (mélange de sulfate de calcium et d'*acide cyanhydrique.*

** Voir *http://www.infoenergie.eu/riv+ener/complements/point12.pdf* pour détails

Contrat d'entretien

Il existe de nombreux types de contrat nommés **P1, P2, P3, P4,** dont le prix **P** change suivant le service rendu. Le contrat **P1** concerne la fourniture de l'énergie seule (fioul, gaz, électricité) Le contrat d'entretien **P2** assure la maintenance préventive et curative (Mise en route arrêt, réglages, contrôle de la combustion, traitement des fluides avec fourniture des produits associés à ce traitement, ramonage. Le contrat **P3** comprend en plus de ce qui est compris dans **P2** le remplacement des pièces défectueuses et leur montage. Le contrat **P4** peut même comprendre le financement de toute l'installation ainsi que les combustibles. C'est dans ce cas le prestataire qui installe la chaufferie qui la finance en se faisant rembourser par le syndic sur appel de fonds à la copropriété.

Estimation complément EnR *(Etape 2)*

Complément constitué par une PAC aquathermique en relève.

1) *Prestations intellectuelles pour sources chaude et froide*

Comprenant étude de faisabilité, dossier de déclaration,
Maîtrise d'œuvre, test hydrogéologique …… 20 000€

2) *Le forage*

- Forage seul (hors équipement et fournitures électriques) 150 000 €
  estimé pour 30 m à 1500€/ ml (fourchette maxi 800 à 2000 €/ ml)
  Comprenant- Equipements pour pompe immergée double corps
  de 2 x 15 m3/h ou 3 x 10 m3/h
  La liaison tuyauterie 30 000 €

3) Les équipements de surface de la PAC

- Pour 250 kW puissance thermique maximum
  estimation fourniture, pose et raccordement modem inclus 90 000 €
  Software, circuit de visualisation, modem, raccordements
  Mise en route avec optimisation COP 10 jours à 800 €/j 8 000 €

4) Le ballon du circuit chauffage

Ballon jugé inutile avec la variation de débit du fluide caloporteur --

Total prévisionnel provisoire chaufferie partie PAC 298 000 €

Prix budget 300 000 €

5) Matériels interface circuit mixte

Interface hydraulique tuyauterie en valve compris dans le poste gaz

Montant global chaufferie hybride

Partie GAZ	210 000 €
Prix budget complément EnR	300 000 €
Total chaufferie hybride	510 000 €

Les frais d'entretien hors électricité et gaz

Partie gaz contrat P2 3000 € /an

Complément EnR (*selon le BRGM)*
Contrat de maintenance de la *source froide*
Comprenant 2 visites annuelles des deux puits avec rapport 2000 €/an
Contrat de maintenance de la source chaude pompe à chaleur
de 200 à 400 kW…….. 3000 €/an
Ajouter à ces frais les opérations exceptionnelles de maintenance des deux puits tous les 10 à 15 ans avec détartrage éventuels et examen endoscopiques par vidéo avec éventuellement inversion circuit pour décolmatage crépine

Nota: Les prix indiqués par l'Ademe (80 à 160 € / m² habitable) pour l'implantation d'une PAC sur eau de nappe semblent élevés compte tenu de l'effort de standardisation des constructeurs. Le coût du forage étant réparti sur 68 copropriétaires, il semble raisonnable de valider 100 € / m² proche de la valeur basse de 80 € / m². Cela conduit en effet à un montant prévisionnel de 4700 * 100 = 470 000 € pour 4700 m² habitable

Option PAC à absorption

Alors que les PAC à compresseur type *eau eau* bénéficient d'un COP de 4 voire 7 après optimisation du modem les PAC à *absorption* ont, avec un COP voisin de 2, des performances nettement inférieures (Elles prélèvent dans l'environnement sensiblement autant d'énergie renouvelable qu'elles consomment d'énergie primaire) Cette énergie primaire est généralement le gaz et la chaufferie reste totalement dépendante de ce fluide ce qui n'est pas le cas de la chaufferie hybride que l'on vient d'étudier. Lorsque l'hiver n'est pas rigoureux il n'est cependant pas exclus de faire fonctionner la chaufferie hybride en substitution de chaudière à gaz une fois l'isolation à minima parachevée. Dans ce cas la consommation en gaz est nulle la chaudière n'étant là qu'en secours.

Ces raisons font que la PAC à *absorption* ne devrait pas être pas appelée à un grand avenir son maintien sur le marché étant surtout conditionné par le lobbie pétrolier. Une autre raison joue en sa défaveur : Elle est le plus souvent du type *air eau* solution obligeant à loger les évaporateurs échangeant l'énergie avec l'air par nature plus bruyant en toiture en condamnant du même coup les possibilités de surélévation du bâtiment d'un étage (Voir page 444). Même les PAC à compression *air eau* en relève au rendement modeste ont un COP sensiblement amélioré par rapport aux PAC à *absorption*. Quant aux PAC à compression avec le sol dénommés PAC sur champs de sonde leur COP minimum voisin de 3 peut être valorisée par la présence d'une nappe libre du fait de la présence d'eau dans le sous-sol améliorant les échanges thermiques à la source froide (Voir page 317)

- PAC à compression COP réel de 5 à 4 avec l'eau
- PAC à compression COP réel de 4 à 3 avec l'air
- PAC à absorption COP réel environ 2 avec l'air

L'intérêt de la chaufferie hybride est aussi de diversifier les fluides, l'énergie apportée au système en mode *EnR* étant l'électricité et non plus le GAZ. Cerise sur le gâteau pour le « cas pratique » étudié, le transformateur EDF se trouve être sur le terrain sur lequel est implanté l'immeuble. Le responsable du BE en charge de l'audit doit se sentir libre de prendre contact avec des sociétés telles que *DAIKIN, CIAT* ou *WATERKOTTE* sociétés directement concernées par l'étape 2 constitué par le complément ENR. Dans le cas d'une rénovation du fioul vers gaz et lorsque l'espace disponible en sous-sol le permet il est souhaitable de prévoir l'avenir et de ménager un espace libre suffisant à l'implantation du complément EnR