

La substitution des chaudières par des systèmes thermodynamiques

1.1 - Le Parc réhabilitable

1.1.1 - Contexte et caractéristiques principales d'une PAC conçue pour la réhabilitation

Le marché du chauffage est dynamisé par les enjeux environnementaux qui se traduisent par une volonté de renforcer la maîtrise des consommations d'énergie : le Plan Climat [Plan, 2004], la loi d'orientation sur l'énergie [Lois, 2005], la transposition de la directive européenne sur l'efficacité énergétique des bâtiments [Directive, 2002], la RT 2005 [RT, 2005] fixent des objectifs de diminution de la consommation d'énergie pour les bâtiments ... Les équipements doivent désormais présenter de hautes performances et les énergies renouvelables se développer.

Le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire constituent plus de 80 % [DGEMP, 2006] de la consommation énergétique du secteur résidentiel en France. Par conséquent, l'amélioration de l'efficacité énergétique de ces équipements est devenue une priorité.

Depuis vingt ans, les chaudières au fioul ou au gaz ont été l'objet d'importants progrès. Elles sont devenues plus efficaces, en particulier les chaudières à gaz à haut rendement (basse température et à condensation). Mais, en France, les systèmes thermodynamiques à moto-compresseur électrique, utilisés pour le chauffage (PAC), restent les plus prometteurs du point de vue économique, énergétique et environnemental. Cela est principalement dû à la forte hausse et à l'instabilité des prix du gaz et du fioul au cours de ces dernières années. Les émissions de CO₂ des systèmes de production d'électricité varient heure par heure, et en particulier pendant la saison de chauffage. A la base nucléaire, s'ajoute le fonctionnement des centrales hydroélectriques et des centrales à combustible, charbon et gaz. La teneur en CO₂ du kWh varie donc fortement au cours de la saison de chauffe en fonction de la température extérieure. Pour limiter la complexité, EDF et l'ADEME dans un document commun [ADEME, 2005], ont décidé d'attribuer une valeur forfaitaire de 180 g de CO₂ par kWh pour le chauffage des bâtiments d'origine électrique. Cette valeur sera utilisée pour évaluer les gains en émissions de CO₂ des PAC se substituant aux chaudières.

Pour qu'une PAC puisse se substituer à une chaudière d'une manière efficace, elle doit assurer les mêmes fonctions tout en restant performante, à savoir :

- la production de chauffage durant la saison de chauffe,
- la production d'eau chaude sanitaire tout au long de l'année.

La majeure partie de la croissance du marché des pompes à chaleur s'effectue sur le parc des maisons individuelles neuves avec des systèmes de chauffage à basses températures par le plancher (~35 °C). Cependant, le marché potentiel principal est celui des bâtiments existants avec des systèmes de chauffage central (hydrauliques) à hautes températures.

Lors de la réhabilitation d'un système de chauffage utilisant une chaudière fioul et éventuellement gaz, la nouvelle installation utilisant une pompe à chaleur doit être capable de fournir la totalité des besoins de chauffage même pour la température extérieure la plus basse. Pour un système de chauffage domestique centralisé, la nature des types de

radiateurs et surtout le niveau d'isolation de la maison vont impliquer des niveaux de températures de sortie de la pompe à chaleur tout à fait différents. Pour une PAC conçue pour la réhabilitation, il est apparu souhaitable de ne pas retenir comme cahier des charges uniquement le cas le plus défavorable, à savoir une maison mal isolée (coefficient volumique de déperditions $G > 1,2 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$), fonctionnant avec un réseau de radiateurs nécessitant un grand écart de températures et, imposant par là même une condensation de l'ordre de $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Il est plus judicieux d'associer des travaux minimum de réhabilitation de l'enveloppe du bâtiment (isolation du toit, isolation par l'intérieur, double vitrage, etc.) que de substituer simplement la PAC à la chaudière existante.

L'enquête menée par le COSTIC sur le dimensionnement des émetteurs [COSTIC, 1999] et les relevés effectués, aussi par le COSTIC [COSTIC, 1985], sur la régulation de plusieurs installations montrent que la pratique a plutôt été de surdimensionner les émetteurs et que les températures réelles de fourniture d'eau de chauffage sont très souvent inférieures aux conditions de calcul traditionnelles (entre $80 \text{ }^\circ\text{C}$ et $90 \text{ }^\circ\text{C}$).

Les valeurs déclarées dans une étude récente [COSTIC, 2005], ayant pour objectif d'établir une typologie des installations existantes de chauffage à eau chaude fonctionnant au gaz et au fioul, sont de l'ordre de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ à $70 \text{ }^\circ\text{C}$ les jours les plus froids ($60 \text{ }^\circ\text{C}$ lorsque l'isolation de la maison a été renforcée, $0,9 < G < 1,1 \text{ W}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$).

Il a donc été choisi de définir une température maximale de fourniture d'eau de chauffage de $65 \text{ }^\circ\text{C}$ pour le jour le plus froid.

1.1.2 - Les objectifs

Les objectifs de ce chapitre sont les suivants.

- Détailler les principaux facteurs favorisant le remplacement des chaudières par des systèmes de pompes à chaleur en France. Ces données sont d'une importance décisive quant au choix du mode de chauffage, et ce, à plusieurs niveaux : environnemental, économique et énergétique.
- Analyser les limites de fonctionnement des PAC air/eau usuelles utilisées pour le chauffage et les différentes contraintes techniques liées au remplacement des chaudières anciennes. L'adaptation du système PAC au réseau de chauffage hydraulique est aussi étudiée.
- Evaluer les intérêts en terme d'émissions de CO_2 évitées pour le secteur résidentiel en France.

1.1.3 - Le parc

Afin de mieux comprendre les enjeux, cette section dresse :

- la consommation d'énergie du secteur résidentiel par usage et par énergie [DGEMP, 2006].
- le nombre de logements existants équipés d'un système de chauffage résidentiel en France par type de logement et par type de système [MSI, 2003].

➤ La consommation d'énergie du secteur résidentiel

Le chauffage des bâtiments est nécessaire dans tous les pays européens, et les systèmes de chauffage hydraulique dominant même dans les pays qui exigent également le refroidissement.

En France, la consommation d'énergie due au chauffage s'élève à **412 TWh**, soit 75 % de la consommation du secteur résidentiel (cf. figure 1.1). Pour cet usage, le fioul et le gaz se partagent **68 %** de la consommation totale (cf. figure 1.2).

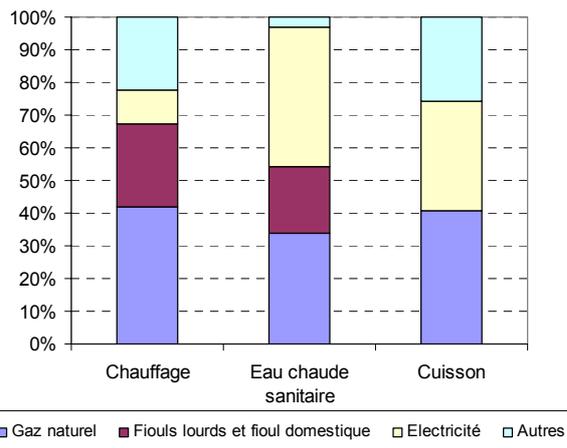
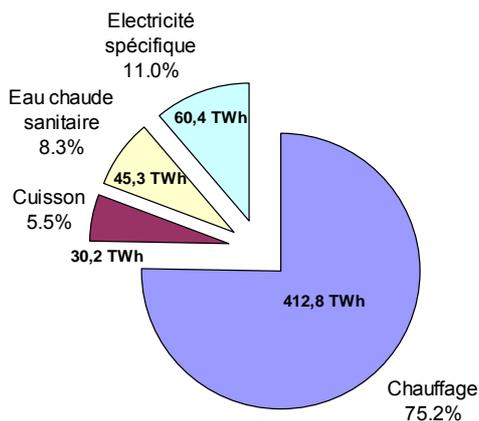


Figure 1.1- Les consommations d'énergie du secteur résidentiel par usage (année 2002) [DGEMP, 2006]

Figure 1.2- La part des consommations d'énergie du secteur résidentiel par énergie (année 2002) [DGEMP, 2006]

Quant à la production d'eau chaude sanitaire (ECS), elle présente aussi une part non négligeable de la consommation totale. Pour cet usage, l'électricité est l'énergie la plus utilisée.

➤ Le nombre des logements existants

Un bâtiment, en France, a généralement une vie supérieure à 100 ans. Les vieux bâtiments (~15 millions de logements) occupent donc une place plus importante que ceux récemment construits. Leur demande d'énergie est dominante. Dans ces bâtiments existants, les systèmes de chauffage sont généralement des systèmes vieillissants, avec des performances énergétiques et environnementales faibles.

Selon MSI, en 2002, 57 % des logements existants en France ont un système de chauffage central, 27 % sont chauffés par l'électricité. Le reste est soit sans chauffage, soit chauffé par le réseau urbain (cf. tableau 1.1).

Tableau 1.1 - Nombre de logements existants équipés d'un système de chauffage résidentiel en France par type de logement et par type de système [MSI, 2003]

Type de système	Logements Existants (x1000)		
	1999	2002	Prévisions 2008
1 - Chauffage Central	14 100	15 217	17 320
1.a - Logements Individuels	7 755	8 430	9 671
1.b - Logements Collectifs	6 345	6 787	7 649
-au Gaz	8 157	9 176	11 060
-au Fioul	4 553	4 639	4 776
-au Combustible	807	704	572
-au Propane	583	698	912
2 - Chauffage Electrique	6 625	7 164	8 350
2.a - Logements Individuels	3 796	4 095	4 753
2.b - Logements Collectifs	2 829	3 069	3 597
3 - Sans chauffage électrique ou chauffage central	3 138	3 008	2 778
4 - Chauffage urbain	1 129	1 119	1 107
Total	24 992	26 508	29 555

Pour les systèmes de chauffage central, le gaz vient en tête avec 60 % du nombre des logements existants, suivi par le fioul avec 30 %. Pour ce type de système, la part de l'individuel est de 55 % contre 45 % pour le collectif.

Dans la première phase de cette étude, l'attention est centrée sur les logements existants équipés d'un système de chauffage central à eau chaude. Ce parc réhabilitable est suffisamment grand. En effet, l'âge moyen de remplacement des chaudières est de 20 ans. En 1999, 34,6 % des chaudières avaient 15 ans ou plus (soit 22 ans ou plus en 2006). Pour le parc actuel, le nombre de chaudières anciennes remplaçables est estimé à 4 millions d'unités (âge > 20 ans) [GFCC, 2002].

Les installations au chauffage électrique peuvent être aussi substituées. Cette réhabilitation est toutefois plus importante, car il n'est pas facile de distribuer la chaleur quand la maison n'a aucun système de distribution de chaleur.

1.2 - Les PAC air/eau face aux chaudières à gaz et au fioul

La technologie de pompe à chaleur trouve de larges applications dans l'industrie, les bâtiments commerciaux et les propriétés résidentielles. Les pompes à chaleur pour le chauffage sont plus réparties en Europe du Nord et en Europe Centrale [EHPA, 2004], bien que le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude sanitaire soient nécessaires dans tous les pays européens.

La pompe à chaleur la plus vendue est le modèle air/eau, non pas en raison de ses performances, mais de son prix. C'est souvent une question de prix à l'installation qui joue en faveur de la pompe à chaleur air/eau.

De plus, l'air est disponible partout et à volonté. Dans les villes et pour la réhabilitation, les PAC air/eau sont les plus réalistes. Les possibilités de recourir à une source géothermique sont restreintes. Enfin, l'installation d'une pompe à chaleur air/eau ne nécessite pas d'autorisation.

Avant d'analyser les différents facteurs favorisant le remplacement des chaudières par des PAC air/eau, nous allons rappeler les principes de base d'une pompe à chaleur.

1.2.1 - Les principes de base d'un système thermodynamique

Une **pompe à chaleur** est un dispositif thermodynamique permettant de transférer la chaleur du milieu le plus froid (et donc le refroidir encore) vers le milieu le plus chaud (et donc le chauffer), alors que spontanément la chaleur se diffuse du plus chaud vers le plus froid jusqu'à égalité des températures. Mais le terme de « pompe à chaleur » (PAC) s'est surtout diffusé pour désigner des systèmes de chauffage domestique, popularisés avec la forte hausse du prix des combustibles dans les années 1970.

1.2.1.1 - La production de chauffage

La figure 1.3 présente le schéma de principe, ainsi que les principaux organes d'un système thermodynamique qui sont : l'évaporateur, le condenseur, le compresseur et le détendeur.

La chaleur de l'air est prélevée par évaporation du fluide frigorigène, l'évaporation étant endothermique. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa pression et sa température. C'est au niveau du condenseur que le fluide frigorigène transmet sa chaleur au circuit hydraulique du système de chauffage, la condensation étant exothermique.

Le détendeur réduit la pression du fluide frigorigère. La température de ce dernier s'abaisse fortement, le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur de l'environnement et le cycle peut recommencer.

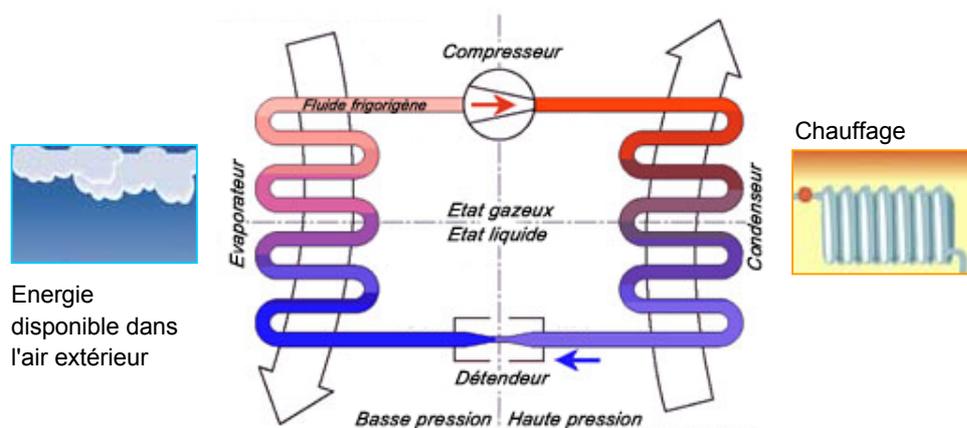


Figure 1.3- Production de chauffage par une pompe à chaleur

1.2.1.2 - L'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique d'une PAC est définie par le rapport de ce qui est « utile »; la chaleur reçue, sur ce qui est coûteux; le travail fourni à la PAC.

Plus spécifiquement, les organismes de certification de PAC mesurent le rapport entre la puissance thermique de la machine et sa consommation électrique incluant les consommations des auxiliaires : ventilateurs, pompe, veille. On lui donne par convention le nom de **coefficient de performance** ou **COP**.

$$\text{COP}_{\text{chaud}} = \frac{\dot{Q}_{\text{cond}}}{\dot{W}_{\text{comp}} + \dot{W}_{\text{aux}}} \quad [1.1]$$

avec :

\dot{Q}_{cond} , la puissance thermique au condenseur

\dot{W}_{comp} , la puissance fournie au compresseur

\dot{W}_{aux} , la puissance fournie aux auxiliaires (ventilateur, pompe ...)

Les schémas suivant permettent de suivre les différentes étapes du cycle thermodynamique.

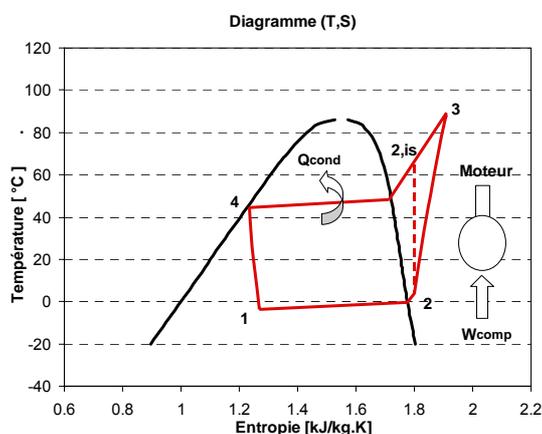


Figure 1.4- Cycle thermodynamique, diagramme (T,S) - Fluide R-407C

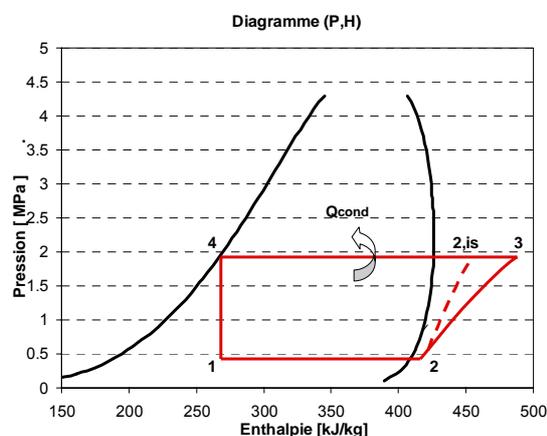


Figure 1.5- Cycle thermodynamique, diagramme (P,H) - Fluide R-407C

Le compresseur est le composant principal du cycle thermodynamique. La dégradation des performances est principalement liée à la phase de compression. Afin d'évaluer les pertes par rapport à une compression idéale, différents rendements sont introduits.

- Le rendement volumétrique

$$\eta_{\text{vol}} = \frac{\dot{m}}{\dot{V}_{\text{bal}} \rho_2} \quad [1.2]$$

avec \dot{m} le débit aspiré, \dot{V}_{bal} le débit volume balayé et ρ_2 la masse volumique du fluide à l'aspiration du compresseur.

- Le rendement isentropique

$$\eta_{\text{is}} = \frac{(h_{2,\text{is}} - h_2)}{(h_3 - h_2)} \quad [1.3]$$

incluant le préchauffage dû aux pertes de transmission avec h_2 l'enthalpie à l'entrée du compresseur, h_3 l'enthalpie au refoulement du compresseur pour une compression réelle et $h_{2,\text{is}}$ l'enthalpie au refoulement du compresseur pour une compression isentropique.

- Le rendement global ou effectif

$$\eta_g = \frac{\dot{m} \cdot (h_{2,\text{is}} - h_2)}{\dot{W}_{\text{comp}}} \quad [1.4]$$

caractérisant les pertes par rapport à la compression isentropique.

1.2.2 - Les principaux facteurs favorisant la substitution des chaudières

Les prix de l'énergie et le « mix » d'énergie du pays affectent les conditions pour que les pompes à chaleur soient compétitives ou non vis-à-vis d'autres solutions de remplacement.

Les divers types d'incitations financières, les réglementations concernant l'efficacité énergétique sont des instruments importants pour la croissance du marché des pompes à chaleur, en particulier lorsque ces incitations financières (crédits d'impôts) requièrent un niveau minimum de performance énergétique.

En France, le remplacement des chaudières par des PAC air/eau présente deux avantages majeurs :

- le mix de production d'électricité pendant la période de chauffe correspond à des émissions relativement faibles, par rapport à la moyenne européenne, de 180 g de CO₂/kWh [ADEME, 2005], ce qui entraîne une réduction significative des émissions de CO₂ par rapport aux chaudières ;
- d'autre part, les prix du fioul et du gaz sont en forte croissance, ce qui favorise l'utilisation des énergies renouvelables.

De plus, les nouveaux crédits d'impôts s'élevant à 40 % encouragent l'installation de PAC.

1.2.2.1 - Le mix d'énergie

Les pompes à chaleur réduisent l'utilisation globale d'énergie, mais la réduction des émissions de CO₂ dépend de la façon dont l'électricité est produite et des types de sources de chaleur utilisées. La moitié de toute la production d'électricité dans l'UE est basée sur les combustibles fossiles, un tiers sur l'énergie nucléaire et environ 15 % sur la puissance hydraulique.

La production d'électricité par les filières nucléaire et hydraulique n'est quasiment pas émettrice de CO₂ (cf. tableau 1.2). En France, la part du nucléaire dans la production

d'électricité est en croissance depuis 1970. La valeur moyenne observée sur les années 2004 et 2005 est de 78 % de la totalité de la production électrique avec 11 % pour les combustibles et 11 % pour l'hydraulique [IEA, 2006]. De ce fait, surtout en France, le remplacement des chaudières par des installations de PAC présente un gain substantiel en terme des émissions de CO₂ évitées.

Dans l'étude intitulée « le contenu CO₂ du kWh par usage en France » [ADEME, 2005], des valeurs moyennes du contenu de CO₂ ont été attribuées à chaque usage. Pour le chauffage, cette valeur est de 180 g CO₂ / kWh électrique. Elle est de 40 g CO₂ / kWh électrique pour la production d'eau chaude sanitaire.

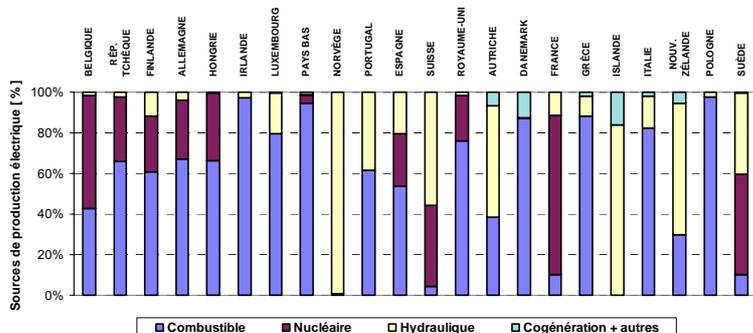


Figure 1.6- La production d'électricité par filière en Europe [IEA, 2004]

Tableau 1.2 - g de CO₂ sur le cycle de vie par kWh produit [Syndicat, 2003]

Source	
Solaire thermique	1,5
Gaz cogénération	250 à 380
Cycle combiné gaz	400
Nucléaire	5 à 16
Hydraulique	0 à 5
Eolien	2 à 4
Biomasse	?
Solaire photovoltaïque	5
Centrales thermiques classiques	800 à 1000

D'une manière simplifiée, on peut attribuer pour chaque pays une valeur minimale de COP pour qu'une PAC soit compétitive comparativement à d'autres solutions de chauffage fioul ou gaz. Cette valeur est exprimée par :

$$Em_{indirect_{PAC}} + Em_{direct_{PAC}} < Em_{Chaudière} \quad [1.5]$$

Pour la production d'1 kWh chauffage, l'expression (1.5) donne :

$$\frac{Mix_{pays}}{COP_{PAC}} + \alpha_{pays} < \frac{Cst}{Rend} \quad [1.6]$$

soit :

$$COP_{PAC} > \frac{Mix_{pays}}{\left(\frac{Cst}{Rend} - \alpha_{pays} \right)} \quad [1.7]$$

avec :

Rend = rendement de la chaudière

Cst_{fioul} = 310 g CO₂/kWh , Cst_{gaz} = 280 g CO₂/kWh

α_{pays} = contribution des émissions directes en fonction de la puissance installée pour 1 kWh chauffage

En France, même le chauffage électrique (COP=1) émet moins de CO₂ tandis qu'en Pologne, en Irlande et aux Pays Bas, par exemple, un COP supérieur à 3 est obligatoire (le Mix de ces pays est proche de 800 g CO₂ / kWh).

1.2.2.2 - Le prix de l'électricité, du gaz et du fioul

La compétitivité des pompes à chaleur électriques dépend du prix de l'électricité en comparaison à d'autres sources d'énergie telles que le gaz et le fioul.

Historiquement, les prix du gaz et du fioul étaient bas, ce qui n'a pas encouragé les améliorations de l'efficacité de l'utilisation d'énergie. Cependant, les tendances au cours des cinq dernières années prouvent que les prix du gaz et du fioul ont augmenté (cf. figure 1.7).

Dans les logements neufs, la demande des systèmes de chauffage par PAC est en croissance continue. Les ventes sur quelques marchés ont augmenté considérablement. Un exemple est le marché français qui s'est développé fortement depuis 1997. Une augmentation de 26 % sur les ventes est observée sur l'année 2004 (17 300 unités) par rapport à 2003 (13 700 unités) [EHPA, 2004].

La figure 1.8 permet de justifier le remplacement des systèmes de chauffage vieillissants au fioul et au gaz par des systèmes thermodynamiques. Les prix du gaz et du fioul sont convertis en équivalent 1 MWh de chauffage.

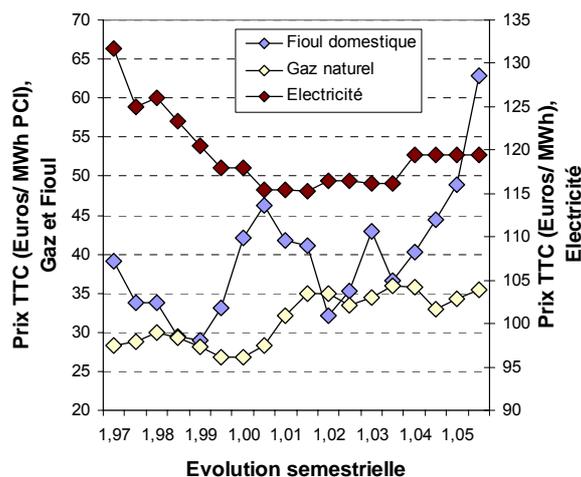


Figure 1.7- Evolution des prix des énergies utilisées pour le chauffage [Eurostat, 2006]

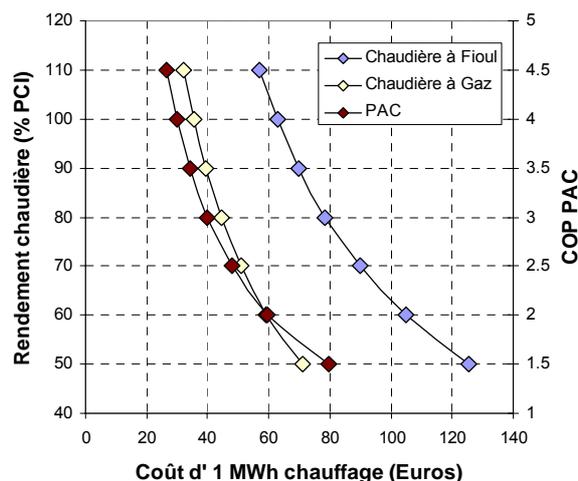


Figure 1.8- Rendement du système en fonction du coût d'exploitation pour 1 MWh chauffage (prix au deuxième semestre 2005)

Electricité, consommation annuelle : 3 500 kWh
 Gaz naturel, consommation annuelle : 83,70 GJ
 Fioul domestique, consommation annuelle : 2 000 à 5 000 litres

Pour les chaudières anciennes (rendement ~60 %), le gain est substantiel. Si on place le COP entre 2,5 et 3,5, la PAC serait aussi rentable qu'une chaudière à gaz d'une technologie récente. Quant au fioul, il resterait beaucoup plus coûteux.

1.2.2.3 - Les crédits d'impôts

La loi de finances pour 2005 [Industrie, 2005] vient modifier le code général des impôts et institue un crédit d'impôts sur le revenu au titre de l'habitation principale du contribuable située en France. Le crédit d'impôts s'applique aux dépenses des équipements performants, économes en énergie, afférentes à un immeuble achevé depuis plus de deux ans, effectuées entre le 1^{er} janvier 2005 et le 31 décembre 2009.

Pour les équipements de production d'énergie utilisant une source d'énergie renouvelable ou de pompes à chaleur dont la finalité est la production de chaleur, le crédit d'impôts est de 40 % du montant des équipements.

L'arrêté du 9 février 2005 et du 12 décembre 2005 [Leg, 2005] donne les caractéristiques techniques et les critères de performances minimales requis pour l'application du crédit d'impôt. Pour les pompes à chaleur air/eau, le coefficient de performance doit être **supérieur ou égal à 3** pour une température d'évaporation de + 7 °C selon la norme d'essai 14511-2.

1.3 - Les PAC air/eau en substitution des chaudières

Afin d'étudier le développement du marché des pompes à chaleur conçues pour le marché de la rénovation, il faut définir le contexte général, tels que la distribution des conditions climatiques et les températures du réseau hydraulique.

La température d'évaporation est fonction des conditions climatiques et la température de condensation est imposée par les conditions de fourniture d'eau de chauffage. De là, une compréhension du réseau hydraulique et de la fourniture d'eau de chauffage en fonction du corps de chauffe et des conditions extérieures est nécessaire pour intégrer efficacement le système thermodynamique dans la boucle de chauffage.

1.3.1 - Les conditions de fonctionnement et le contexte général

1.3.1.1 - Le climat en France : les conditions à l'évaporateur

Le climat affecte la demande de chauffage, le besoin de rafraîchissement et les conditions d'utilisation des divers types de sources de chaleur. La partie du territoire de climat méditerranéen favorise l'utilisation des pompes à chaleur air/eau pour le chauffage. Plus le climat hivernal est clément, plus le COP du système PAC est élevé.

➤ La saison de chauffe

La saison de chauffe peut être définie par les semaines ayant une température moyenne inférieure à la température de non chauffage de 15 °C. La température de confort à l'intérieur du local est généralement fixée à 20 °C. On considère que l'apport solaire gratuit peut compenser les déperditions entre la limite de chauffage (15 °C) et la température des locaux (20 °C).

A l'aide de fichiers météorologiques donnant la température extérieure heure par heure sur l'année dans les villes de Nancy, Trappes et Nice, il est possible de déterminer la saison de chauffe correspondante à chacune de ces régions (ces trois zones climatiques représentent un panel des climats français).

La figure 1.9 montre les températures moyennes hebdomadaires des différentes régions citées. Les saisons de chauffe pour les différentes zones climatiques sont ainsi estimées.

- Pour Nancy :
5 904 h du 24/09 à 07/05
(fin Septembre à début Mai)
- Pour Trappes :
6 744 h du 10/09 à 17/06
(mi-Septembre à mi-Juin)
- Pour Nice :
4 728 h du 22/10 à 06/05
(mi-Octobre à début Mai)

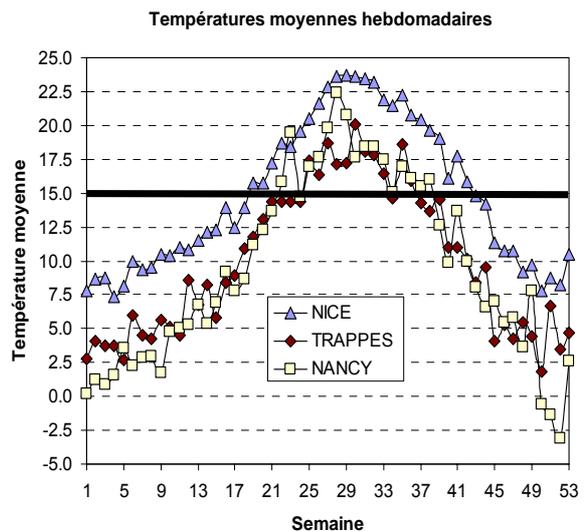


Figure 1.9- Températures moyennes hebdomadaires de Nancy, Trappes et Nice

➤ La demande maximale de chauffage

Sur les saisons de chauffe, les occurrences des différentes températures extérieures degré par degré sont illustrées sur la figure 1.10. La figure 1.11 présente les cumuls des occurrences des différentes températures extérieures pour les différentes zones climatiques.

Les occurrences des températures des régions mentionnées fournissent une aide importante pour l'optimisation du système et du prix d'une installation de pompe à chaleur air/eau. La température extérieure minimale est de -12 °C. Cette température n'apparaît que très peu sur la période de chauffe pour la région la plus froide de Nancy.

Pour le site de Nice, des températures inférieures à 2 °C sont rarement observées. D'autre part, une température inférieure à 2° C est rencontrée sur 15 % et sur 30 % de la durée de la saison de chauffe pour les régions de Trappes et de Nancy respectivement.

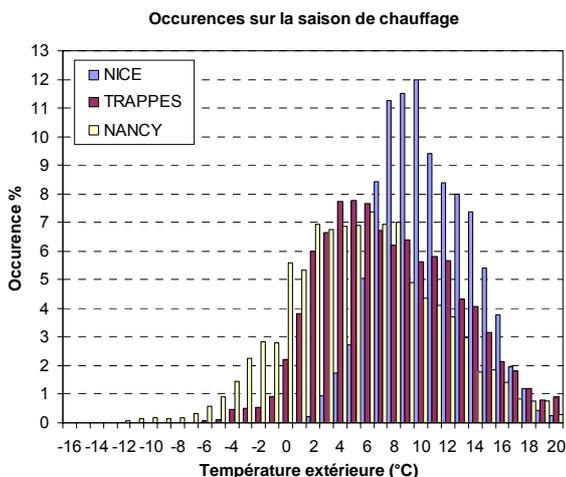


Figure 1.10- Occurrences des températures extérieures pour Nancy, Trappes et Nice

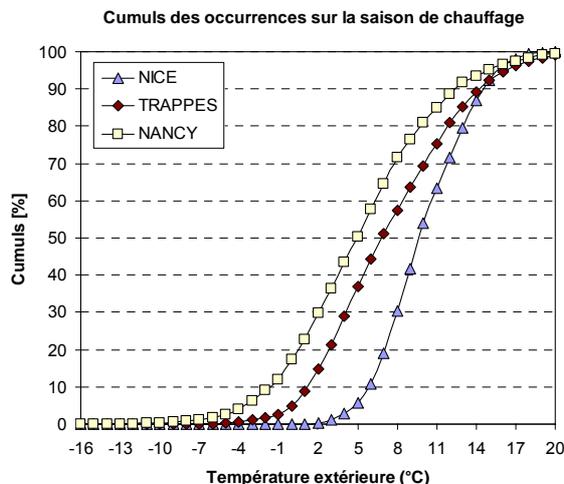


Figure 1.11- Cumuls des occurrences pour Nancy, Trappes et Nice

Les besoins énergétiques d'un logement ancien isolé (Superficie=120 m², GV = 250 W/K) sont tracés en fonction des températures extérieures pour les 3 zones climatiques H1, H2 et H3 (cf. figure 1.12).

Bien que le pic de besoin thermique apparaisse pour les températures extérieures les plus faibles, la majorité des besoins de chauffage se situe sur un intervalle de température extérieure beaucoup plus modéré.

Les besoins énergétiques les plus fréquents correspondent à une température extérieure de 2 °C pour Nancy, 4 °C pour Trappes et 8 °C pour Nice.

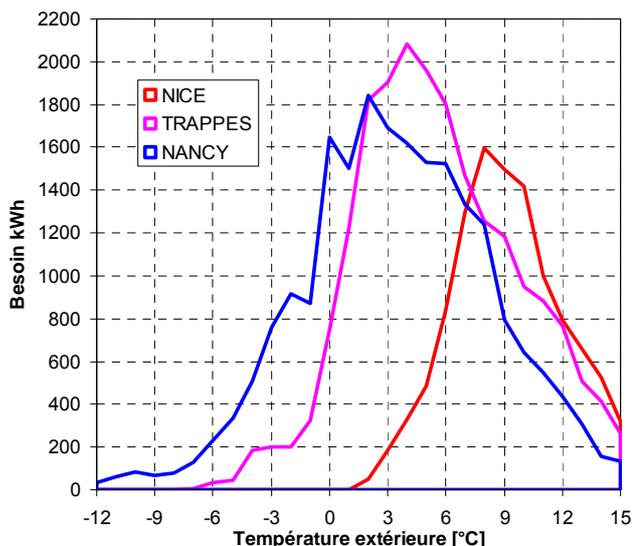


Figure 1.12- Besoins de chauffage pour une maison individuelle

Plus de 50 % de la demande de chauffage se situe entre 0 °C et 6 °C pour Nancy, 2 °C et 7 °C pour Trappes et 7 °C et 10 °C pour Nice. L'objectif de conception étant de maximiser le COP annuel, l'optimisation du fonctionnement du système doit prendre en compte ces différents intervalles de températures extérieures. Ceci a plus ou moins d'effet sur le choix de la technologie des compresseurs, la sélection des fluides frigorigènes, le

dimensionnement du système, le chargement optimal du système et le choix du cycle givrage/dégivrage. Pour les régions à climat froid ou modéré, une température extérieure moyenne de 5 °C peut être fixée pour l'optimisation.

1.3.1.2 - Le réseau hydraulique : les conditions au condenseur

La température de fourniture d'eau de chauffage est imposée par le réseau hydraulique du logement. Cette température varie en fonction du type du corps de chauffe, de la surface de chauffe et du débit d'eau de chauffage.

En Europe, une grande partie des bâtiments anciens avec chauffage hydraulique fonctionne avec des systèmes à radiateurs. Pour ce type de système, la température de fourniture d'eau de chauffage peut atteindre jusqu'à 75 °C. Pour plusieurs pays, y compris l'Allemagne, la France et la Suisse, ceci a été identifié comme étant un obstacle technique à l'utilisation des pompes à chaleur qui doit être surmonté. Cette contrainte explique le fait que, dans la plupart des pays européens, les pompes à chaleur sont installées principalement dans des bâtiments neufs.

Les installations de chauffage sont généralement réglées suivant une « loi d'eau » ou courbe de chauffe. Ce type de régulation établit une correspondance entre la température de l'eau de l'installation et la température extérieure en vue d'obtenir la température ambiante souhaitée. Plus il fait froid, plus la température de l'eau dans les corps de chauffe doit être élevée. On parle de "régulation en température glissante" en fonction de la température extérieure.

Une courbe de chauffe, dépend du type de bâtiment, de l'installation et du confort recherché. Théoriquement, elle ne doit varier que si un de ces 3 paramètres est modifié.

➤ Loi d'eau ou courbe de chauffe

Afin d'illustrer le choix de la température de fourniture d'eau en fonction du type de corps de chauffe (valeur de UA), une maison ayant un coefficient de déperdition **GV** est choisie pour déterminer ses besoins.

D'une manière simplifiée, un corps de chauffe peut être caractérisé par sa valeur de conductance **UA** (W/K). **A** étant la surface de transfert et **U** le coefficient d'échange global par convection et rayonnement.

Le besoin de chauffage (**B**) d'une maison individuelle en régime permanent est proportionnel à l'écart de température intérieur/extérieur. Pour une température ambiante **T_a**, ceci peut se traduire par la relation suivante :

$$B = GV(T_a - T_e) \quad [1.8]$$

D'autre part, la puissance de chauffe (**P**) émise par un corps de chauffe donné dépend de la température de l'eau l'alimentant et de la température ambiante (**T_a**).

$$P = UA(T_{\text{moy}} - T_a) \quad [1.9]$$

Pour chaque valeur du besoin en fonction de la température extérieure, la température moyenne d'eau du corps de chauffe capable d'échanger la puissance est calculée par:

$$P = B \quad [1.10]$$

ce qui donne d'après (1.8) et (1.9) :

$$T_{\text{moy}} = B/UA + T_a$$

$$T_{\text{moy}} = GV(T_a - T_e)/UA + T_a$$

soit pour la température de départ d'eau

$$T_d = T_{moy} + \Delta T / 2$$

[1.11]

avec $\Delta T = \text{Besoin} / (M \cdot C_p)$

où (**M**) est le débit massique d'eau de chauffage.

La figure 1.13 montre la variation de la température de départ d'eau en fonction du choix du corps de chauffe et de la température extérieure pour un débit d'eau de chauffage de 250 g/s, une température ambiante de 20 °C et une maison ayant un GV de 250 W/K.

Les corps de chauffe sont généralement classés en trois catégories. A titre d'exemple :

- Pour des valeurs de conductances inférieures à 200 W/K (cas des radiateurs anciens), les températures de départ d'eau s'élèvent rapidement et peuvent atteindre des valeurs de 65 °C à 75 °C pour des températures extérieures proche de - 12 °C (valeur moyenne la plus faible observée en France).
- Pour les radiateurs calculés avec suffisamment de réserves, les radiateurs installés dans des bâtiments dont l'isolation a été renforcée et pour les ventilo-convecteurs, des températures de départ de 45 °C à 65 °C peuvent être utilisées.
- Pour des valeurs de UA supérieures à 500 W/K (cas du chauffage par le sol avec planchers chauffants), les températures de départ d'eau utilisées sont inférieures à 45 °C.

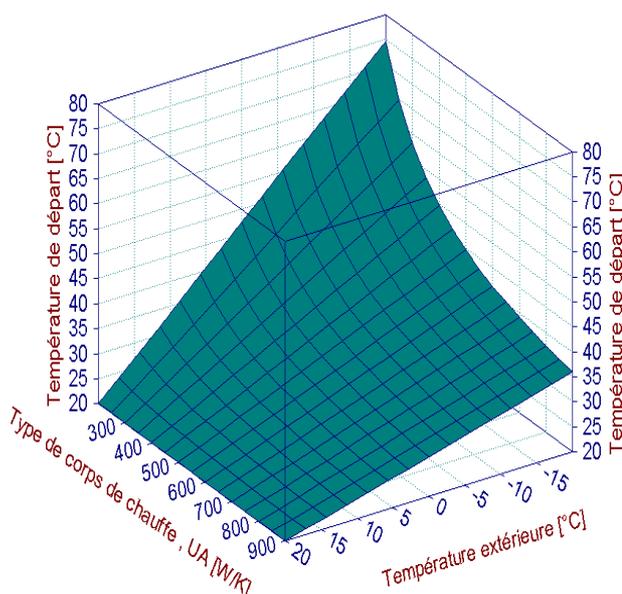


Figure 1.13- Variation de la température de départ d'eau en fonction du choix du corps de chauffe et de la température extérieure



Photo 1.1- Radiateur classique



Photo 1.2- Ventilo-convecteur



Photo 1.3- Plancher chauffant

Les déperditions thermiques des bâtiments existants réhabilités ont fortement diminué grâce à la mise en œuvre d'isolation plus efficace des parois et des doubles vitrages [Plan, 2004]. Avec la réduction des déperditions, les radiateurs anciens du réseau de chauffage (souvent dimensionnés avec suffisamment de réserve) sont devenus surdimensionnés et peuvent alors fournir la puissance à un niveau de température inférieur tout en conservant le même confort.

Dans le cadre de cette étude, la température de départ d'eau maximale est fixée à 65 °C. Cela correspond à la plus grande partie du parc réhabilitable. De plus, en se limitant à 65°C, comme on va le voir au cours de cette étude, la pression au condenseur de la PAC reste limitée. En effet, des pressions de condensation élevées nécessitent des matériels

adaptés qui, aujourd'hui, ne sont pas disponibles en grande quantité et ne permettent pas une introduction rapide sur le marché. Une analyse plus détaillée du choix des fluides frigorigènes sur les performances de la PAC et sur le niveau des pressions au condenseur est présentée au chapitre 3.

1.3.2 Les degrés de couverture des PAC air/eau usuelles

Pour que la pompe à chaleur puisse se substituer à une chaudière traditionnelle tout en limitant les coûts d'investissement, il faut que la puissance de chauffage soit fournie au réseau de radiateurs habituels à convection naturelle. Cette contrainte amène à chauffer l'eau à un niveau de température élevé (65 °C) au point de sortie de la PAC, et cela pour de faibles températures extérieures.

Les cycles actuellement utilisés dans les pompes à chaleur air/eau, installées en résidentiel, présentent l'inconvénient de ne fonctionner que sur une plage restreinte de température extérieure. Ces limitations sont principalement liées à la forte dégradation des performances et au dépassement des limites techniques imposées par le constructeur.

En effet, dans une pompe à chaleur, lorsque les températures de la source froide et du puits chaud s'éloignent l'une de l'autre, le taux de compression requis au compresseur s'élève. Cet accroissement du taux de compression présente plusieurs inconvénients.

- Les rendements du compresseur s'abaissent.
 - ✓ Pour les compresseurs volumétriques scroll, le rendement volumétrique diminue. Pour fournir la même puissance, il faut donc un compresseur dont le débit volume balayé soit plus grand, ce qui accroît son prix.
 - ✓ Le rendement global diminue aussi. Et lorsque le rendement global diminue, le comportement énergétique du compresseur réel s'éloigne de celui du compresseur idéal. Ce compresseur consomme plus d'énergie, ce qui est défavorable.
- Les pertes thermodynamiques dues à la détente isenthalpique et à la surchauffe des vapeurs s'accroissent.
- La température de refoulement s'élève.

Afin d'illustrer ces différentes contraintes et limitations en fonction du choix du corps de chauffe et des conditions climatiques, trois courbes de chauffe sont choisies pour caractériser les installations (cf. figure 1.14). Ces courbes correspondent à des températures de départ d'eau nominales de 35 °C, 55 °C et 75°C pour une température extérieure de -12 °C.

On définit :

- une loi d'eau basse température (LOI BT) pour caractériser les planchers chauffants,
- une loi d'eau moyenne température (LOI MT) pour les radiateurs dimensionnés avec suffisamment de réserve ou les ventilo-convecteurs peu efficaces. (la zone colorée correspond au cas de la réhabilitation),
- une loi d'eau haute température (LOI HT) pour les radiateurs très anciens ou mal dimensionnés (cette loi est prise à titre d'illustration).

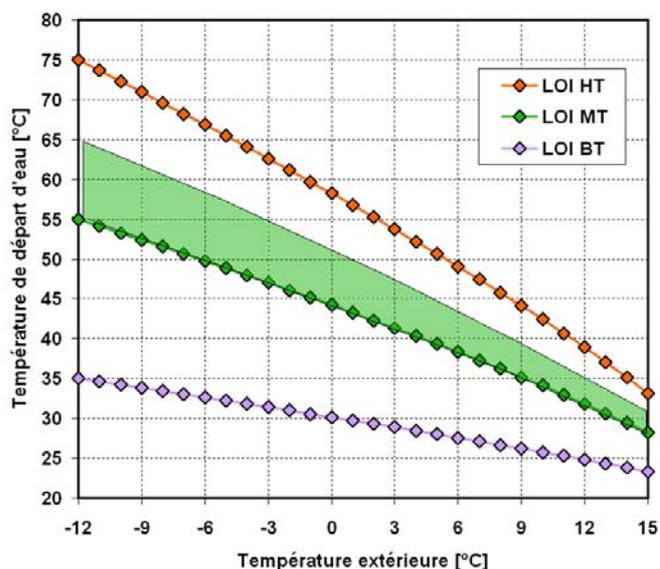


Figure 1.14- Courbes de chauffe et catégorie de corps de chauffe

1.3.2.1 - Les contraintes techniques pour les systèmes mono-étagés

Les valeurs maximales admissibles du taux de compression et de la température de refoulement dépendent de la technologie du compresseur. Pour la technologie scroll, ces valeurs varient de 6 à 7 pour le taux de compression et de 120 °C à 130 °C pour la température de refoulement. La limitation de la température de refoulement est principalement liée à la stabilité thermique du lubrifiant. Pour des températures élevées, les qualités de l'huile de lubrification se dégradent, et ceci conduit très vite à la casse du compresseur.

Les figures 1.15 et 1.16 présentent les limitations mentionnées ci-dessus. Elles permettent, selon le type de corps de chauffe, de définir une température extérieure minimale à partir de laquelle la PAC doit être arrêtée. La température d'arrêt de la PAC est estimée à - 12 °C pour les planchers chauffants et entre -3 °C et 2°C pour les radiateurs.

Pour une température extérieure inférieure à la température d'arrêt, le chauffage est donc assuré par des résistances électriques dont le rendement est inférieur à 1.

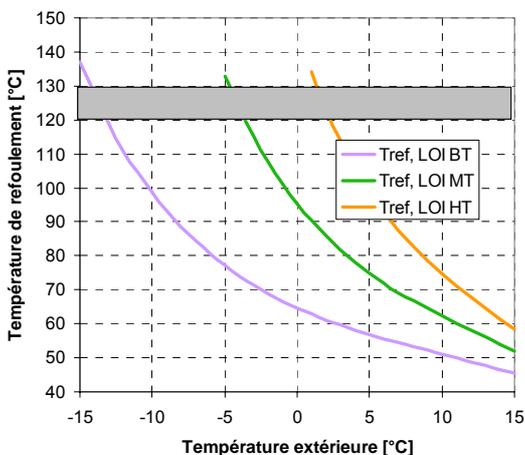


Figure 1.15- Températures de refoulement en fonction de la loi d'eau et de la température extérieure

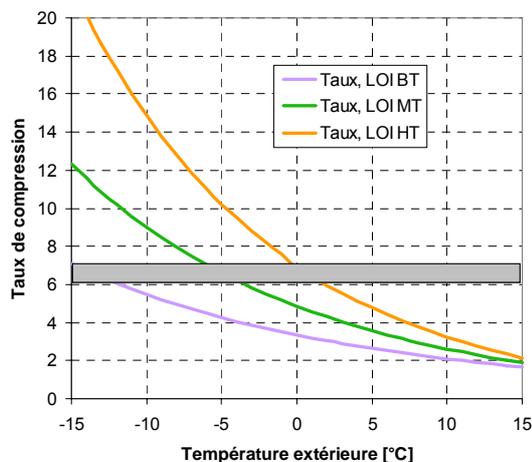


Figure 1.16- Taux de compression en fonction de la loi d'eau et de la température extérieure

Fluide frigorigène : R-407C, Compresseur scroll : rendements moyens [Copeland 5], Pincements aux échangeurs : 4 K

1.3.2.2 - La dégradation des performances saisonnières

La figure 1.17 montre la variation du COP en fonction du type de corps de chauffe. Les besoins de chauffage d'une maison individuelle (GV = 250 W/K) sont aussi présentés pour analyser l'effet du climat sur les performances saisonnières.

Pour une distribution de chaleur par radiateurs (zone colorée), l'arrêt de la PAC se traduit par une forte baisse des performances saisonnières. Pour les régions à climat froid, une grande partie de la demande de chauffage est produite par résistances électriques.

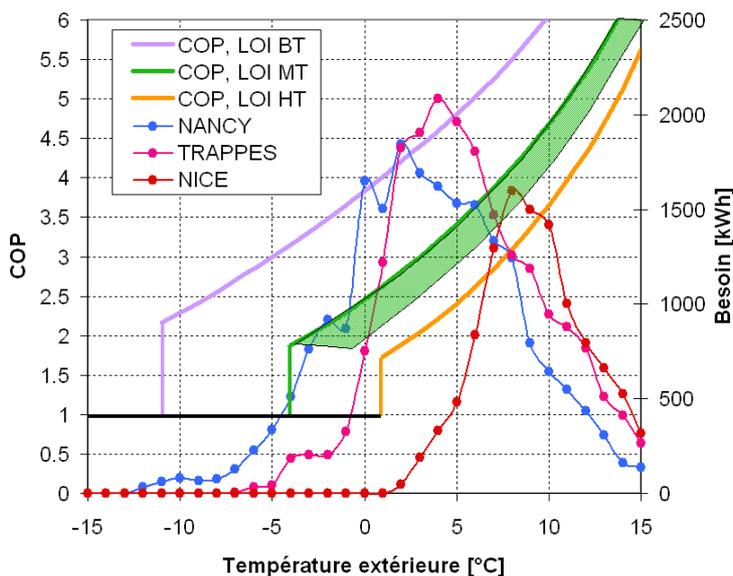


Figure 1.17- COP semi-théorique en fonction du corps de chauffe (ne prend pas en compte la consommation des auxiliaires et les pertes par dégivrage)

Pour qu'elles soient efficaces, les PAC en substitution des chaudières doivent fournir la totalité de la puissance à la température extérieure la plus basse.

De plus, en s'approchant des limites de fonctionnement, le taux de compression est élevé, les rendements global et isentropique du compresseur diminuent et le COP décroît rapidement. Il atteint de faibles valeurs sur une grande plage de température extérieure (de -5 °C à 5 °C). Cette plage de température va contribuer à fortement dégrader le COP annuel.

La solution la plus efficace et la plus connue pour éviter ces dégradations est de comprimer le frigorigène sur plusieurs étages de compression. Le taux de compression global nécessaire est ainsi le produit des taux de compression partiels de chacun des étages, ce qui ramène ceux-ci à des valeurs acceptables.

Le remplacement des chaudières anciennes par des PAC usuelles à compression mono-étagé n'est donc pas une solution efficace. Des améliorations de la conception thermodynamique sont nécessaires afin d'élargir le domaine d'application et d'améliorer le coefficient de performance saisonnier.

Dans le chapitre 2, nous analyserons en détail les différentes options techniques du cycle bi-étagé et de la production d'eau chaude sanitaire. Les différentes voies d'améliorations des PAC air/eau seront aussi étudiées.

1.4 - Les émissions de CO₂ évitées, intérêts substantiels

Les enjeux du développement des PAC sont à la fois énergétiques, économiques et environnementaux. En effet, la performance énergétique des PAC entraîne des économies d'énergie qui engendrent de fortes conséquences économiques et environnementales.

Dans cette section, les gains en consommation énergétique et en émissions de CO₂ pour un remplacement à grande échelle des chaudières anciennes par des pompes à chaleur sont évalués. Cette étude est une première évaluation qui sera complétée après la conception finale (cf. chapitre 5).

1.4.1 - Evaluation des émissions de CO₂ des chaudières remplaçables

Les teneurs en CO₂ des trois énergies comparées : fioul, gaz et électricité (exprimées en g CO₂/ kWh) sont présentées au tableau 1.3.

Tableau 1.3 - g CO₂ / kWh des énergies de chauffage

Fioul	Gaz naturel	Electricité pour le chauffage [ADEME, 2005]
310	280	180

L'utilisation des énergies en 2002 pour le chauffage résidentiel [DGEMP, 2006] est répartie comme indiqué dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 - Pourcentages des énergies utilisées en chauffage

Fioul	Gaz naturel	Electricité
25,3	41,8	10,4

En 2002, la consommation totale de chauffage résidentiel est de 412 TWh/an [DGEMP, 2006].

En considérant que la consommation énergétique est directement proportionnelle à la répartition des énergies, il vient :

- **172,21 TWh/an** pour les chaudières à gaz
- **104,23 TWh/an** pour les chaudières à fioul.

En considérant que le remplacement se fait de manière homogène pour les chaudières gaz et fioul âgées de 20 ans ou plus (~35 % des chaudières), l'énergie thermique de ce parc ancien serait :

- **60,27 TWh/an** pour les chaudières à gaz
- **36,48 TWh/an** pour les chaudières à fioul.

Les émissions de CO₂ correspondantes sont alors de :

- **16,87 Mt CO₂/an** pour les chaudières à gaz
- **11,30 Mt CO₂/an** pour les chaudières au fioul.

L'enjeu énergétique et en tonnes équivalent CO₂ est donc de :
 60,27 + 36,48 = **96,75 TWh/an** et de 16,87 + 11,30 = **28,17 Mt CO₂/an**.

1.4.2 - Evaluation des émissions de CO₂ et de frigorigène des PAC

Pour analyser les impacts énergétiques et en émissions évitées de gaz à effet de serre associés au remplacement potentiel de l'ensemble du parc des chaudières anciennes, il faut analyser les PAC du double point de vue de leur consommation énergétique (effet indirect) et des émissions de fluides frigorigènes (effet direct).

1.4.2.1 - Effet direct dû aux émissions

Les études réalisées au Centre Energétique et Procédés depuis de nombreuses années sur les émissions de fluides frigorigènes respectent les règles d'inventaires telles que définies par IPCC [IPCC, 1996]. La méthode développée pour évaluer les émissions des PAC résidentielles suppose que la puissance de chauffage installée soit connue. Une fois cette puissance connue, des études régulièrement mises à jour permettent d'associer à une puissance frigorifique (ou calorifique pour les PAC) une charge en fluide frigorigène. Puis pour chaque technologie, un taux d'émission annuel est fixé. Ce taux d'émission intègre les émissions sur le cycle de vie de la PAC : émissions initiales à la charge, émissions fugitives, émissions lors de la maintenance et en fin de vie des équipements.

Pour les PAC résidentielles, le taux annuel est estimé à **5 %** de la charge initiale.

La puissance de chauffage des PAC va se substituer au parc des chaudières anciennes à gaz et à fioul qui consomment **96,75 TWh**, soit une énergie chaleur annuelle de **58,05 TWh** pour un rendement des chaudières anciennes de 60 %.

Si on considère que **70 %** de cette énergie (climat froid) est consommée pendant les 4 mois d'hiver (décembre, janvier, février et mars), la puissance hiver serait de : $P_{\text{hiver}} = \mathbf{40,63 TWh}$.

Pour ces 4 mois, l'hypothèse est que les PAC fonctionnent en moyenne 50 % du temps, soit 1 440 heures. En divisant l'énergie consommée en hiver par le temps de marche (en hiver), il vient :

- Puissance installée = **28,22 millions de kW** calorifiques installés.

Tableau 1.5 - Données pour le calcul des émissions en équivalent CO₂

Charge de frigorigène	Taux d'émission annuel	GWP du R-407C
0,3 kg / kW installé	5 %	1 653 kg CO ₂ / kg fluide

A partir des données du tableau 1.5, la charge totale de R-407C correspondant à ce parc est obtenue :

- Charge totale de R-407C = **8 466** tonnes de R-407C

et les émissions annuelles :

- émissions = **423,3** tonnes R-407C

soit en équivalent CO₂ :

- équivalent CO₂ = **0,69** Mt CO₂ (1 Mt = 10⁶ tonnes)

1.4.2.2 - Effet Indirect dû à la consommation énergétique

La consommation énergétique des PAC demande d'effectuer des raffinements d'analyse qui seront effectués au cours de l'étude. En effet, il faut évaluer la consommation d'énergie de manière saisonnière. Dans cette étude, le COP moyen saisonnier sera pris variable entre 2,0 et 4,0.

L'énergie électrique annuelle consommée par la PAC se calcule en divisant l'énergie chaleur annuelle par le COP de la PAC soit :

$$E_{\text{élec}} = E_{\text{chaleur}} / \text{COP}$$

Tableau 1.6 - Emissions de CO₂ dues au fonctionnement des PAC

COP	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
TWh élect /an	29,02	23,22	19,35	16,58	14,51
Emissions (Mt CO ₂ /an)	5,22	4,17	3,48	2,98	2,61

Le tableau 1.6 montre qu'en fonction du COP saisonnier variant de 2,0 à 4,0, les émissions de CO₂ dues au chauffage par PAC varient respectivement entre **5,22** et **2,61** Mt de CO₂/an.

1.4.3 - Emissions comparées chaudières et PAC

Les émissions des chaudières à gaz et à fioul de plus de 20 ans sont évaluées à **28,17** Mt CO₂/an.

Le tableau 1.7 fait la somme des émissions directes de R-407C en équivalent CO₂ et des émissions indirectes dues à la consommation d'électricité. Pour ces dernières, les valeurs sont prises comme pour le tableau précédent pour des COP variant entre 2,0 et 4,0.

Tableau 1.7 - Emissions totales en CO₂ et équivalent CO₂ des PAC au R-407C

COP saisonnier moyen de la PAC	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Emissions PAC (Mt CO ₂ /an) indirectes	5,22	4,17	3,48	2,98	2,61
Emissions PAC (Mt CO ₂ /an) directes	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69
Emissions PAC total (Mt CO ₂ /an) directes +indirectes	5,92	4,88	4,18	3,69	3,31
Part Emissions directes/ Emissions totales (%) PAC	11,81	14,34	16,73	18,99	21,13
Emissions évitées (MT CO ₂ /an)	22,26	23,31	24,00	24,50	24,87
Emissions Chaudière/ Emissions PAC	4,75	5,77	6,73	7,64	8,50

Le tableau 1.7 montre que les Mt de CO₂ évités sont substantiels pour une substitution massive des chaudières anciennes par des PAC, puisque le gisement potentiel se situe entre **22,26** et **24,87** Mt de CO₂ évités. De plus, ces forts enjeux peuvent être encore plus importants si on ajoute la part de la production d'eau chaude sanitaire estimée à 45,3 TWh/an [DGEMP, 2006]. A savoir que le g CO₂/kWh électrique pour l'usage sanitaire est de 40 g CO₂/kWh [ADEME, 2005].

Note : cette valeur de 40 g de CO₂/kWh provient aussi de l'analyse des conditions de production de l'ECS électrique qui s'effectue principalement la nuit et donc utilise principalement la base nucléaire. Cette moyenne forfaitaire a bien sûr un effet paradoxal sur les émissions d'une PAC produisant à la fois le chauffage et l'ECS puisqu'elle entraîne une double comptabilité avec des valeurs fort différentes quant à la valeur en CO₂ du kWh utilisé.

Les résultats montrent aussi que pour la France (mix faible), la part des émissions directes est non négligeable (entre 11,8 % et 21,1 % des émissions totales), d'où l'intérêt de chercher des fluides frigorigènes à faible GWP pour diminuer davantage les émissions des gaz à effet de serre.

Comparée à d'autres pays européens (cf. figure 1.18), la France est bien placée en terme de réduction des émissions de CO₂ en remplaçant les chaudières anciennes par des PAC (facteur de réduction au moins égal à 4).

D'autre part, dans des pays tel que la Norvège (98 % de l'électricité est produite par la filière hydraulique), la Suède (55 % hydraulique, 40 % nucléaire) et l'Islande (85 % hydraulique, 15 % cogénération), le facteur de réduction des émissions de CO₂ peut devenir supérieur à 10.

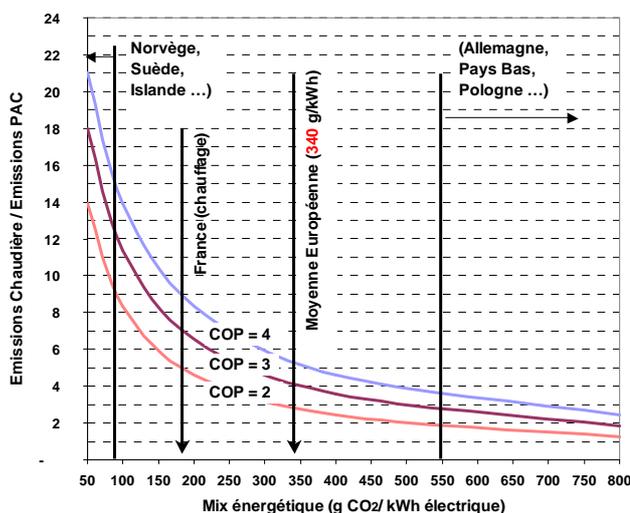


Figure 1.18- Facteur de réduction des émissions de CO₂ en fonction du mix énergétique et du COP du système de PAC (Remplacement d'une chaudière à fioul, rend. = 60 %)

1.5 - Conclusions

La réhabilitation du secteur résidentiel en France constitue un marché de très grand potentiel. Le nombre des chaudières anciennes est estimé à 4 millions unités.

La faible teneur en CO₂ du kWh produit en France amène des diminutions rapides des émissions de CO₂ associées à l'installation de PAC pour la production d'ECS et pour le chauffage. Dans les pays où le mix énergétique a un contenu beaucoup plus élevé en CO₂, les PAC restent aussi attractives en terme de limitation des émissions, mais il faut que le COP soit beaucoup plus élevé pour que les gains en émissions soient significatifs.

L'efficacité énergétique des systèmes PAC air/eau doit être continuellement améliorée afin d'accentuer leur pénétration sur le terrain et de contribuer au développement durable de l'industrie électrique.

Pour la substitution des chaudières, les produits disponibles sur le marché ne permettent pas d'atteindre des efficacités énergétiques élevées et sont pour la majorité limités par les conditions de fourniture d'eau de chauffage. L'introduction de la PAC air/eau dans la boucle de chauffage nécessite :

- une adaptation du cycle thermodynamique et
- une amélioration des efficacités énergétiques.

La substitution de ces générateurs vieillissants par des systèmes thermodynamiques présente des intérêts substantiels. Une première évaluation montre une réduction par un facteur d'au moins 4 des émissions de CO₂. Pour le parc remplaçable et pour l'usage de

chauffage, l'enjeu de la substitution est évalué entre **22,26** et **24,87** millions de tonnes de CO₂ évitées par an.

L'étude précédente montre aussi un fort intérêt pour l'utilisation des frigorigènes à faible GWP. En effet, la part des émissions directes des PAC s'élève à **21** % des émissions totales.

La stratégie de développement d'une PAC doit donc intégrer l'ensemble des impacts environnementaux. L'analyse doit se faire à la fois en termes :

- d'impacts indirects associés à la consommation d'énergie et aux émissions de CO₂ dues au mix énergétique (cf. chapitre 2),
- d'impacts directs associés aux niveaux d'émissions et au GWP du fluide (cf. chapitre 3).

