
Cadre de la thèse Contexte et enjeux

La fin du XX^e siècle et le début de XXI^e sont marqués par des problématiques énergétiques et environnementales sans précédent. « Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer » [GIEC2007]. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) estime que la probabilité que les changements climatiques observés à l'heure actuelle soient dus aux activités humaines est supérieure à 90%¹. « Les émissions mondiales de [gaz à effet de serre]GES² imputables aux activités humaines ont augmenté depuis l'époque préindustrielle ; la hausse a été de 70% entre 1970 et 2004 » [GIEC2007]. La concentration de CO₂ (principal GES) dans l'atmosphère en 2005 atteignait 382 ppm contre 280 ppm avant l'ère industrielle³. Cette concentration a cru au cours de ces dix dernières années de 1,9 ppm par an en moyenne³, contre 1,4 ppm par an³ entre 1960 et 1990. Les scénarios de stabilisation de la concentration de GES dans l'atmosphère, nécessaire pour limiter une hausse de la température moyenne du globe autour d'une limite acceptable de 2°C à 2,4°C par rapport à l'ère préindustrielle (limite au delà de laquelle la probabilité de voir apparaître des effets irréversibles sur l'environnement croît rapidement), indiquent qu'une diminution de 50% à 85% des émissions mondiales annuelles de GES est nécessaire pour limiter leur concentration atmosphérique entre 445 et 490 ppm en 2050⁴.

Les pays industrialisés, avec 20% seulement de la population mondiale, sont responsables de 46% des émissions de gaz à effet de serre (GES)³. Dans le but de stabiliser la concentration de GES dans l'atmosphère afin de limiter les effets irréversibles sur l'environnement d'une augmentation de la température moyenne à la surface du globe, une collaboration internationale, à travers le processus du Protocole de Kyoto, s'est mise en place avec l'adoption d'une multitude de politiques nationales ayant pour objectif une division par deux des émissions globales de GES d'ici à 2050. Cet objectif se traduit pour les pays industrialisés par une réduction par quatre de leurs émissions de GES [CCE2005] [BOIS2006] [TUDD2006]. Les premiers engagements à

1 p.39 du Rapport de synthèse [GIEC2007]. « L'essentiel de l'élévation de la température moyenne du globe observée depuis le milieu du XX^e siècle est très probablement attribuable à la hausse des concentrations de GES anthropiques ». La note (p.27) sur le traitement de l'incertitude indique que l'utilisation des termes très probablement correspond à une probabilité comprise entre 90% et 95%.

2 Sont comptabilisés dans les chiffres les émissions des principaux gaz à effet de serre : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (NO₂), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC), l'hexafluorures de soufre (SF₆). Une pondération est appliquée à ces GES en fonction de leur potentiel de réchauffement mondial sur 100 ans.

3 p.37 du Rapport synthèse [GIEC2007].

4 p.67 du Rapport synthèse [GIEC2007]. Tableau 5.1.

moyen terme pour atteindre cette cible ont concerné la réduction des émissions de GES à l'horizon 2010-2012 par rapport au niveau de 1990. Pour l'Europe des 15, cela se traduit par une réduction des émissions de 8%, répartie de façon différenciée entre les différents pays, « allant d'une réduction de 28% pour le Luxembourg, à une augmentation de 27% pour le Portugal, les émissions de la France devant rester stables » [PEUP2008].

Du côté français, un plan d'action, proposé dans la loi programme du 13 juillet 2005, fixe les orientations de la politique énergétique nationale pour atteindre ces objectifs internationaux à moyen et long terme. L'ensemble des secteurs de l'économie sont contraints de diminuer leurs émissions de GES. Parmi eux, le secteur du bâtiment (résidentiel- tertiaire) en France est le premier consommateur d'énergie primaire avec 117,9 Mtep par an, représentant 43% de la consommation d'énergie primaire nationale⁵. Ces consommations induisent 20% des émissions nationales de GES avec le rejet de 133,2 MteqCO₂ [ADEM2007], soient un peu plus de 2 tonnes équivalent CO₂ par habitant et par an⁶.

Le secteur résidentiel seul, composé de plus de 31,1 millions de logements⁷, dont 17,5 millions de maisons individuelles, participe à hauteur de 58% à la consommation d'énergie primaire du secteur résidentiel-tertiaire, soit 25% de la consommation en énergie primaire nationale⁵, avec 68,6 Mtep. Sa part dans les émissions de CO₂ est de 81,6 MtCO₂, soit 67% de l'ensemble des émissions de CO₂ du secteur du bâtiment⁷, et 15,6% des émissions nationales de CO₂. Le secteur résidentiel-tertiaire, gisement considérable d'économies d'énergie, est incontournable pour atteindre les objectifs nationaux de réduction des émissions de GES. La consommation moyenne unitaire en énergie primaire tous usages confondus s'approche de 396 kWh_{ep}.m⁻².an⁻¹, dont 223 kWh_{ep}.m⁻².an⁻¹ sont directement imputables au chauffage des logements⁸.

La répartition par usage de la consommation d'énergie finale, de la consommation d'énergie primaire et des émissions de CO₂ du secteur résidentiel pour l'année 2006 est présenté au tableau 1. La principale source de consommation et d'émissions de CO₂ dans le secteur résidentiel est le chauffage.

5 chiffres calculés à partir des valeurs en énergie finale de la p.24 et de la répartition par énergie de la p.42 des Chiffres clés du bâtiment [ADEM2007]. Le détail des calculs est donnée en *Annexe A* et utilise les coefficients de conversion énergie finale/primaire conventionnel utilisés par la DGEC.

6 p.28 des Chiffres clés du bâtiment pour l'année 2006 [ADEM2007]. Ces chiffres prennent en compte l'ensemble des émissions des GES présentés en note 2. Ils diffèrent sensiblement des chiffres qui comptabilisent uniquement les émissions de CO₂, avec pour le secteur résidentiel-tertiaire une part de 23% des émissions globale de CO₂, avec 120,3 MtCO₂ pour l'année 2006.

7 p.27 et p.37 des Chiffres clés du bâtiment [ADEM2007]

8 chiffres estimés par rapport aux Chiffres clés du bâtiment [ADEM2007]. Le détail du calcul fourni en *Annexe B*, prend en compte la répartition du type d'énergie par chaque usage pondéré d'un coefficient de conversion énergie finale/primaire conventionnel utilisé par le DGEC de 3,03 pour l'électricité et de 1 pour les autres

	Part dans la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel [%]	Part dans la consommation d'énergie primaire du secteur résidentiel [%] ⁸	Répartition dans les émissions de CO ₂ [%]
Chauffage	65	56	76,5
Eau chaude sanitaire (ECS)	12,3	12	10,2
Cuisson	6,5	8	6,5
Électricité spécifique	16,2	24	6,8

Tableau 1: Répartition par usage de la consommation finale d'énergie et des émissions de CO₂ en France

Réduire cette moyenne à une centaine de kWh_{ep}.m⁻².an⁻¹ d'ici à 2050 est l'objectif que s'est fixé le secteur du bâtiment au travers de différents textes et lois tels que la directive européenne sur les performances énergétiques des bâtiments du 16 décembre 2002, le Plan Climat, ou la loi Programme d'Orientation de la Politique Énergétique (POPE) du 13 juillet 2005. Une centaine de kWh_{ep}.m⁻².an⁻¹ au total inclus 50 kWh_{ep}.m⁻².an⁻¹ dédiés aux consommations de chauffage et d'eau chaude sanitaire (ECS).

Dans ce contexte, plusieurs éléments de solutions peuvent être mis en place pour atteindre ces objectifs dans le secteur du bâtiment. Trois notions largement développées par l'association négaWatt⁹ semblent fondamentales : la sobriété, l'efficacité énergétique, et les énergies renouvelables [NEGA2003]. La sobriété énergétique liée aux comportements des utilisateurs se trouve être le dernier maillon de la chaîne énergétique mais le premier levier sur lequel on peut agir pour supprimer les gaspillages, et mieux gérer nos consommations d'énergie. Elle résulte d'une prise de conscience et s'appuie sur la responsabilité de chacun des acteurs. L'efficacité énergétique liée aux technologies est du ressort des procédés d'extraction, de production, des équipements, et des bâtiments qui constituent la chaîne énergétique. L'amélioration de la chaîne énergétique et la limitation des pertes le long de celle-ci contribue à limiter la production d'énergie en amont. Ces deux premiers aspects se complètent pour réduire les besoins énergétiques à la source. Les énergies renouvelables viennent ensuite compléter la chaîne énergétique en vue de produire durablement de l'énergie pour subvenir aux besoins et réduire les émissions de GES.

⁹ www.negawatt.org/

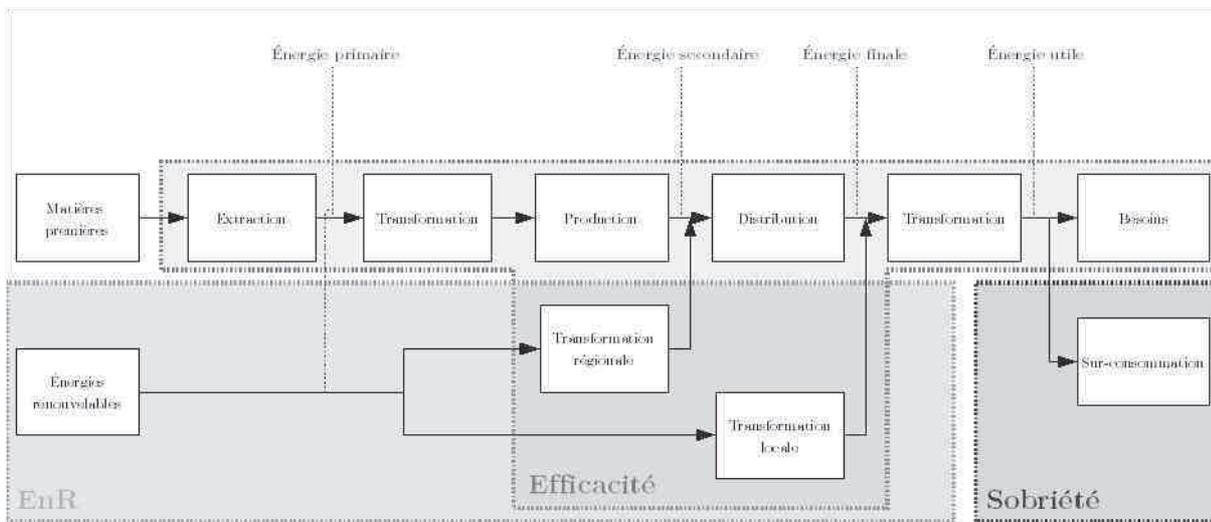


Figure 1: Structure de la chaîne énergétique et leviers d'action

L'expérience des professionnels dans le domaine de l'énergétique des bâtiments neufs et existants [SIDL2007], montre clairement que pour atteindre les objectifs de confort, de réduction des consommations et d'émissions GES, il est nécessaire de combiner un bon niveau d'isolation thermique à la maîtrise des pertes par renouvellement d'air et par infiltrations, à l'optimisation et au stockage des apports solaires, à l'efficacité du système de chauffage et de production de l'eau chaude sanitaire et à la production décentralisée d'électricité.

Près de 4,3 millions de maisons individuelles sont chauffées à l'électricité¹⁰, soit près d'un quart des maisons individuelles. Le chauffage électrique par convecteur classique bien qu'étant une aberration du point de vue énergétique [BORE1992] [PASD1999] [CHEN2000] [ROUX2001], restent cependant toujours installé dans les constructions neuves, et déjà très présent dans les maisons existantes. Envisager le remplacement de ces systèmes par des systèmes plus performants, permettrait une diminution considérable de la demande en ressources d'énergie primaire, et par conséquent une diminution des émissions de GES qui leur sont associées.

2. Objectifs de la thèse

Sur les 17,5 millions de maisons individuelles du parc existant français, 10,6 millions ont été construites avant la première réglementation thermique de 1974⁷. Les constructions neuves représentent environ 1% du parc immobilier chaque année¹¹. Le

¹⁰ p.47 des Chiffres clés du bâtiment [ADEM2007]

¹¹ p.36 des Chiffres clés du bâtiment [ADEM2007]. « En 2006, le parc résidentiel connaît une croissance spectaculaire, avec 369200 nouveaux logements mis sur le marché ». Il compte « 31,1millions de logements ».

taux de renouvellement du parc¹² est très faible (inférieur à 1%)¹³ et la construction de logements neufs très performants sera loin d'être suffisant pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES. L'amélioration du parc existant, véritable gisement d'économie d'énergie, est indispensable pour atteindre les objectifs nationaux. La réduction des besoins de chauffage est la priorité. Les solutions d'amélioration de l'enveloppe sont connues, mais difficiles à mettre en œuvre correctement sur des bâtis anciens dont on ne contrôle pas tout. Des imperfections de l'enveloppe subsistent toujours même après une mise en œuvre soignée, et imposent la mise en place de systèmes de production de chaleur adaptés. Dans le cas de bâtis anciens réhabilités, la température de source du vecteur d'énergie doit alors être supérieure à celle d'un bâti neuf performant pour atteindre une même température de consigne de chauffage.

Ces dernières années, une technologie marque l'attention par son essor: la pompe à chaleur (PAC). Le marché des PAC avec comme source froide l'air extérieur est en pleine expansion¹⁴. De nouvelles technologies étrangères arrivent sur le marché français avec des performances intéressantes, notamment grâce à la technologie *inverter* qui permet une meilleure adaptation de la production de chaleur en fonction des besoins de chauffage. Les ventes sont en constante augmentation depuis plusieurs années¹⁵, et la PAC semble être une alternative pertinente au chauffage par convecteurs électriques et au remplacement de chaudière. La majorité des systèmes de PAC en place sur le parc immobilier français disposent d'une source froide sur l'air extérieur. Ces systèmes aux technologies de plus en plus performantes, restent extrêmement sujets aux conditions de température extérieure. Leur performance décroît rapidement lorsque la température extérieure diminue, d'une part à cause de la formation de givre sur l'échangeur extérieur qui nécessite le recours à des procédés de dégivrage, consommateurs d'énergie, et d'autre part par l'utilisation d'énergie d'appoint, souvent électrique pour assurer la totalité des besoins de chauffage lors des périodes les plus froides.

Une solution pour limiter ce type de fonctionnement pourrait consister à profiter de sources d'air tempérées intégrées au bâtiment pour alimenter la source froide de la PAC. Dans les logements anciens réhabilités, l'enjeu est alors triple : (a) Limiter le fonctionnement de ces systèmes sur les plages de températures les plus défavorables, en vue de réduire les cycles de dégivrage, et le recours à une énergie d'appoint ; (b) Améliorer les performances instantanées et aboutir à des températures de sources chaudes plus élevées, mieux adaptées aux bâtis anciens mêmes réhabilités ; (c)

12 Le taux de renouvellement du parc = (nombre de logements neufs – nombre de logements détruits) / nombre total de logements. Le nombre de logements détruits étant inférieur au nombre de logement neuf, le taux de renouvellement est inférieure à 1%.

13 p.3 de Stratégie d' utilisation rationnelle de l'énergie. Chapitre II. Les Bâtiments [ADEM2005].

14 p.53 des Chiffres clés du bâtiment [ADEM2007]

15 European Heat Pump Association (EHPA). www.ehpa.org.

Atteindre des performances saisonnières raisonnables, en vue d'améliorer le bilan en énergie primaire de ces systèmes par rapport à d'autres systèmes plus conventionnels, comme par exemple des chaudières gaz à condensation.

L'idée de récupérer la chaleur de zones thermiques qui disposent d'une température plus clémente que la température extérieure fait l'objet de cette thèse. Certaines zones agissent comme des zones tampons captant l'énergie solaire de façon passive : véranda, combles perdus, vide sanitaire. La récupération de chaleur peut également s'effectuer sur la chaleur contenue dans l'air vicié du système de ventilation. D'autres technologies peuvent venir compléter les précédentes : puits canadiens, capteurs solaires, façade double peaux et murs Trombe.

La récupération de la chaleur de zones attenantes aux locaux chauffés au profit d'un meilleur fonctionnement de la pompe à chaleur, pose la question de l'augmentation des déperditions. L'utilisation de la chaleur disponible dans certaines zones influence le débit de renouvellement d'air de celles-ci qui implique une diminution de sa température, et par conséquent une augmentation des déperditions des locaux à chauffer.

Cette problématique soulève un certain nombre de questions dont les principales sont listées sans ordre d'importance : (a) Il y a-t-il un réel intérêt énergétique à de tels couplages ? (b) L'augmentation des performances du système peut-elle enrayer l'augmentation des déperditions et/ou l'ajout d'auxiliaires supplémentaires (ventilateurs) éventuellement nécessaires pour ce type de couplage ? (c) Si ces couplages présentent un intérêt, quels types de sources, et quels types de technologie de PAC sont les plus adaptées ? (d) Dans quelles régions climatiques ? (e) Quelles conséquences cela peut-il avoir sur le bilan environnemental de ces systèmes en comparaison à des systèmes de chauffage conventionnels ?

Les réponses à ces questions, loin d'être triviales et intuitives nécessitent un certain approfondissement. L'objectif de cette thèse est d'apporter des éléments de réponse par voie de modélisation numérique aux questions que soulève la problématique des possibilités de récupération de chaleur par voie thermodynamique dans les maisons individuelles réhabilitées.

3. Délimitation

Ce travail de thèse s'intéresse à l'amélioration des performances des pompes à chaleur à l'aide de sources d'air tempérées intégrées au bâtiment. Dans ce cadre nous nous intéresserons uniquement aux pompes à chaleur air-air mécaniques entraînées par un moteur électrique et compresseur volumétrique qui fonctionnent en mode chauffage.

Il s'agit de PAC existantes sur le marché, prêtes à être raccordées, fabriquées en série.

L'étude se limite à la récupération de chaleur des sources d'air tempérées intégrées au bâtiment suivantes : (a) Vides sanitaires ; (b) Combles perdus ; (c) Vérandas ; (d) Air extrait d'un système de ventilation double flux ; (e) Puits canadiens, (f) Capteurs solaires à air.

4. Les pompes à chaleur

4.1. Marché des PAC

Selon les chiffres de l'association européenne des pompes à chaleur (EHPA) [EHPA2008] présentés figure 2, les statistiques de vente de pompes à chaleur montrent que les systèmes ayant comme source froide l'air extérieur dominent le marché des ventes de PAC en 2007.

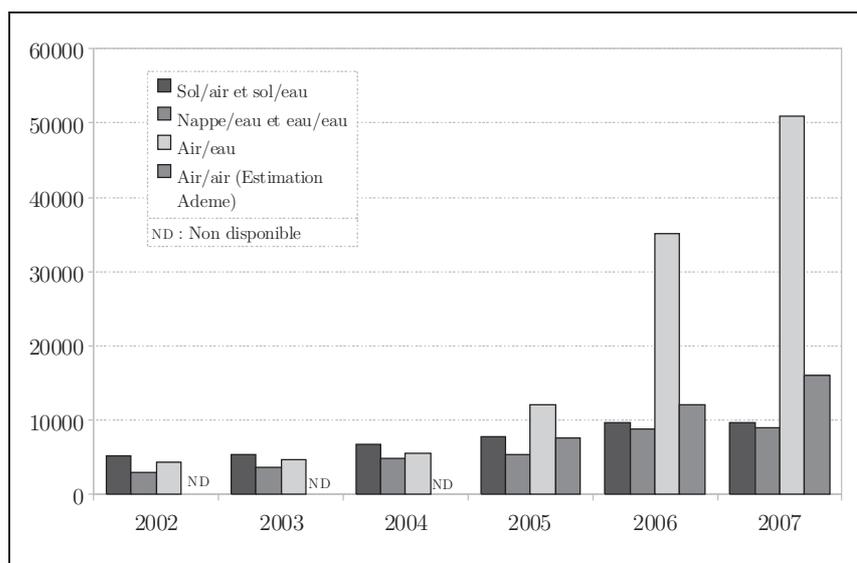


Figure 2: Vente des pompes à chaleur en France [EHPA2008]

En France, les maisons individuelles sont principalement équipées de chauffage central à eau avec radiateurs et plancher chauffant. Le fioul et le gaz représentent 60% de l'énergie utilisée pour alimenter ces systèmes. Le chauffage électrique représente 28% de la consommation énergétique dédiée au chauffage tout type d'énergie confondu. Les systèmes utilisés dans le cas du chauffage électrique sont principalement les convecteurs et les panneaux rayonnants. Dans les constructions neuves chauffées à l'électricité, la répartition des types systèmes est la suivante: (a) 33% de convecteurs ; (b) 27% de panneaux rayonnants ; (c) 24% de planchers chauffants ; (d) 5% de pompes à chaleur [BOSW2004].

Une alternative au chauffage électrique dans le neuf comme dans l'existant sont les PAC air-air et air-eau à haute température en remplacement de chaudière [RAHH2006] [IDDR2007]. Ce travail de thèse se focalise sur le couplage de PAC air-air avec des sources tempérées. Mais les résultats pourraient sans trop de difficulté être étendus au système de PAC air-eau.

4.2. Principes de base des systèmes thermodynamiques

Par définition, une pompe à chaleur est une machine qui transfère la chaleur d'une région à basse température vers une région à une température supérieure. Ce processus, contraire à l'évolution thermique spontanée allant d'un milieu chaud vers un milieu froid, s'obtient par un dispositif thermodynamique qui consomme inévitablement de l'énergie plus « noble » [DEHA1989]. Il s'agit d'énergie mécanique dans une pompe à chaleur à compression et d'énergie thermique (à température élevée) dans une pompe à chaleur à absorption.

Les pompes à chaleur à compression de vapeur entraînées par moteur électrique sont composées de quatre composants de base : un compresseur, un détendeur, un évaporateur (Ev) et un condenseur (Cd). L'implantation de ces composants dans le système est donnée à la figure 3.

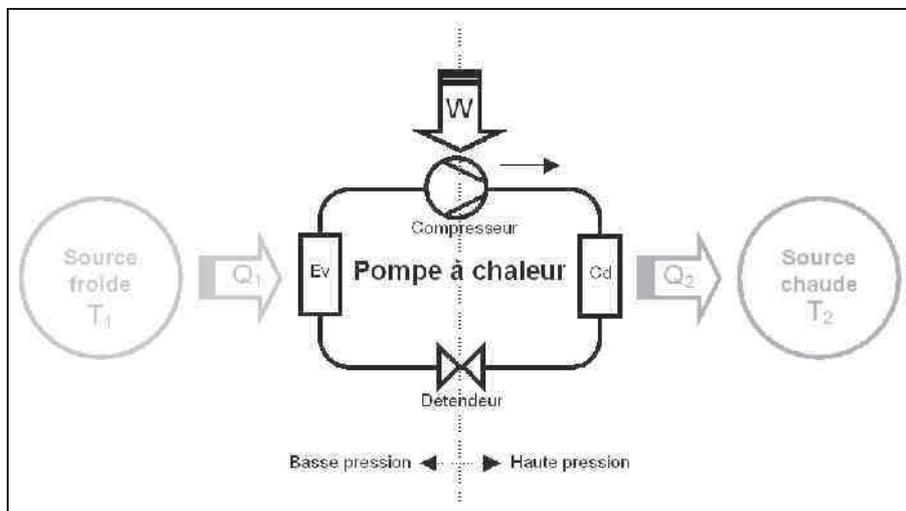


Figure 3: Schéma de principe d'une pompe à chaleur

Le transfert de chaleur de la source froide vers la source chaude se fait par l'intermédiaire d'un fluide frigorigène qui subit deux types de changement d'état au cours du cycle thermodynamique. Un phénomène endothermique de vaporisation du fluide frigorigène est utilisé au niveau de l'évaporateur afin d'extraire la chaleur à la source froide, et un phénomène exothermique de condensation de la vapeur est utilisé du côté du condenseur pour restituer la chaleur stockée dans le fluide frigorigène à la

source chaude. Les conditions (pression, température) d'évaporation et de condensation du fluide frigorigène étant totalement différentes, le compresseur et le détendeur permettent d'adapter les conditions de pression dans le circuit pour que les phénomènes de condensation et d'évaporation puissent se dérouler par échange de chaleur avec la source chaude et la source froide.

4.3. Principe de fonctionnement théorique d'une PAC

Ces trente dernières années de nombreux travaux ont concerné l'étude de la performance des PAC air-air. Ils concernent l'amélioration de la conception des composants internes, la régulation et la variation de puissance, les procédés de dégivrage. Leur objectif commun est l'amélioration de la performance globale des PAC.

Les mêmes constats reviennent : (a) diminution des performances avec la température extérieure nécessitant l'utilisation d'appoint lors des périodes les plus froides ; (b) fonctionnement à charge partielle une très grande partie du temps ; (c) givrage de l'échangeur extérieur nécessitant la mise en place d'un procédé de dégivrage venant dégrader la performance globale du système.

Considérons à titre d'exemple une PAC air-air d'une puissance calorifique nominale de 6 kW, placée dans une maison ancienne d'une centaine de mètre carré dans le climat de Trappes, ayant subi des travaux de rénovation sur l'enveloppe, la consommation annuelle de chauffage étant de l'ordre de 100 kWh.an⁻¹. On admet que cette PAC a été dimensionnée selon les règles empiriques communément utilisées chez les professionnels [COST2004], à savoir que le système doit être capable de fournir une puissance calorifique à pleine charge a minima supérieure à 60% des déperditions de l'espace à chauffer pour la température extérieure de base T_{base} , soit -7°C à Trappes (repère ❶ de la figure 4).

La tendance des évolutions de la puissance calorifique à pleine charge et des déperditions de chaleur en fonction de la température extérieure est présentée figure 4. Les deux droites se coupent en un point E appelé point d'équilibre. En ce point, la PAC fonctionne sans arrêt et compense exactement les déperditions du logement: c'est le mode de fonctionnement le plus efficace. A gauche de ce point, la PAC fonctionne à pleine charge avec le recours éventuel à un appoint électrique pour couvrir l'ensemble des déperditions. Certaines technologies offrent la possibilité de fonctionner au delà de la puissance à pleine charge, autorisant jusqu'à 20% de puissance calorifique supplémentaire durant de courtes périodes, afin d'éviter le recours à l'appoint [ROTH1991]. A droite du point d'équilibre, la PAC adapte sa puissance calorifique aux besoins de chauffage du bâtiment et fonctionne alors à charge partielle [PARK1977]. En outre, la formation de givre sur l'échangeur extérieur (fonction de la température et de

l'humidité relative de l'air extérieur) contraint la mise en route d'un dispositif de dégivrage venant perturber et dégrader le fonctionnement de la PAC à partir de températures extérieures inférieures à 7°C [KAYG1994] [ARGA2001].

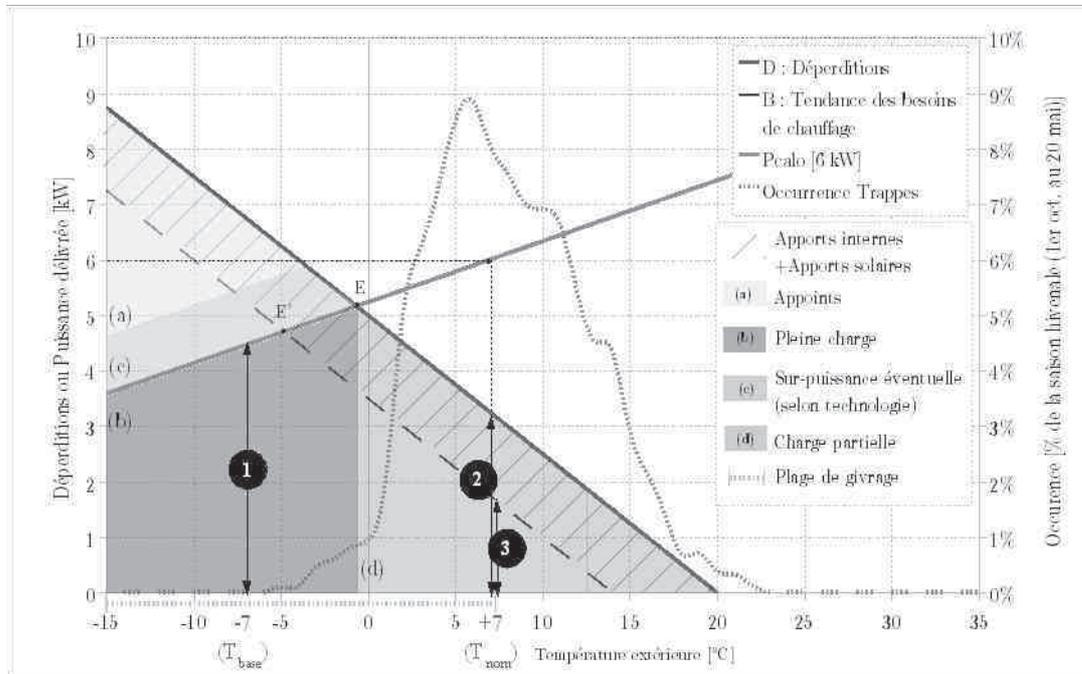


Figure 4: Comportement théorique d'une pompe à chaleur air-air placée dans son environnement (climat de Trappes)

L'observation combinée sur la figure 4 de l'occurrence des températures extérieures sur la période hivernale (1er octobre au 20 mai au climat de Trappes) montre que la PAC, telle qu'elle est dimensionnée, devrait fonctionner plus de 90% du temps à charge partielle. Le raisonnement précédent se base sur la couverture des déperditions de chaleur par la PAC, et non des besoins de chauffage, qui intègrent les apports énergétiques internes et solaires. En considérant une évolution linéaire des besoins de chauffage (ce qui constitue une approximation), la tendance présentée figure 4 montre un décalage du point d'équilibre E vers un nouveau point E'. La courbe d'occurrence se situant en quasi-intégralité à droite de E', la PAC devrait fonctionner près de 100% du temps à charge partielle.

Les performances nominales normalisées [NF14511] annoncées par les constructeurs sont données pour un fonctionnement à pleine charge stabilisé dans les conditions aux sources de 7°C (coté extérieur) et 20°C (coté intérieur). On observe que pour cette température extérieure les déperditions et les besoins de chauffage, ne représentent respectivement que 50% et 30% de la puissance calorifique nominale à pleine charge (respectivement les repères 2 et 3 de la figure 4). Les performances nominales, bien que potentiellement utiles dans la comparaison des pompes à chaleur entre elles, ne

reflètent aucunement le comportement réel de la PAC une fois mise en place. Ce constat ouvre le débat sur la question de l'utilité et des possibilités d'utilisation des données constructeurs comme données d'entrée pour le paramétrage des modèles de pompe à chaleur.

4.4. Performances des pompes à chaleur

On mesure l'efficacité énergétique ou rendement d'une PAC par la relation 1.

$$\text{Efficacité} = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}} \quad (1)$$

On nomme couramment cette efficacité : coefficient de performance (COP) pour le dissocier des rendements d'autres machines thermiques toujours inférieurs à 100%. Ce COP n'a de sens que si l'on sait exactement ce qu'il intègre dans l'*énergie utile* et l'*énergie consommée* qui le compose. L'*énergie utile* correspond à la puissance calorifique délivrée par la PAC pour couvrir les besoins de chauffage des locaux, et l'*énergie consommée* correspond à l'énergie nécessaire pour délivrer cette puissance. Il y a peu d'ambiguïté concernant l'*énergie utile*. Cependant l'*énergie consommée* peut entraîner quelques quiproquo. Les PAC sont composées d'éléments consommateurs d'énergie qui, selon les auteurs et les méthodes, sont intégrés ou non dans le calcul du COP. Les principaux éléments qu'il convient de prendre en compte pour évaluer au mieux leur performance sont le compresseur et les auxiliaires (ventilateurs). D'autres auxiliaires comme une pompe de circulation dans le circuit de chauffage ne sont pas inclus.

Pour lever toute ambiguïté dans la suite de ce rapport, plusieurs définitions sont proposées.

4.4.1. Indice de performance

L'indice de performance ε correspond à la performance instantanée du cycle thermodynamique. Il est typiquement le résultat de l'application du premier principe de la thermodynamique au circuit fermé de fluide frigorigène:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{calo}}{\dot{W}_{abs, compresseur}} \quad (2)$$

\dot{Q}_{calo} Puissance calorifique délivrée par la PAC [W]

$\dot{W}_{abs, compresseur}$ Puissance absorbée par le compresseur de la PAC [W]

4.4.2. Coefficient de performance

Le coefficient de performance COP traduit également une performance instantanée du cycle thermodynamique mais en intégrant cette fois la puissance appelée par les auxiliaires: ventilateur intérieur, ventilateur extérieur et appoints électriques. Dans le cadre de l'étude du couplage de la PAC avec des sources d'air tempérées, l'ajout de ventilateurs supplémentaires afin de transporter l'air d'une source à l'unité extérieure de la PAC sera également envisagé et intégré au bilan.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{calo}}{\dot{W}_{abs, compresseur} + \dot{W}_{abs, auxiliaires}} \quad (3)$$

$\dot{W}_{abs, auxiliaires}$ Puissance absorbée par les auxiliaires [W]

On précisera COP_{moyen} si le calcul est intégré sur une durée inférieure à une année ou à une saison de chauffe.

$$COP_{moyen} = \frac{Q_{calo}}{W_{abs, compresseur} + W_{abs, auxiliaires}} \quad (4)$$

Q_{calo} Quantité de chaleur délivrée par la PAC [Wh]

$W_{abs, compresseur}$ Quantité d'énergie consommée par le compresseur [Wh]

$W_{abs, auxiliaires}$ Quantité d'énergie consommée par les auxiliaires [Wh]

4.4.3. Facteur de performance saisonnier

Parfois appelé « coefficient de performance saisonnier » (SCOP), le « facteur de performance saisonnier » (FPS¹⁶) traduit la performance moyenne sur une longue période. Elle correspond à la définition du COP_{moyen} sur une année ou sur une saison de chauffe.

$$FPS = \frac{Q_{calo}}{W_{abs, compresseur} + W_{abs, auxiliaires}} \quad (5)$$

16 Seasonal Performance Factor (SPF) en anglais

4.5. Intérêt énergétique et environnemental

4.5.1. Comparaison avec d'autres systèmes de chauffage conventionnels

Les pompes à chaleur présentent une alternative aux systèmes traditionnels de production de chauffage (par exemple les convecteurs électriques ou chaudières à gaz) pour réduire la consommation d'énergie primaire et des émissions de gaz à effet de serre associées à la production de chaleur pour le chauffage des logements [FAVR2008] [AUZE2006].

La figure 5, propose une représentation de la chaîne énergétique pour trois types de systèmes de chauffage¹⁷ : (a) convecteurs électriques ; (b) pompe à chaleur ; (c) chaudière gaz à condensation ; dans le contexte énergétique français¹⁸.

Cette représentation de la chaîne énergétique, bien que simplifiée, permet d'évaluer en première approximation la consommation d'énergie primaire nécessaire, et les émissions de CO₂ associées à la production de chaleur utile des trois systèmes de chauffage précédents placés dans une maison individuelle de 100 m² ayant 100 kWh.m⁻².an⁻¹ de besoins de chauffage. La consommation d'énergie primaire est présentée figure 6 pour chacun des systèmes, dont les rendements et les COP saisonniers moyens¹⁹ sont indiqués entre parenthèses. Les émissions de CO₂ associées¹⁷ sont présentées figure 7. Dans le cas des systèmes de production de chaleur alimentés par de l'électricité (convecteurs et PAC), ces émissions dépendent grandement du mix énergétique de production d'électricité considéré. C'est pourquoi la figure 7 présente à la fois les émissions pour le mix énergétique français et européen²⁰ qui diffèrent principalement sur la part de la production d'électricité d'origine nucléaire et thermique classique. On notera également que le calcul des émissions des PAC sont calculées par la méthode TEWI (Total Equivalent Warming Impact) présenté au paragraphe 4.5.2., qui intègre à la fois les émissions directes (fluide frigorigène) et les émissions indirectes (énergie primaire).

17 le détail des hypothèses est fourni en *Annexe C*. Le contenu CO₂ du kWh d'électricité finale a été calculé à partir des indicateurs d'Equer, et des mix électriques français et européen [UE2009]. Les contenus CO₂ respectifs du kWh électrique finale est 89 gCO₂/kWh pour le mix français contre 534 gCO₂/kWh pour le mix européen. Le contenu CO₂ du kWh finale d'origine gaz provient également des chiffres Equer, avec 256 gCO₂/kWh.

18 le mix de la production d'électricité française 2006, (p.43-45) [UE2009] : 79% nucléaire; 10% thermique classique, 11% renouvelables.

19 intègrent les rendements suivants: émission, distribution, régulation et génération

20 le mix de la production d'électricité européen 2006, (p.43-45)[UE2009] : 24% nucléaire; 60% thermique classique, 16% renouvelables.

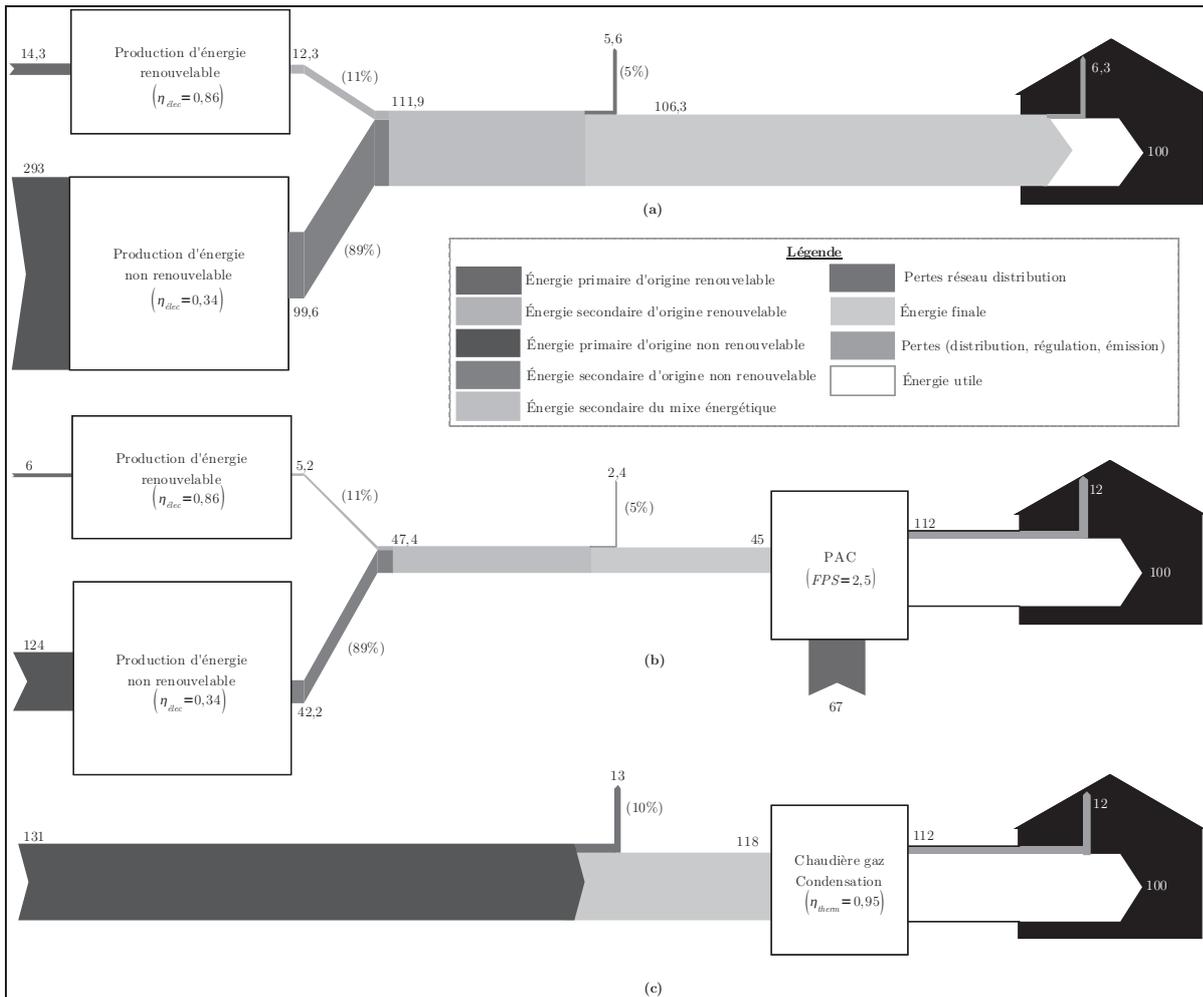


Figure 5: Chaîne énergétique de différents systèmes de production de chauffage : (a) convecteurs électriques ; (b) pompe à chaleur ; (c) chaudière gaz à condensation.

Sur le plan énergétique, l'impact de l'utilisation de ces systèmes sur les ressources non renouvelable (nucléaire et thermique classique) dépend à la fois de l'efficacité même des systèmes et de celle de la chaîne de production énergétique amont. Avec les hypothèses retenues¹⁷, les convecteurs consomment ainsi près de trois fois plus d'énergie primaire qu'une PAC ou une chaudière gaz à condensation pour la production de 100 kWh.m⁻².an⁻¹ de chaleur utile. Les PAC se situent plus ou moins bien par rapport à la chaudière gaz à condensation compte tenu de leurs performances saisonnières (figure 6).

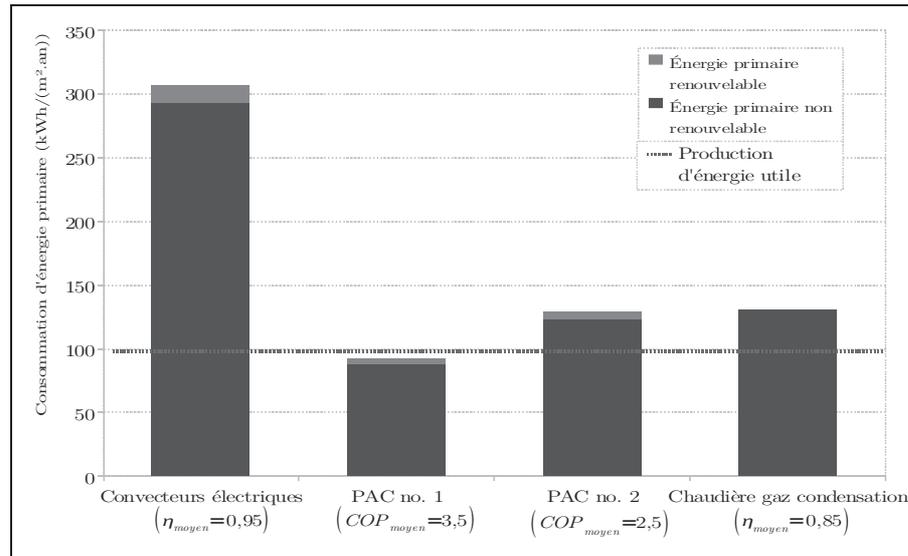


Figure 6: Consommation d'énergie primaire pour la production de $100 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ de chaleur utile

La PAC no.1, avec un COP moyen saisonnier à 3,5, consomme moins d'énergie primaire que la chaudière gaz à condensation. La PAC no.2 quant à elle, de COP moyen saisonnier égale à 2,5, aurait une consommation d'énergie primaire supérieure à celle de la chaudière gaz à condensation. L'intérêt des PAC dans la réduction de la consommation des ressources d'énergie primaire non renouvelable grandit avec leurs performances saisonnières.

Sur le plan environnemental, les émissions de CO_2 associées à chacun des systèmes de production dépend grandement du mix de production de l'électricité et des hypothèses sur le contenu en CO_2 du kilowattheure de chaque énergie. Ce contenu est difficile à évaluer et varie fortement en fonction des saisons. Selon une étude RTE/ADEME [RTE2007], la méthode de calcul utilisée pour l'évaluation du contenu CO_2 du kilowattheure d'électricité²¹ fait varier les résultats du contenu de CO_2 d'un facteur 5. On comprend bien que les résultats présentés ci-après sont soumis à caution, et dépendent grandement des hypothèses de départ. Avec les hypothèses retenues sur le contenu CO_2 du kWh basées sur les données du logiciel Equer pour les différentes filière de production d'électricité²², et les hypothèses du mix moyen annuel de production électrique français provenant des statistiques de la Commission européenne [UE2009], les convecteurs électriques émettent trois fois moins de CO_2 qu'une chaudière gaz à condensation pour la production de $100 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$ de chaleur utile dans le contexte

21 la méthode ADEME/EDF évalue « le contenu moyen par usage sur la base de l'historique ». Leurs calculs aboutissent à un contenu CO_2 du kWh d'électricité de $120 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ pour le chauffage. La méthode RTE « repose sur le principe du contenu marginal en CO_2 de l'électricité », et aboutie à un contenu CO_2 du kWh de 500 à $600 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ [RTE2007].

22 la valeur retenue pour le contenu CO_2 du kWh d'électricité français et européen calculée à partir de contenu de chaque type de production (charbon, fuel, gaz, nucléaire, renouvelables) moyenné par rapport au mix de production électrique.

français (figure 7).

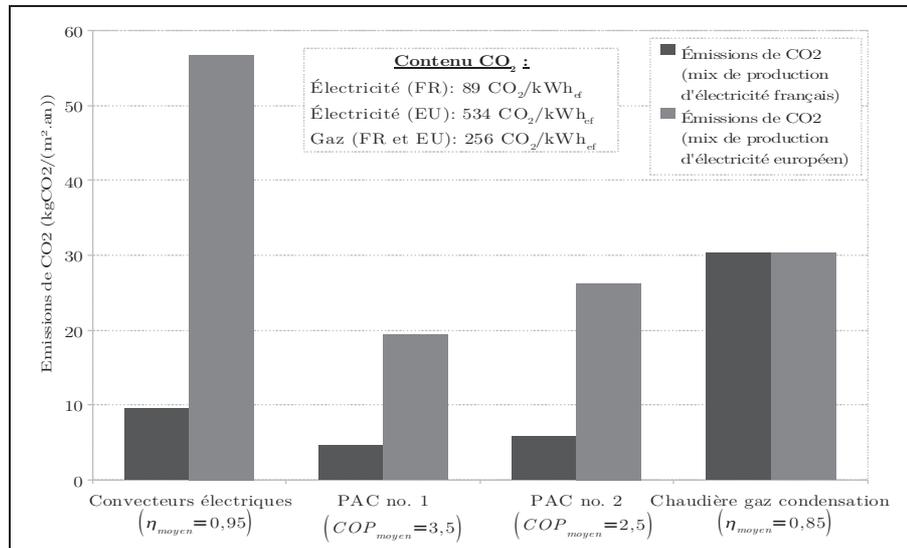


Figure 7: Émissions de CO₂ associées à la production de 100 kWh.m⁻².an⁻¹ de chaleur utile. (méthode TEWI pour les PAC)

Les PAC consommant près de deux à trois fois moins d'énergie que les convecteurs électriques pour la même production de chaleur, réduisent leurs émissions en conséquence. Mais on sait que le chauffage électrique induit des pointes de consommation les journées froides d'hiver, et donc un recours plus important à la production thermique l'usage du mix moyen annuel n'est alors pas pertinent Dans le contexte de production électrique européen, les résultats sont radicalement différents. Compte tenu de la forte proportion de centrales thermiques classiques dans la production électrique européenne, le contenu CO₂ du kilowattheure est 5 fois supérieur à celui de la France, et 2 fois supérieur au contenu CO₂ du kilowattheure de gaz. Les convecteurs électriques sont près de deux fois plus émetteurs de CO₂ qu'une chaudière gaz à condensation. Les PAC quant à elles restent dans le contexte européen plus intéressante qu'une chaudière gaz à condensation, que ce soit pour la PAC no.1 ou no.2, mais en considérant un mix moyen annuel. Il faudrait également prendre en compte un ensemble plus global d'impacts environnementaux, incluant aussi les aspects de santé, de génération de déchets (en particulier radioactifs), d'épuisement des ressources naturelles, etc.

Dans le contexte français et européen, l'impact environnemental d'une PAC est principalement dû à sa consommation en énergie primaire. Cependant à mesure que le mix de production électrique évolue vers un contenu CO₂ de plus en plus faible, par l'intégration des énergies renouvelables dans la production par exemple, l'impact dû aux émissions directes de fluide frigorigène, notamment par les fuites prend toute son importance. La méthode prenant en compte cet aspect est présentée au paragraphe

4.5.2.

Globalement les PAC restent du point de vue énergétique et environnemental une solution alternative à d'autres systèmes de production de chauffage, notamment aux convecteurs électriques.

Les objectifs de cette thèse vont dans le sens de l'amélioration des performances saisonnières des PAC en vue de réduire les impacts sur les ressources naturelles et sur les émissions de CO₂.

4.5.2. TEWI (Total Equivalent Warming Impact)

Le TEWI est un indicateur environnemental dédié aux PAC qui inclut à la fois les émissions directes (dues aux fuites de fluide frigorigène) et indirectes (dues à la consommation d'énergie primaire) [SAND1999]. Il est calculé à l'aide de la formule 6 et sera utilisé pour tout calcul des émissions de GES dans la suite du rapport. Une alternative consisterait à utiliser la méthode d'analyse de cycle de vie, qui prend en compte également la fabrication de la PAC, la maintenance et la fin de vie de l'ensemble de ses composants.

$$TEWI = \text{Effet de serre direct} + \text{Effet de serre indirect} \quad (6)$$

$$TEWI = \underbrace{\left(PRP_{100} \times L \times n \right)}_{\text{fuites}} + \underbrace{\left(PRP_{100} \times m \times \left(1 - \alpha_{\text{recovery}} \right) \right)}_{\text{pertes fin de vie}} + \underbrace{\left(n \times E_a \times \beta \right)}_{\text{énergie utilisée}}$$

pertes directes
pertes indirectes

Avec :

PRP_{100}	Potentiel de réchauffement planétaire du fluide frigorigène	$[kg_{eq}CO_2]$
L	Quantité annuelle de fluide frigorigène perdu par fuite du circuit	$[kg.an^{-1}]$
n	Durée de vie de l'installation	$[an]$
m	Charge de fluide frigorigène présent dans l'installation	$[kg]$
α_{recovery}	Taux de récupération de fluide frigorigène en fin de vie	$[-]$
E_a	Consommation annuelle en énergie finale	$[kWh.an^{-1}]$
β	Contenu CO ₂ du kWh électrique	$[kgCO_2.kWh^{-1}]$

Le pouvoir de réchauffement planétaire est propre à chaque fluide frigorigène. Les principaux sont donnés au tableau 2.

Fluide	PRP_{100}
CO2	1
CH4	21
R32	580
R125	3200
R134a	1300
R143a	4400
R410a (50% de R32 + 50% de R125)	1730

Tableau 2: Pouvoir de réchauffement planétaire de différents fluides frigorigènes [CLOD1998].

On évalue les fuites de frigorigène du circuit de l'installation de la PAC entre 3% et 10% de la charge totale de réfrigérant [BERN2007].

Les hypothèses prises pour l'évaluation des émissions de CO₂ de la figure 9 sont données au tableau 3.

	Mix français	Mix européen
PRP_{100} (kg _{éq} CO ₂)	1730 (R410a)	1730 (R410a)
L (%)	3	3
n (an)	20	20
m (kg)	4	4
$\alpha_{recovery}$ (%)	80	80
E_a (kWh _{ef} .m ⁻² .an ⁻¹)	33,7	33,7
β (kgCO ₂ .kWh _{ef})	0,09	0,53

Tableau 3: Hypothèses de calcul des émissions de CO₂ des PAC

Le détail des résultats des émissions de CO₂ est donné figure 8.

La part des émissions directes est d'autant plus importante que le contenu en CO₂ du kWh d'électricité est faible. Ainsi dans le contexte français, la part des émissions directes est beaucoup plus marquée avec environ 30% des émissions totales annuelles, contre 10% environ pour le contexte européen. D'où l'importance de la prise en compte des émissions directes dans les calculs qui suivront.

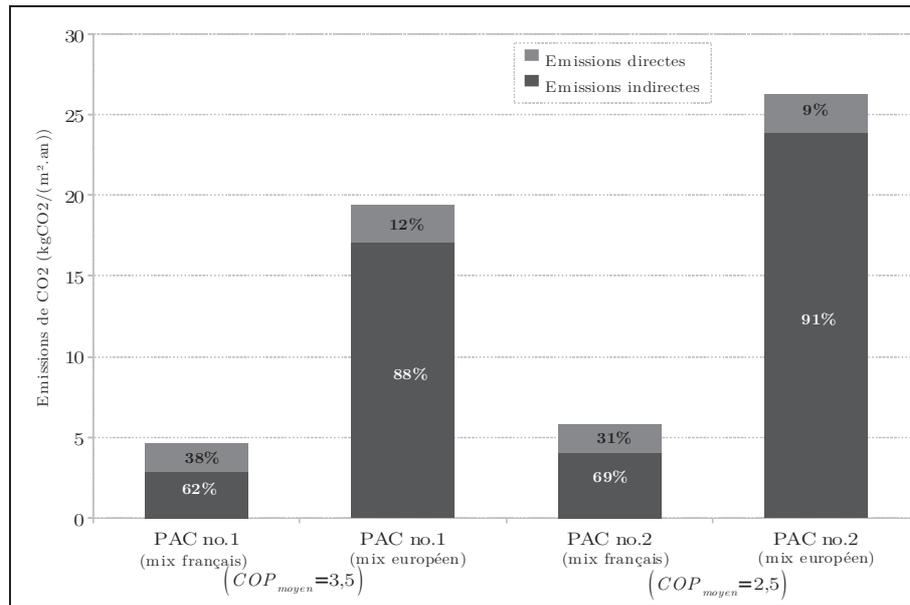


Figure 8: Détails des émissions de CO₂ pour les PAC

Dans la suite de cette thèse, le calcul des émissions de GES relative à l'utilisation des PAC fera référence à la méthode de calcul TEWI.

4.5.3. Part d'énergie renouvelable contenue dans la production de chaleur des PAC

Bien que souvent assimilées à des énergies renouvelables, les pompes à chaleur ne le sont pas en tant que telles. Elles utilisent de façon rationnelle une énergie noble, l'électricité produite à partir de sources renouvelables ou non, pour transférer de la chaleur d'une source froide renouvelable à une source chaude. Elles n'entrent pas dans la catégorie établie par la directive 2003/54/CE qui définit à l'article 2, paragraphe 30, comme « sources d'énergie renouvelables » : les sources d'énergie non fossiles renouvelables (énergie éolienne, solaire, géothermique, houlomotrice, marémotrice, hydroélectrique, biomasse, gaz de décharge, gaz des stations d'épuration d'eaux usées, biogaz) ».

Cependant, une part de l'énergie thermique délivrée par une pompe à chaleur peut être comptabilisée comme d'origine renouvelable.

On retrouve dans la littérature plusieurs éléments qui définissent, de façon plus ou moins complète, la méthode pour comptabiliser la part d'énergie renouvelable contenue dans la production de chaleur d'une PAC. Une revue et une analyse critique de ces définitions sont proposées ci-après.

Une première méthode, définie dans la directive 2009/28/CE [DIRE2009]²³, établit

²³ p. 48 de la directive [DIRE2009], annexe VII, « Comptabilisation de l'énergie produite à partir de pompe à chaleur ».

que « la quantité d'énergie (...) capturée par des pompes à chaleur devant être considérée comme énergie produite à partir de sources renouvelables se calcule selon l'équation 7».

$$E_{RES} = Q_{utilisable} \cdot \left(1 - \frac{1}{FPS_{dir}} \right) \quad (7)$$

Avec:

E_{RES}	Energie considérée comme produite à partir de sources renouvelable	[kWh]
$Q_{utilisable}$	Energie calorifique délivrée par la pompe à chaleur	[kWh]
FPS_{dir}	Facteur de performance saisonnier moyen estimé	[kWh.kWh ⁻¹]

En l'état actuel de la norme, aucune définition du facteur de performance saisonnier moyen FPS_{dir} n'est arrêté. Selon le Comité de Liaison des Énergies Renouvelables (CLER) une définition devrait voir le jour au plus tard en 2010, pour l'application de cette directive [CLER2009].

L'équation 7 est complétée par des conditions d'application dans le but de ne comptabiliser dans la production de chaleur d'origine renouvelable uniquement les PAC les plus performantes, et d'inciter à l'utilisation et la conception de celles-ci. Selon la directive « seules sont prises en compte les pompes à chaleur pour lesquelles le facteur de performance saisonnier vérifie l'équation 8 ».

$$FPS_{dir} > 1,15 \cdot (1/\eta) \quad (8)$$

Où:

η « ratio entre la production brute totale d'électricité et la consommation énergétique primaire requise pour la production », soit le rendement moyen de production de l'électricité dans le pays considéré. Les pertes du réseau²⁴ sont intégrées dans le coefficient 1,15 à hauteur de 13%.

Il est très probable que la définition du facteur de performance saisonnier moyen de la norme ne corresponde pas à la définition du facteur de performance saisonnier établi à l'équation 5. Si tel était le cas, la part d'énergie renouvelable dans la production de chaleur ne dépendrait uniquement que des performances saisonnières de la PAC, et ferait abstraction de toutes les pertes de la chaîne de production énergétique. Cela reviendrait à dire que la part d'énergie renouvelable contenue dans la production de la chaleur finale correspond à l'énergie puisée directement au niveau de la source froide

²⁴ L'inéquation 8 peut s'écrire $FPS_{dir} > 1/(0,87 \cdot \eta)$, ce qui correspond à des pertes réseau de 13%.

(air, eau ou sol). Le calcul du rendement η doit être calculé selon la méthode de calcul de la « demande cumulative d'énergie » [THIER2008], qui tient compte à la fois du mix énergétique et des rendements associés à chaque type de production. Selon les conventions retenues dans le choix des rendements de chaque type de production, la valeur de η varie largement ainsi que celle du seuil d'acceptation des PAC dans la comptabilité de la part d'énergie renouvelable dans la quantité de chaleur produite.

	Part de la production dans le mix de la production totale d'électricité	Rendement associé au type de production ²⁵	Rendement associé au type de production ²⁶
Nucléaire	79%	34%	28%
Thermique classique	9,7%	40%	30%
Hydraulique	11,3%	85%	80%
η	-	40,3%	34,1%
Seuil FPS_{dir}	-	2,85	3,38

Tableau 4: Rendement et seuil d'acceptation des PAC dans la comptabilité de la part d'énergie renouvelable dans la quantité de chaleur produite

Selon les conventions de choix du rendement η , le seuil d'acceptation des PAC dans la comptabilité peut varier de 2,85 à 3,38.

Ce raisonnement est illustré figure 9. La courbe de la consommation d'énergie finale et celle de la part d'énergie renouvelable comptabilisée sont complémentaires lorsque le FPS est supérieur à la valeur de 2,96. Pour une production de chaleur utile de 100 kWh avec une PAC dont le FPS est égale à 3,5, cette méthode comptabiliserait 75 kWh d'énergie renouvelable. Ce raisonnement n'est pas rigoureux du point de vue énergétique et environnemental, puisqu'il fait abstraction de la consommation des ressources primaires non renouvelables. Si on observe, toujours à la figure 9, l'énergie primaire non renouvelable réellement consommée, on constate que pour la production de 100 kWh, 70 kWh d'énergie primaire auraient été nécessaires

25 Chiffres provenant du cours de Favrat de l'EPFL.

26 Association des ingénieurs allemands (VDI) [THIER2008]

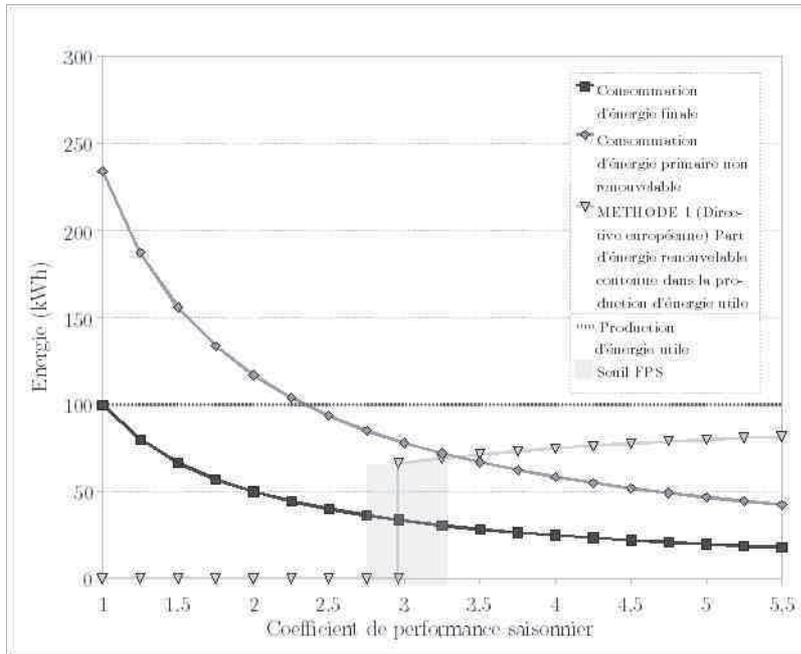


Figure 9: Part de l'énergie renouvelable contenue dans la production d'énergie utile (méthode 1)

Le CLER²⁷ dans le cadre des travaux du comité opérationnel (Comop) n°10 sur les énergies renouvelables, du Grenelle de l'environnement, propose une définition plus rigoureuse du coefficient de performance saisonnier moyen [CLER2008]. Elle consiste à se ramener à la part d'énergie primaire d'origine renouvelable induite par la PAC. Dans ce calcul, l'énergie considérée comme renouvelable n'est pas celle puisée directement de l'environnement mais la part d'énergie primaire non renouvelable évitée par l'utilisation de la PAC. Autrement dit, la part d'énergie d'origine renouvelable se calcule selon l'équation 9, comme la chaleur délivrée par la PAC moins l'énergie primaire non renouvelable nécessaire pour la production d'énergie utile. Dans le cas où l'énergie primaire non renouvelable est supérieure à la chaleur produite utile, on considère que la part d'énergie renouvelable est nulle.

$$E_{RES} = Q_{utilisable} - \left(Q_{abs} \cdot (1 - \epsilon_{RES}) \cdot \frac{1}{\eta} \right) \quad (9)$$

L'équation 9 s'écrit aussi:

$$E_{RES} = Q_{utilisable} \left(1 - \frac{(1 - \epsilon_{RES})}{\eta \cdot FPS} \right) \quad (10)$$

27 Comité de Liaison des Énergies Renouvelables. Site internet: www.cler.org

Avec:

ϵ_{RES}	Part de la production d'énergie primaire d'origine renouvelables	[%]
$Q_{utilisable}$	Énergie calorifique délivrée par la pompe à chaleur	[kWh]
Q_{abs}	Énergie consommée par la pompe à chaleur	[kWh]
η	Ratio entre la production brute totale d'électricité et la consommation énergétique primaire requise pour la production non renouvelable	[%]
FPS	Facteur de performance saisonnier définit selon l'équation 5.	[kWh.kWh ⁻¹]

La proposition du CLER n'intègre pas les pertes du réseau de distribution d'électricité. Pour combler ce manquement, une définition complète et rigoureuse est alors proposée à l'équation 11.

$$E_{RES} = Q_{utilisable} \left(1 - \frac{(1 - \epsilon_{RES})}{\eta \cdot (1 - p) \cdot FPS} \right) \quad (11)$$

Une condition d'application (équation 12) vient compléter l'équation 11 afin d'inciter à l'utilisation des PAC les plus performantes:

$$FPS > \frac{1}{\eta \cdot (1 - p)} \quad (12)$$

p	Pertes du réseau de distribution	[%]
-----	----------------------------------	-----

Ainsi, la part d'énergie renouvelable dépend alors de trois principaux paramètres:

- (a) les performances saisonnières de la PAC;
- (b) le rendement de production de l'électricité sur le réseau (coefficient de conversion de l'énergie finale en énergie primaire, avec les pertes réseau);
- (c) la part d'énergie renouvelable dans la production d'électricité.

La figure 10 illustre l'application de la méthode au contexte énergétique français. La courbe de l'énergie primaire non renouvelable et celle de la part d'énergie renouvelable sont complémentaires. Une PAC qui produit 100 kWh d'énergie utile avec un FPS de 3,5 compte 33 kWh d'énergie d'origine renouvelable. Pour ce contexte, on constate qu'il existe une part réelle d'énergie renouvelable dans la chaleur produite d'une PAC lorsque son COP saisonnier est supérieur à 2,3. En dessous de cette valeur, on peut considérer que 100% de l'énergie primaire nécessaire pour produire les 100 kWh de chaleur utile sont d'origine non renouvelable. Pour que le contenu d'énergie

renouvelable de la production de chaleur de la PAC soit supérieur à celui du contenu d'énergie primaire non renouvelable, il est nécessaire d'avoir des systèmes avec des facteurs de performance saisonniers qui dépassent 4,75.

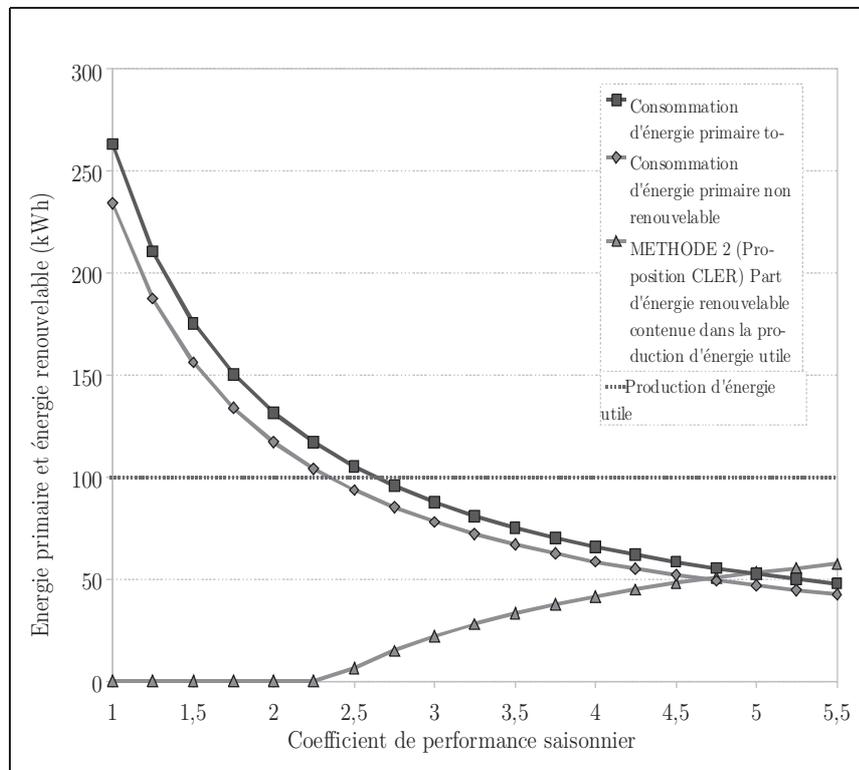


Figure 10: Part d'énergie renouvelable dans la production de 100 kWh de chaleur utile dans le contexte énergétique français

Certaines PAC air-air mal dimensionnées²⁸ peuvent avoir des COP saisonniers de l'ordre de 2, ce qui dans le contexte énergétique français, signifie que le contenu énergie de la chaleur délivrée par la PAC est 100% d'origine non renouvelable.

Les objectifs de cette thèse vont dans le sens de l'amélioration des performances saisonnières des PAC air-air par couplage de leur source froide avec des sources d'air tempérées, et par conséquent d'une augmentation de la part d'énergie renouvelable dans le contenu de la chaleur délivrée par celles-ci.

De nombreux travaux ont été effectués dans ce sens depuis plus d'une quarantaine d'année. La partie suivante propose un état de l'art de ces travaux.

28 Valeur issue de relevés sur site belge Energie +. Site: www.energieplus-lesite.be