



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]

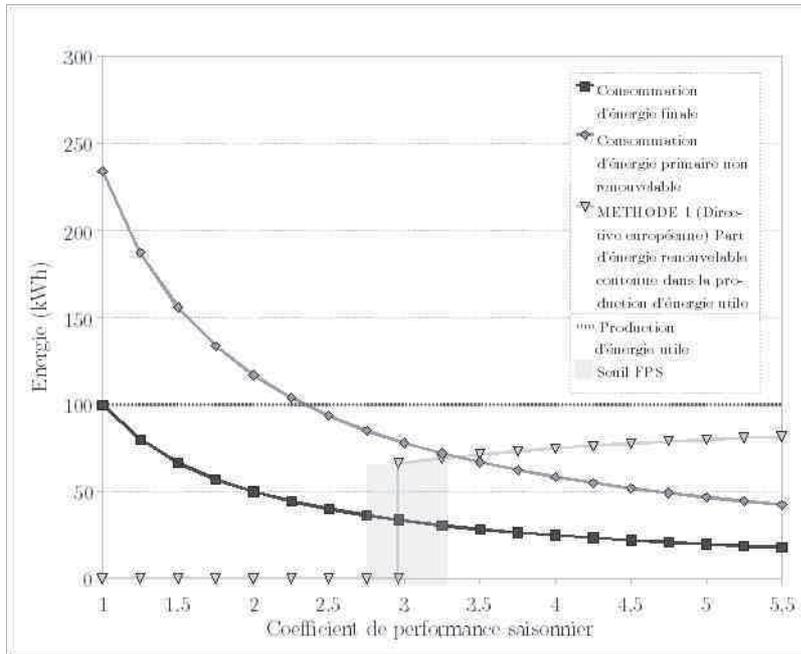


Figure 9: Part de l'énergie renouvelable contenue dans la production d'énergie utile (méthode 1)

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.

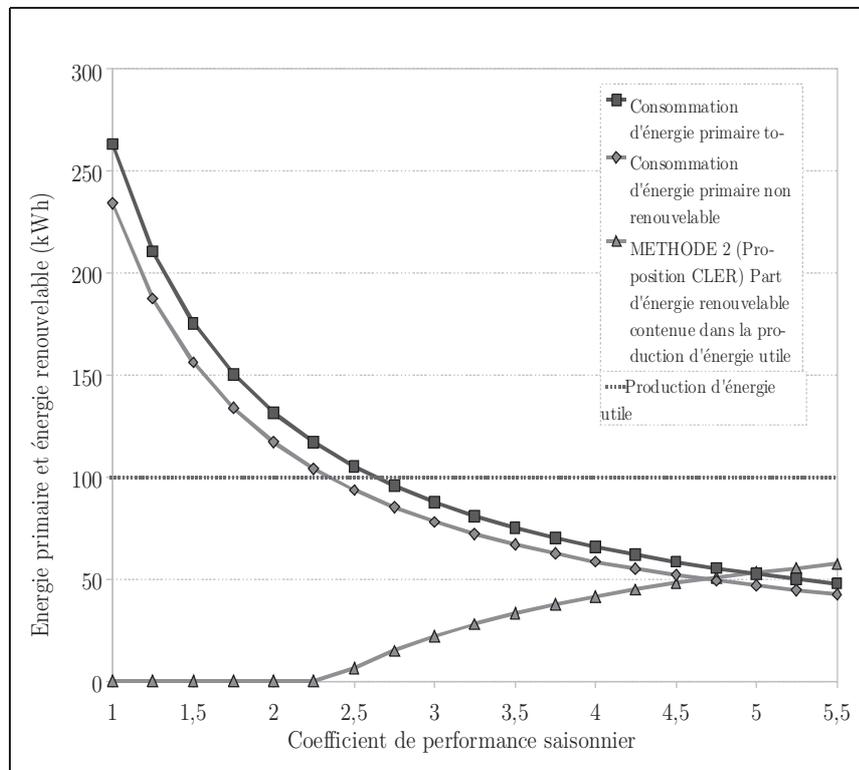


Figure 10: Part d'énergie renouvelable dans la production de 100 kWh de chaleur utile dans le contexte énergétique français

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

5. État de l'art sur la récupération de chaleur

Récupérer de la chaleur est possible dès lors que la température d'une source est supérieure au zéro absolu. De nombreux travaux ont consisté à évaluer les possibilités de récupération de chaleur de sources d'air tempérées pour alimenter la source froide des pompes à chaleur.

Nous passons en revue ici les études portant sur la récupération de chaleur d'éléments intégrés aux bâtiments d'habitation sans stockage. La majorité des études ont concerné deux types de sources d'air tempérées: les vides sanitaires et les capteurs solaires à air.

5.1. Couplage avec un vide sanitaire

Une série de travaux datant du début des années 80 ont concerné le couplage de PAC air-air avec des vides sanitaires. Plusieurs expérimentations et travaux de modélisation ont été réalisés en collaboration avec le laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL) pour évaluer l'amélioration des performances des PAC couplées au vide sanitaire.

5.1.1. [TERN1980], [TERN1982a], [TERN1982b]²⁹

Les PAC air-air ont des performances saisonnières très attractives lors de leur mise en place dans des climats modérés, mais leur performance diminue grandement dans des climats plus froids. Le COP et la puissance calorifique du système diminuent quand la température de l'air extérieur diminue, alors qu'au même instant la charge thermique et les besoins de chauffage augmentent. Un chauffage d'appoint est souvent nécessaire pour satisfaire les besoins de chauffage et les phénomènes de givrage de l'échangeur de l'unité extérieure viennent dégrader les performances globales de l'installation.

Les travaux de Ternes ont concerné l'amélioration des performances des PAC air-air en climat froid par l'utilisation de la température clémente de l'air se situant dans le vide sanitaire d'une maison. Cet air peut être utilisé en hiver pour préchauffer l'air alimentant l'unité extérieure de la PAC. Celle-ci fonctionne alors dans un climat plus favorable qu'à l'extérieur, avec de meilleures performances. L'auteur s'est penché sur

²⁹ Ternes, M.P., Crawl space-assisted heat pump. Progress report, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, august 1980

Ternes, M.P., Earth thermal storage for enhanced performance of air-to-air heat pump. 17th intersocietal energy conservation engineering conference. Los Angeles, CA, 1982.

Ternes, M.P., Earth thermal storageassisted heat pump, presented àet the energy storage contractors review meeting, Arlington, VA. 23 august, 1982 ;

l'étude de deux configurations de couplage d'une pompe à chaleur air-air et d'un vide sanitaire : *tout air neuf* (« single-pass », figure 12) et en *boucle fermée* (« recirculating », figure 11).

Trois maisons identiques ont été instrumentées. Deux d'entre elles ont été équipées d'une PAC air-air couplée à l'air du vide sanitaire, la dernière sert de référence et a été équipée d'une installation conventionnelle, l'unité extérieure de la PAC se situant à l'extérieur.

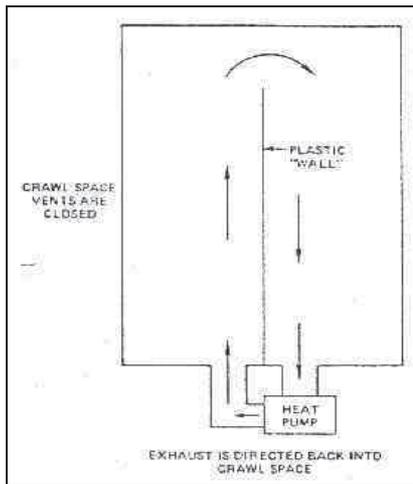


Figure 11: boucle fermée [TERN1980]

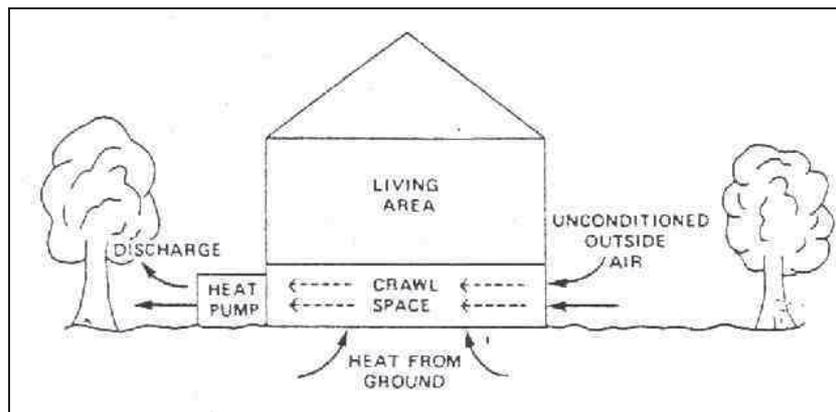


Figure 12: tout air neuf [TERN1980]

Une instrumentation détaillée de l'installation a permis la mesure des températures d'air en plusieurs points du vide sanitaire, de sol à 15 cm de profondeur, et de l'énergie produite et consommée par les différents éléments de la PAC. Les mesures sur plusieurs mois d'hiver ont montrées que lorsque la température de l'air extérieur se situait entre -15°C et $4,5^{\circ}\text{C}$, celle du vide sanitaire pouvait atteindre respectivement -4°C et 6°C .

Les résultats obtenus au cours de la première année de mesures ont montré la grande amélioration des performances de la PAC durant la mi-saison. Mais des anomalies ont exclu des conclusions définitives.

Cependant les principales conclusions sont les suivantes :

- Le COP en régime permanent est supérieur dans les configurations de couplage, en comparaison avec la PAC installée de façon conventionnelle ;
- La puissance fournie en régime permanent est également supérieure, ce qui permet de réduire le recours à une énergie d'appoint (résistances électriques);
- Les températures plus douces réduisent l'apparition du givre sur l'échangeur de l'unité extérieure et donc le recours au cycle de dégivrage.

L'un des avantages de ces configurations est que le système ne nécessite a priori pas

de modification de la machine pour son installation dans un vide sanitaire. Aucun gainage n'est nécessaire, ce qui limite le prix de l'installation par rapport à une installation conventionnelle.

Cependant, il a également été reconnu que ce concept augmentait les déperditions thermiques par le plancher bas à cause de la diminution de la température dans le vide sanitaire. Une isolation adaptée du plancher bas de la maison est alors nécessaire pour limiter les pertes de chaleur.

5.1.2. [SMIT1981]³⁰

Smith et Reid se sont penchés sur l'étude des mêmes configurations que Ternes : *tout air neuf* (« single-pass », figure 13) et en *boucle fermée* (« recirculating », figure 14). La première configuration consiste à faire entrer l'air extérieur d'un coté du vide sanitaire. Cet air circule dans le vide sanitaire et récupère une partie de la chaleur du sol, passe à travers l'unité extérieure de la PAC, puis est rejeté à l'extérieur du vide sanitaire. La seconde configuration consiste à faire passer l'air du vide sanitaire à travers l'unité extérieure et de souffler de nouveau cet air dans le vide sanitaire. Seule la première configuration a fait l'objet d'une expérimentation sur un cas réel. L'autre n'a été étudié que de façon analytique à partir des données récoltées lors de la première expérimentation.

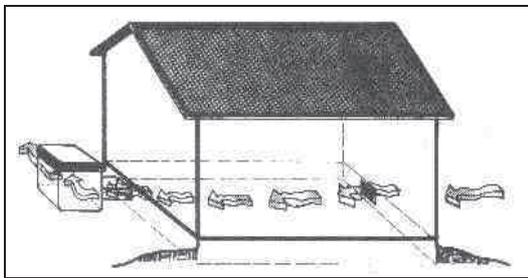


Figure 13: *tout air neuf* [SMIT1981]

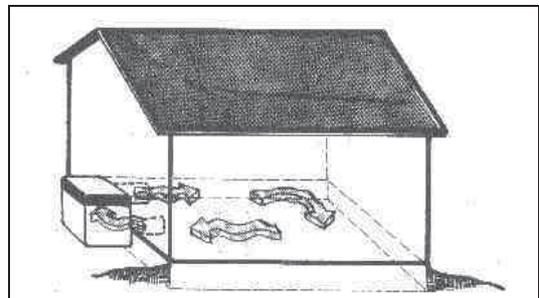


Figure 14: *boucle fermée* [SMIT1981]

L'expérimentation a fait l'objet d'une attention toute particulière en ce qui concerne l'isolation du plancher bas de la maison afin de limiter un maximum les pertes thermiques vers le vide sanitaire et d'assurer l'étanchéité à l'air de celui-ci. Un pare-vapeur a également été placé sur la surface du sol du vide sanitaire afin de limiter toute remontée d'humidité à travers le sol.

Les expérimentations d'une durée de cinq mois ont abouti aux résultats suivants :

- Le couplage en *tout air neuf* permet de limiter voir d'annuler la nécessité de résistances électriques d'appoint les jours les plus froids, et permet la diminution

³⁰ Smith, L.O., Reid, R.L., « Evaluation of a ground coupled air-to-air (crawl space) heat pump. ASHRAE Transactions, Vol. 87, Part 2, pp. 405-417, 1981.

de la formation de givre sur l'unité extérieure, et donc un recours moindre au cycle de dégivrage. Les auteurs ont évalué à 22,5% la diminution de la consommation globale de l'installation (PAC + appoint). Ces gains sont à 10% dus à une augmentation du COP de la PAC, à 1% dus aux déperditions de chaleur à travers le plancher bas de la maison, à 10% à la limitation du déclenchement des résistances d'appoint, à 1,5% à la limitation du givrage et dégivrage de l'échangeur de l'unité extérieure.

- La configuration en *boucle fermée*, évaluée de façon analytique, permettrait selon les auteurs une diminution de 31,5% de la consommation globale de l'installation. 12% serait due à l'augmentation des performances de la PAC, 1% à la réduction des déperditions à travers l'enveloppe, 15% à la limitation du déclenchement des résistances électriques d'appoint, et 3,5% à la limitation du givrage et dégivrage de l'échangeur extérieur.

5.1.3. [WASS1983], [WASS1984]³¹

Les travaux de Wasserman et al. ont également concerné l'évaluation des performances d'une PAC air-air couplée à un vide sanitaire, dans le cadre des recherches effectuées par le laboratoire national d'Oak Ridge (ORNL). Une maison à un étage, dont le plancher bas a été isolé avec 15 cm d'isolant sur la face inférieure, dispose d'un vide sanitaire. Une attention particulière a été portée à l'étanchéité à l'air de ce dernier afin éviter tous transferts de chaleur par infiltration d'air avec la maison et l'extérieur. L'ensemble des réseaux et tuyaux passant dans le vide sanitaire ont également été isolés avec 5 cm d'isolant. Un pare-vapeur a été placé sur la totalité de la surface de sol pour éviter les remontées d'humidité par le sol.

Les configurations étudiées sont les mêmes que les travaux de Ternes [TERN1980] [TERN1982a] [TERN1982b] et Smith [SMITH1981] : *tout air neuf* (« single-pass », figure 15) et en *boucle fermée* (« recirculating », figure 16)

31 Wasserman, D., Reid, R., McGraw, B.A., Performance evaluation of a crawlspace heat pump installation. ASHRAE Transactions, Vol. 89, Part 1a, pp. 144-155, 1983.

Wasserman, D.M., Reid, R.L., Modeling and simulation of the crawlspace heat pump. ASHRAE Transactions, Vol. 90, Part 1a, pp. 312-334, 1984.

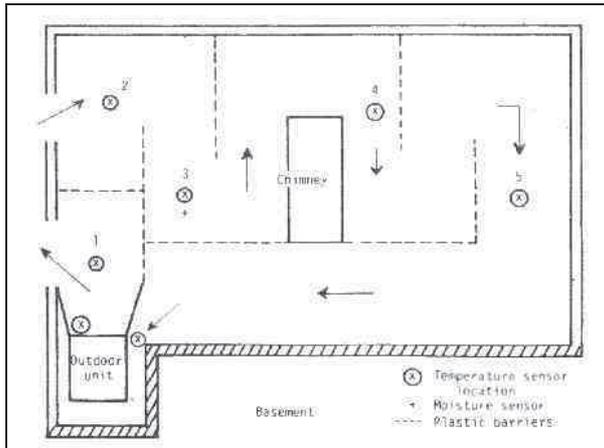


Figure 15: tout air neuf [WASS1983]

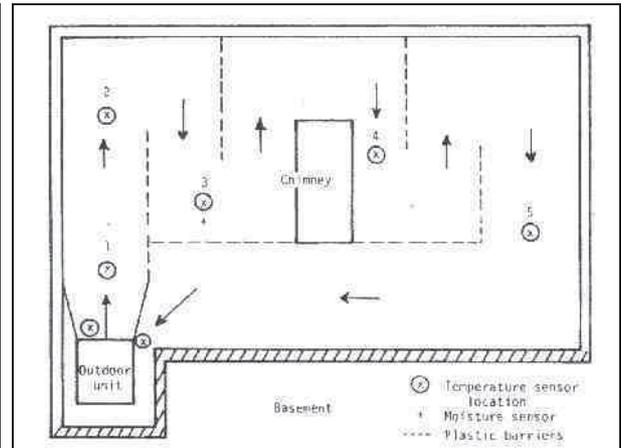


Figure 16: boucle fermée [WASS1983]

L'impact de ces configurations a été étudié à la fois en mode été et en mode hiver. En mode été, le système fonctionne en *tout air neuf* à travers le vide sanitaire. En mode hiver, le système fonctionne en *boucle fermée*. L'unité de la PAC placée dans le vide sanitaire joue le rôle d'un déshumidificateur, et permet la réduction des cycles de dégivrage.

Les performances entre l'installation couplée au vide sanitaire et une installation classique ont été comparées à l'aide d'un outil de simulation développé à l'ORNL. Il s'agit de « SPF model » (Seasonal performance factor computer model). Le modèle permet de calculer l'énergie totale consommée sur un pas de temps d'une heure, utilisant les températures horaires de l'air extérieur, les besoins thermiques horaires du logement, et les performances du système en régime permanent provenant des catalogues constructeurs. En mode chauffage, si la température de l'air se situe dans la plage de givrage de l'échangeur de l'unité extérieure, la puissance calorifique et le COP sont réduits en utilisant un coefficient de dégradation dû au cycle de dégivrage. La puissance délivrée et le COP sont également réduits lors du fonctionnement à charge partielle de l'installation.

Ces travaux montrent que l'étude du couplage en mode rafraîchissement n'est pas aussi favorable qu'en mode chauffage. L'énergie consommée en mode rafraîchissement en utilisant l'air du vide sanitaire est en moyenne 2,8% supérieure à une installation conventionnelle (figure 17). Ceci est principalement dû au fait que les températures de l'air extérieur sont inférieures à celle des températures du vide sanitaire le matin très tôt et tard le soir. Du plus le fait que l'installation soit placée à l'intérieur du vide sanitaire a un impact sur la charge de climatisation du logement, qui a été évaluée à 7% supérieure à celle d'une installation classique. Cependant, au cours de l'heure la plus chaude du jour le plus chaud de l'été, une économie de 7% a été calculée. Ces résultats pourraient être améliorés avec la mise en place d'une régulation adaptée

permettant de by-passer l'air du vide sanitaire lorsque celui-ci est trop chaud.

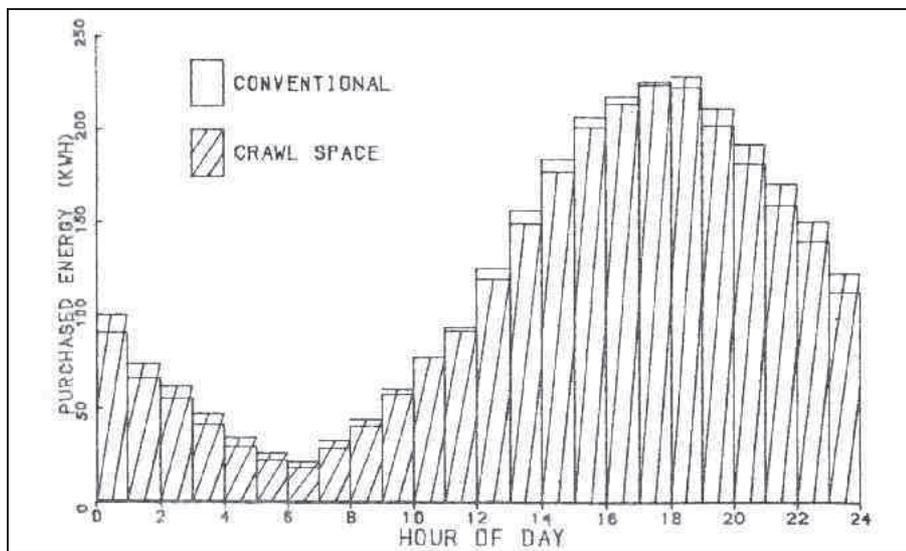


Figure 17: Résultats du couplage PAC/vide sanitaire en mode rafraîchissement [Wasserman 1983]

En mode chauffage, les résultats sont beaucoup plus intéressants (figure 18). Sur une période de quinze semaines de la saison de chauffe, une économie d'énergie de près de 15% est remarquée. L'économie effectuée au cours de l'heure la plus froide de l'hiver atteint 26,3% par rapport à une installation classique.

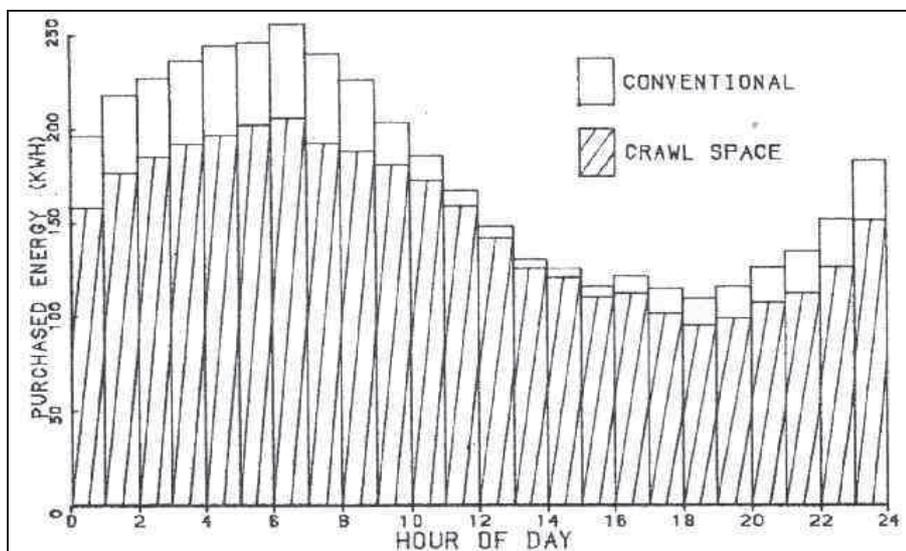


Figure 18: Résultats du couplage PAC/vide sanitaire en mode chauffage [Wasserman 1983]

5.1.4. [NICO1986]³²

Un rapport final vient clore l'ensemble des expérimentations effectuées par le laboratoire national d'Oak Ridge. Il s'appuie sur les travaux de Smith, Ternes, et Wasserman. Les conclusions sont les suivantes :

- Le couplage de la PAC avec le vide sanitaire réduit la température moyenne de celui-ci et augmente les besoins de chauffage de l'espace chauffé. Ce problème peut être résolu par une bonne isolation du plancher bas de la maison;
- Il a été confirmé par plusieurs séries d'expérimentations que les performances des pompes à chaleur couplées en configuration *tout air neuf* ou *boucle fermée* sont supérieures à une installation conventionnelle de la PAC.
- La configuration *boucle fermée* permet une diminution conséquente du cyclage de la PAC et des cycles de dégivrage. Les auteurs précisent que pour vraiment tirer parti de cette réduction des cycles de dégivrage, la régulation du déclenchement de ceux-ci doit être adaptée et optimisée. La régulation des systèmes conventionnels ne convenant pas, un ajustement de la régulation du déclenchement des cycles de givrage augmenterait considérablement leur durée de vie. De plus, le recours à une source d'énergie d'appoint les jours les plus froids est également considérablement réduit.
- Dans les climats relativement tempérées, les systèmes de PAC assistées par vide sanitaire ont de meilleures performances mais consomment globalement plus qu'une installation conventionnelle. Des essais effectués sur sept mois de l'hiver 1983-1984 montrent que la configuration *tout air neuf* consommerait +6% d'énergie et la configuration boucle fermée en consommerait 2% de moins.
- Dans des climats plus froids, il y a un réel intérêt au système de PAC assistées par vide sanitaires. Des économies de 12% ont pu être mesurées les mois de janvier et février pour la configuration *boucle fermée*.

5.1.5. [LUBL2007]³³

Des travaux plus récents de Lubliner et al. ont également concernés les systèmes de PAC air-air assistées par vide-sanitaire. Deux maisons de démonstrations ont été instrumentées dans le but d'évaluer l'impact de ce type de mise en œuvre sur les performances globales et sur les cycles de dégivrage. Contrairement aux travaux précédemment présentés, il s'agit ici d'une installation monobloc installée à l'intérieur

32 J. L. Nicol J. J. Carbato J. J. Tomlinson, Heat Pump Experiments Using Crawl Spaces as Ground-to-Air Heat Exchangers: Final Report, ORNL, 1986.

33 Lubliner, M., Hadley, A., Parker, D., HVAC improvements in manufactured housing crawlspace-assisted heat pumps. ASHRAE Annual meeting 2007.

de la maison. L'air est puisé dans le vide sanitaire ventilé et alimente l'évaporateur situé à l'arrière du système monobloc. Les débits d'air nécessaires au niveau de l'évaporateur pour le bon fonctionnement du système sont de l'ordre de 1300 à 2700 m³·h⁻¹. L'implantation du système est présentée à la figure 19.

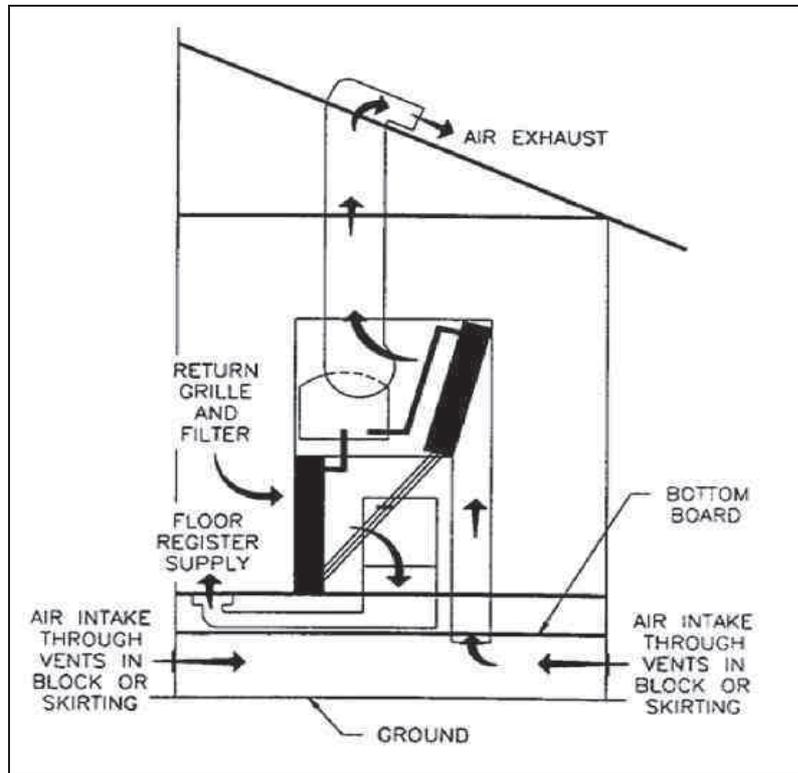


Figure 19: PAC monobloc sur vide sanitaire [LUBL2007]

Les auteurs rappellent que ce type de mise en œuvre existe aux États-Unis depuis la fin des années 1970, et que plus de 1000 unités de ces systèmes ont été installées entre 2002 et 2004.

Une procédure de relevés des consommations a été mise en place sur deux hivers en vue de comparer les consommations et les performances des systèmes de PAC assistés par vide sanitaire à celles de simples convecteurs électriques. Pour chacune des maisons instrumentées, deux jeux de relevés ont été effectués. La première série concerne les consommations des systèmes de PAC assistés par vide sanitaire. La seconde concerne les consommations des mêmes maisons équipées des convecteurs électriques amovibles. Les auteurs ont ainsi été capables de caractériser les performances et les consommations des deux types de systèmes en fonction de l'écart de température entre l'air intérieur et l'air extérieur. L'avantage de ce type de procédure est qu'elle compare les performances et consommations réelles sur site de ces systèmes. Dans le cas des PAC, les relevés effectués intègrent de façon globale les fuites sur le réseau de distribution, les pertes par conduction, le cyclage du système, ainsi que les cycles de dégivrage. Ce sont des relevés

reflétant au plus près le fonctionnement réel des systèmes. Les auteurs montrent que sur la saison de chauffe la consommation globale des systèmes de PAC assistées par vide sanitaire est 2,2 à 3,9 fois moindre que celle des convecteurs électriques dans les mêmes conditions d'écart de température entre l'air intérieur et extérieur.

Les auteurs mettent également l'accent sur l'importance de la régulation et plus particulièrement de l'ajustement du déclenchement des cycles de dégivrage des systèmes de PAC assistées par vide sanitaire. Plusieurs séries de tests ont permis aux auteurs d'évaluer l'influence du temps de déclenchement entre deux cycles de dégivrage. Le procédé de dégivrage des PAC installée, réglé pour se déclencher toutes les 60 minutes, a été ajusté pour ne se déclencher que toutes les 90 minutes (le couplage avec le vide sanitaire limitant la formation de givre au niveau de l'évaporateur et donc le recours à des cycles de dégivrage). Selon les auteurs, pour les deux installations étudiées un maximum de réduction des consommations dues aux cycles de dégivrages de 65 kWh.an⁻¹ peut être attendu. Une optimisation du système de régulation des cycles de dégivrage pourrait entraîner d'avantage d'économie d'énergie.

Les auteurs ont également été à la rencontre des habitants de 49 maisons préfabriquées datant du début des années 1990 équipées de systèmes de PAC assistées par vide sanitaire. Leur retour sur le sujet concerne principalement des problèmes de bruit liés aux phases de dégivrage, notamment la nuit pour les chambres situées proches du système. Aucun problème majeur de fonctionnement n'a été rapporté lors de ce retour d'expérience.

5.2. Couplage avec des capteurs à air

5.2.1. [ANDR2002]³⁴

Dans une étude bibliographique dédiée aux panneaux photovoltaïques hybrides³⁵ thermique à air (produisant à la fois de l'électricité et de la chaleur), Andresen fait le point sur les études qui concernent le couplage de ces capteurs avec des PAC ayant comme source froide l'air.

³⁴ Andresen, I., Building Integrated Photovoltaics in Smart Energy-Efficient Buildings A State-of-the-Art.

³⁵ BIPV (Building integrated Photovoltaic) en anglais

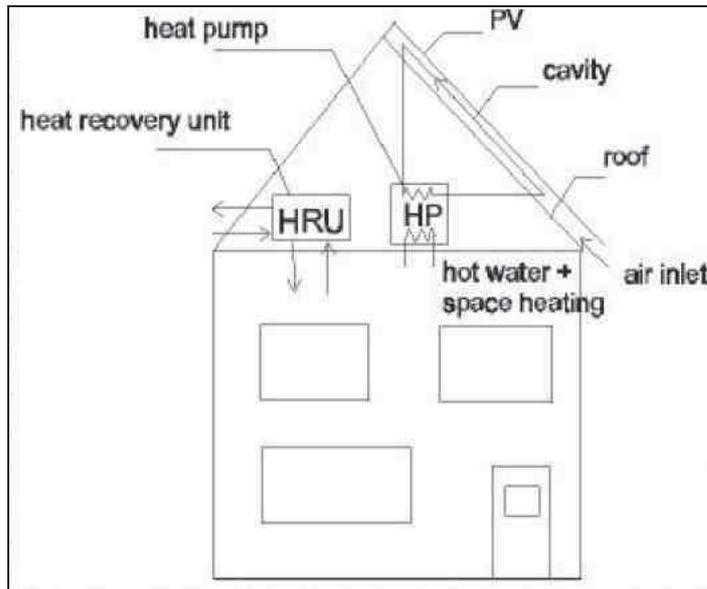


Figure 20: schéma de principe sur le couplage capteurs PV hybride et pompe à chaleur [ANDR2002]

Aucun résultat sur les effets de ce type de couplage sur les pompes à chaleur n'a été présenté.

5.2.2. [ZOND2002] [ZOND2008] ³⁶

Les travaux présentés par Zondag concernent une nouvelle fois le couplage d'une PAC air-eau avec un capteur photovoltaïque hybride thermique à air. Des expérimentations ont été effectuées sur les maisons tests de l'ECN, dans le but d'évaluer le double impact sur les performances de la PAC et sur le rendement de production des cellules photovoltaïques de ce type de couplage. Le schéma de principe est donné à la figure 21.

Le capteur hybride préchauffe l'air extérieur servant à alimenter l'échangeur extérieur de la PAC. La PAC fonctionne ainsi dans des conditions plus favorables. L'air refroidi par l'évaporateur est ensuite renvoyé en bas du capteur solaire dans le but de refroidir les cellules photovoltaïques et d'en améliorer le rendement de production d'électricité.

³⁶ Zondag H.A., Combined PV-air collector as heat pump air preheater. ECN, Netherland, 2002.

Zondag H.A., Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and sustainable energy review., Vol. 12, pp. 891-959, 2008.

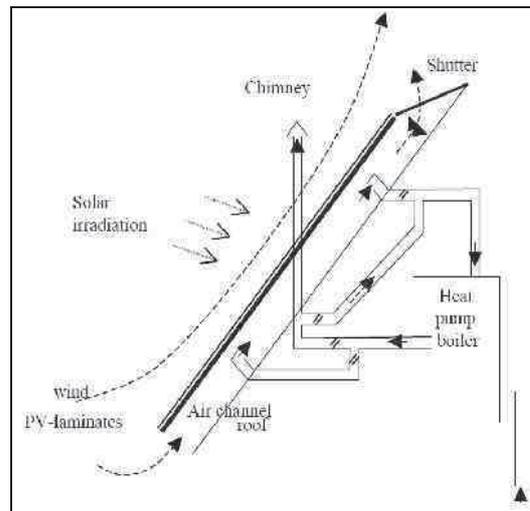


Figure 21: Couplage direct entre une PAC air-eau et un capteur photovoltaïque hybride

Les expérimentations ont rencontré quelques problèmes et n'ont pu aboutir à des résultats probants³⁷. Il se trouve que les températures acceptables au niveau de l'évaporateur de la PAC étaient de l'ordre de 40°C. Or la température à la sortie du capteur hybride pouvait atteindre des températures voisines de 60°C. Le couplage PAC/capteur hybride était dans ce cas impossible et n'a pu être expérimenté. En contre partie des travaux de modélisation ont été réalisés sur ce type de couplage dédié à la production d'eau chaude sanitaire (ECS). La PAC servant à chauffer l'eau du ballon d'eau chaude. Les pics de besoins d'ECS étant déphasés par rapport aux apports solaires, puisqu'ils se déroulent principalement le matin ou en soirée, le capteur solaire a un impact réduit, voir nul sur les performances de PAC. L'impact du couplage n'a de sens que si une partie de l'énergie solaire produite la journée est stockée et restituée au moment des pics de demande. L'auteur note que le problème est similaire dans le cas de la production de chaleur pour le chauffage. Selon lui, l'utilité d'un capteur hybride thermique à air dans de telles applications n'a de sens que s'il est couplé à un système de stockage de l'énergie solaire.

5.2.3. Programmes de l'AIE : Task 7, Task 19, Task 35.

On peut citer l'intérêt de certaines Tâches lancées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour le couplage entre des capteurs photovoltaïques classiques et hybrides thermiques à air avec des pompes à chaleur.

C'est notamment le cas de la « Tâche 7 » (1997-2002) « Photovoltaic power systems in the built environment », Sous-tâche 2 du programme de recherche PVPS

³⁷ E-mail du Dr Zondag, datant du 10 mars 2009.

(Photovoltaic Power System), qui passe en revue les possibilités de couplage des capteurs hybrides avec d'autre type de systèmes et notamment les PAC disposant d'une source froide sur l'air ou sur l'eau [SORE2002].

La « Tâche 19 » (1993-1999) « Solar air system » du programme de recherche Solar Cooling and Heating de l'AIE a concerné le potentiel énergétique des capteurs à air seule[HAST2000].

Le rapprochement de ces travaux s'est fait par le lancement de la « Tâche 35 » « PV/Thermal solar systems » du programme Solar Cooling and Heating, dont la « Sous-tâche D » a concerné l'intérêt du couplage des capteurs solaire hybride thermique à air avec des pompes à chaleur, notamment dans les travaux de Zondag présentés précédemment [HANS2007].

6. Problématique du couplage PAC + sources d'air tempérées

L'état de l'art nous a permis de faire le point sur les travaux effectués jusqu'ici en terme de couplage entre des PAC et des sources d'air tempérées intégrées au bâtiment. Elles ont principalement concerné deux types de sources d'air : les vides sanitaires et les capteurs solaires à air.

D'autres éléments intégrés aux bâtiments peuvent être imaginés comme source froide d'air tempéré. Certaines zones comme les combles perdus, les vérandas, agissent comme des zones tampons, et captent l'énergie solaire de façon passive. D'autres éléments, classés dans la catégorie des systèmes peuvent également être envisagé : l'air extrait d'une ventilation double flux et un échangeur air-sol.

Dans ces travaux six sources de chaleur tempérées seront envisagées comme source froide de la pompe à chaleur : (1) le vide sanitaire, (2) les combles, (3) la véranda, (4) l'air extrait de la ventilation, (5) les capteurs à air ; (6) le puits climatique.

Deux configurations de couplage seront envisagées : le *couplage indirect* et le *couplage direct*.

6.1. Couplage indirect

L'unité extérieure est installée de façon conventionnelle (c'est-à-dire à l'extérieur) et l'air des sources d'air tempérées est transporté à l'aide d'un réseau de distribution et de ventilateurs supplémentaires jusqu'à l'unité extérieure (UE) de la PAC (figure 22).

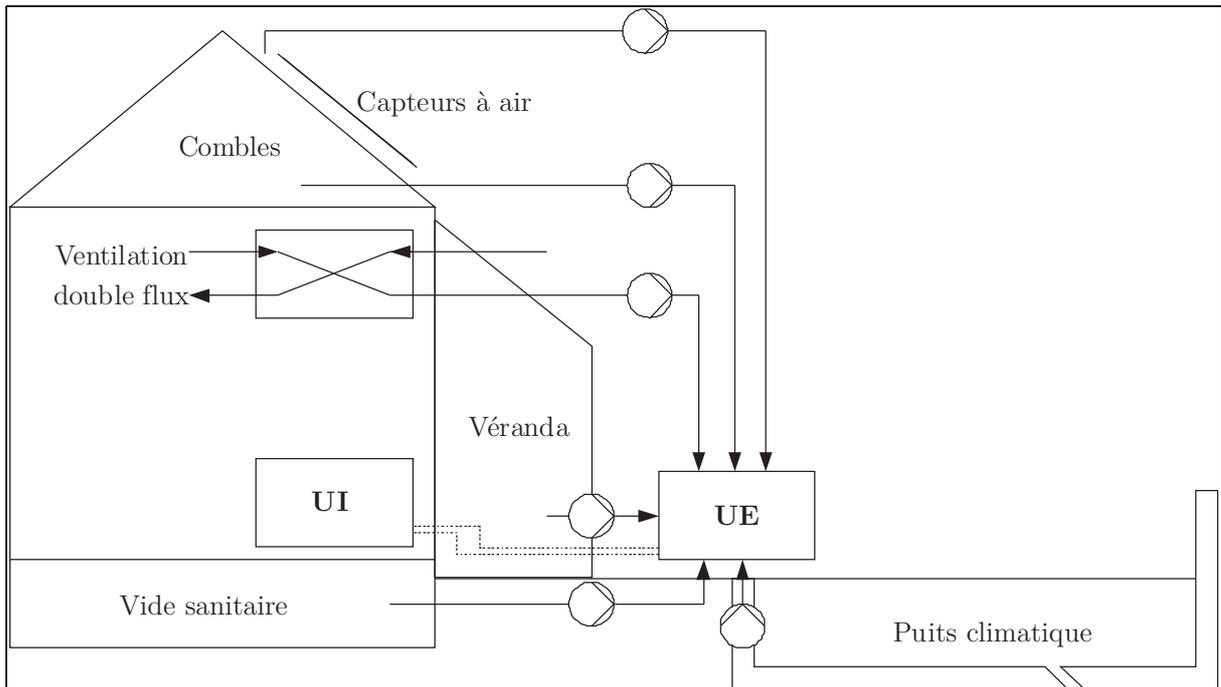


Figure 22: Exemple de configuration de couplage indirect

Tout l'enjeu de cette configuration est de savoir si les gains de performance et de consommation qui pourraient être engendrés par la hausse de la température de la source froide de la PAC permettraient de couvrir la consommation des ventilateurs supplémentaires, et de rendre ce type de couplage viable. Pour cela deux variantes seront possibles :

- Chaque source apporte un débit d'air au niveau de l'unité extérieure correspondant à son débit de renouvellement d'air en configuration non perturbée, c'est-à-dire avec son taux de renouvellement d'air naturel. Si la somme des débits de l'ensemble des sources n'est pas suffisant, de l'air extérieur est utilisé pour compléter le débit manquant nécessaire au bon fonctionnement de la PAC.
- La configuration est identique à la précédente mais le déclenchement du ventilateur supplémentaire est contrôlé par une régulation *tout ou rien* permettant de tirer partie de la source d'air tempérée uniquement lorsque les conditions de température de la source sont les plus intéressantes.

Les performances globales de l'installation intègre la consommation des ventilateurs supplémentaires.

6.2. Couplage direct

Afin de s'affranchir de l'utilisation de ventilateurs supplémentaires, l'unité extérieure de la PAC peut être placée directement dans une zone d'air tempérée. Le débit de renouvellement d'air de la zone est alors fonction du débit nécessaire au niveau de l'unité extérieure pour le bon fonctionnement de la PAC. Selon la technologie de régulation de la PAC, ce débit peut être constant (PAC contrôlée par marche-arrêt), ou régulé en fonction du régime fonctionnement de la PAC (PAC contrôlée par inverter).

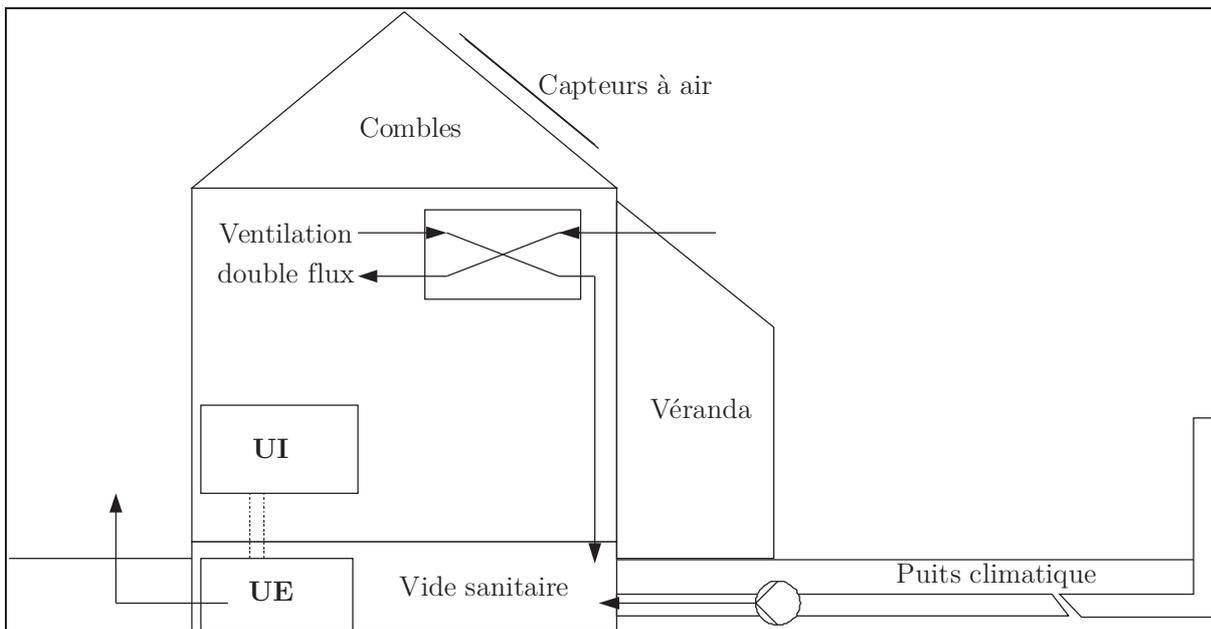


Figure 23: Exemple de configuration de couplage direct

Cette configuration influe sur la température de la zone où est placée l'unité extérieure de la PAC. Il y a une interaction directe entre le fonctionnement de la PAC et le comportement du bâtiment. L'augmentation du débit de renouvellement de la zone tend à réduire sa température et à augmenter les déperditions thermiques de la zone chauffée. Tout l'enjeu de cette configuration est de savoir si le *couplage direct* permet des gains de performances et de consommations suffisants pour couvrir l'augmentation des besoins de chauffage dus aux interactions entre la PAC et le bâtiment.

7. Approche de modélisation

Afin d'apporter des éléments de réponses aux questions posées par la problématique de couplage, l'approche retenue est une approche par modélisation. Cette problématique nécessite de disposer d'un modèle global intégrant à la fois un modèle d'enveloppe du bâtiment et un modèle de PAC. Dans la configuration de *couplage*

indirect régulé, et de *couplage direct* présentés précédemment le débit de renouvellement d'air des zones est asservi au mode de fonctionnement de la PAC et à la vitesse de rotation du ventilateur de l'unité extérieure. Le modèle global enveloppe du bâtiment/PAC permet la prise en compte de l'ensemble des interactions entre l'enveloppe du bâtiment et le régime de fonctionnement de la PAC.

A cette occasion le modèle d'enveloppe du bâtiment COMFIE, développé par l'équipe Éco-conception et Thermique du Bâtiment (ETB) du Centre Énergétique et Procédés (CEP) de l'école des Mines de Paris, a été complété par un modèle de PAC. Ce modèle prend en compte l'ensemble des comportements d'une PAC nécessaire à l'analyse saisonnière de ses performances et de sa consommation (régime de fonctionnement à pleine charge et à charge partielle, dégradation des performances due au givrage de l'échangeur extérieur et au cycle de dégivrage, recours à une énergie d'appoint, régulation du débit de ventilation de l'unité extérieure). Le modèle de PAC implémenté dans COMFIE se base sur une large étude bibliographique des modèles de PAC existants, et constitue une compilation de plusieurs modèles existants (chapitre 2). Pour les besoins de l'étude des améliorations ont été proposées concernant le régime de fonctionnement à charge partielle et la régulation de la vitesse de rotation du ventilateur de l'unité extérieure, ainsi que la dégradation des performances par cycle de givrage/dégivrage.

Le choix du modèle s'est orienté vers le meilleur compromis parmi les critères suivants :

- La simplicité de paramétrage (implique l'utilisation d'informations provenant des catalogues constructeurs) ;
- Le temps de calcul du modèle d'enveloppe qui permet le calcul des besoins du bâtiment est de l'ordre de dix secondes pour une maison individuelle. L'implémentation d'un modèle de PAC permettant le calcul de ses performances et sa consommation ne doit pas pénaliser excessivement le temps de calcul global.
- Le modèle doit être sensible aux paramètres influençant le plus son comportement et ces performances (régime de fonctionnement à pleine charge et à charge partielle, plage de températures de givrage, prise en compte de l'énergie d'appoint).
- Le modèle se doit d'être polyvalent, et capable de prendre en compte les technologies représentatives du marché des PAC. Il doit également permettre l'extrapolation de son utilisation en dehors des seuls points de fonctionnement permettant son paramétrage.

8. Conclusions

On a pu constater que les PAC peuvent constituer une alternative intéressante aux systèmes de production de chauffage traditionnels (chaudière et plus particulièrement les convecteurs électriques). Le couplage de la source froide de la PAC avec des sources d'air tempérées intégrées au bâtiment semble constituer une solution d'amélioration des performances saisonnières de ces systèmes, et une production de chaleur mieux adaptée à la réhabilitation des maisons individuelles qui nécessitent des températures de sources chaudes plus importantes.

De nombreux travaux ont été effectués sur le couplage des PAC air-air avec des vides sanitaires et des capteurs solaires hybrides à air. Cependant, d'autres éléments de l'enveloppe d'un bâtiment peuvent constituer des sources d'air tempérées intéressantes et sont étudiées dans ce rapport (combles perdus, véranda, air extrait de ventilation, échangeur air-sol).

Pour cela un modèle de PAC a été implémenté dans le modèle d'enveloppe du bâtiment COMFIE. Le chapitre suivant propose une revue bibliographique des modèles de PAC disponibles et oriente son choix vers une compilation de plusieurs modèles de la littérature. Plusieurs améliorations sont proposées dans le but d'aboutir à un modèle complet, capable de prendre en compte les interactions entre le modèle de PAC et le modèle d'enveloppe dans cette problématique de récupération de chaleur par voie thermodynamique.